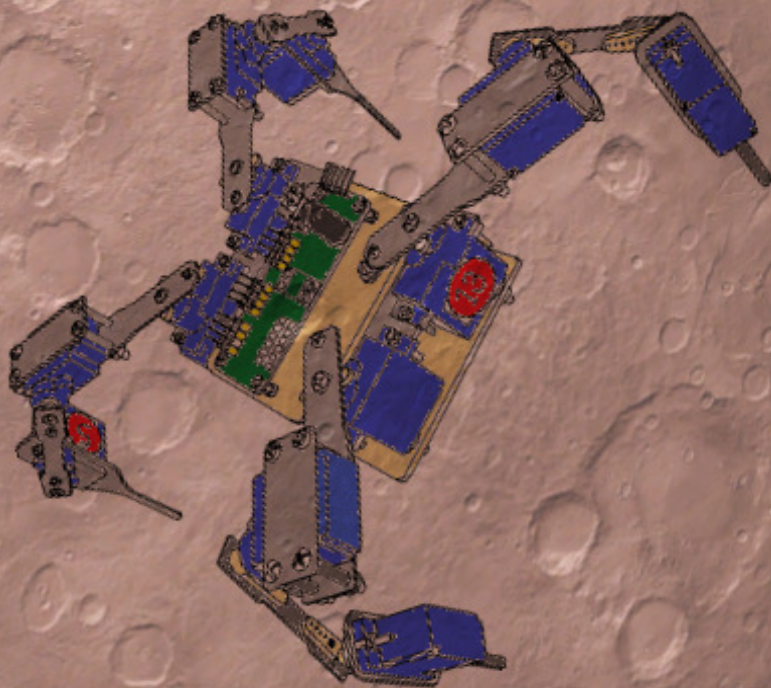


# La petite sonde d'exploration martienne JEKERT.



Landing Site



Par Nulentout : Lundi 16 Juillet 2018.

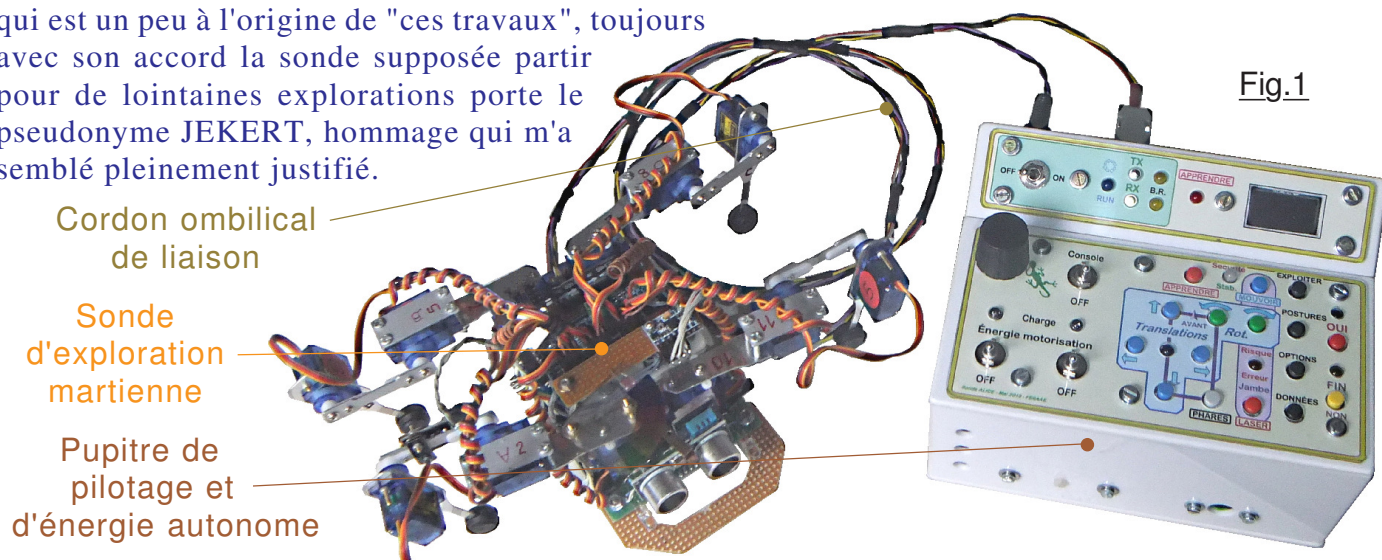


# Construisez une véritable sonde d'exploration martienne

Initialement, le KIT mécanique dont vous pouvez faire l'achat sur le lien (1) me semble prévu pour s'amuser en petite robotique de loisir, à créer puis faire déplacer un petit insecte robotisé à quatre membres. Ce matériel est fourni pour celles et ceux qui n'ont pas les ressources suffisantes pour réaliser les pièces métalliques de ce Mécano. Ensuite, pour ajouter l'électronique, l'informatique, l'acheteur est supposé capable de se débrouiller. (Vous trouvez également sur le site la possibilité d'approvisionner les servomoteurs ainsi que la carte Arduino NANO qui équipe mon prototype.)

Faire déplacer un insecte sur quatre membres n'est pas élémentaire en soi. Toutefois, considérer cette petite machine comme tel m'a semblé pauvre pour plusieurs raisons. Par exemple le nombre des postures que doit adopter le petit animal est restreint : Se coucher, se lever, avancer, reculer. Contrairement aux humains, l'araignée ne fait pas des pas chassés, ou tourner sur place. Aussi, considérer qu'il s'agit d'une machine qui sera posée sur Mars pour explorer la planète rouge ouvre des horizons sans limite. On peut alors envisager de compléter l'appareil par une batterie d'expériences pseudo-scientifiques. Notre petit robot JEKERT sera donc un explorateur spatial ...

C'est en me promenant sur le site de ROBOT MAKER, que je suis passé par hasard sur le lien (2) et appris l'existence de ce produit mis en ligne pour les débutants. Aussi, avec l'accord de l'auteur qui a ouvert ce dialogue, j'ai proposé l'approche expérimentale d'un développement rigoureux pour lequel chaque décision prise est justifiée. C'est une voie délicate, dont les sept TOMES de didacticiel détaillent toutes les tentatives fructueuses ou écartées qui ont conduit au projet actuel. Ce didacticiel a été rédigé au fur et à mesure des études, sur une période de plus d'une longue année. Globalement, les sept ouvrages totalisent environ 355 pages au format A4 illustrées de plus de 550 images. (Sans compter les plans, les photographies commentées etc.) Comme c'est l'ami JEKERT qui est un peu à l'origine de "ces travaux", toujours avec son accord la sonde supposée partir pour de lointaines explorations porte le pseudonyme JEKERT, hommage qui m'a semblé pleinement justifié.



(1) <http://www.robot-maker.com/shop/23-kit-robot-quadrupede>

(2) <http://www.robot-maker.com/forum/topic/10544-kit-robot-quadrupede-teste-par-jekert/>

Reste que nombreuses et nombreux seront les internautes qui seraient tentés de réaliser la petite machine, mais dont les heures de loisir disponibles sont insuffisantes et totalement inadaptées à suivre ces longues descriptions. Aussi, pourquoi ne pas **se contenter de faire l'impasse totale sur le pourquoi et le comment**, et de n'avoir à consulter que le minimum nécessaire pour créer la petite machine. N'avoir aucune idée de ce qui se passe dans les entrailles mécaniques et logicielles est parfaitement justifié dans le cadre d'une activité purement loisir.

**Aller au plus court, c'est l'objet de ce didacticiel.**

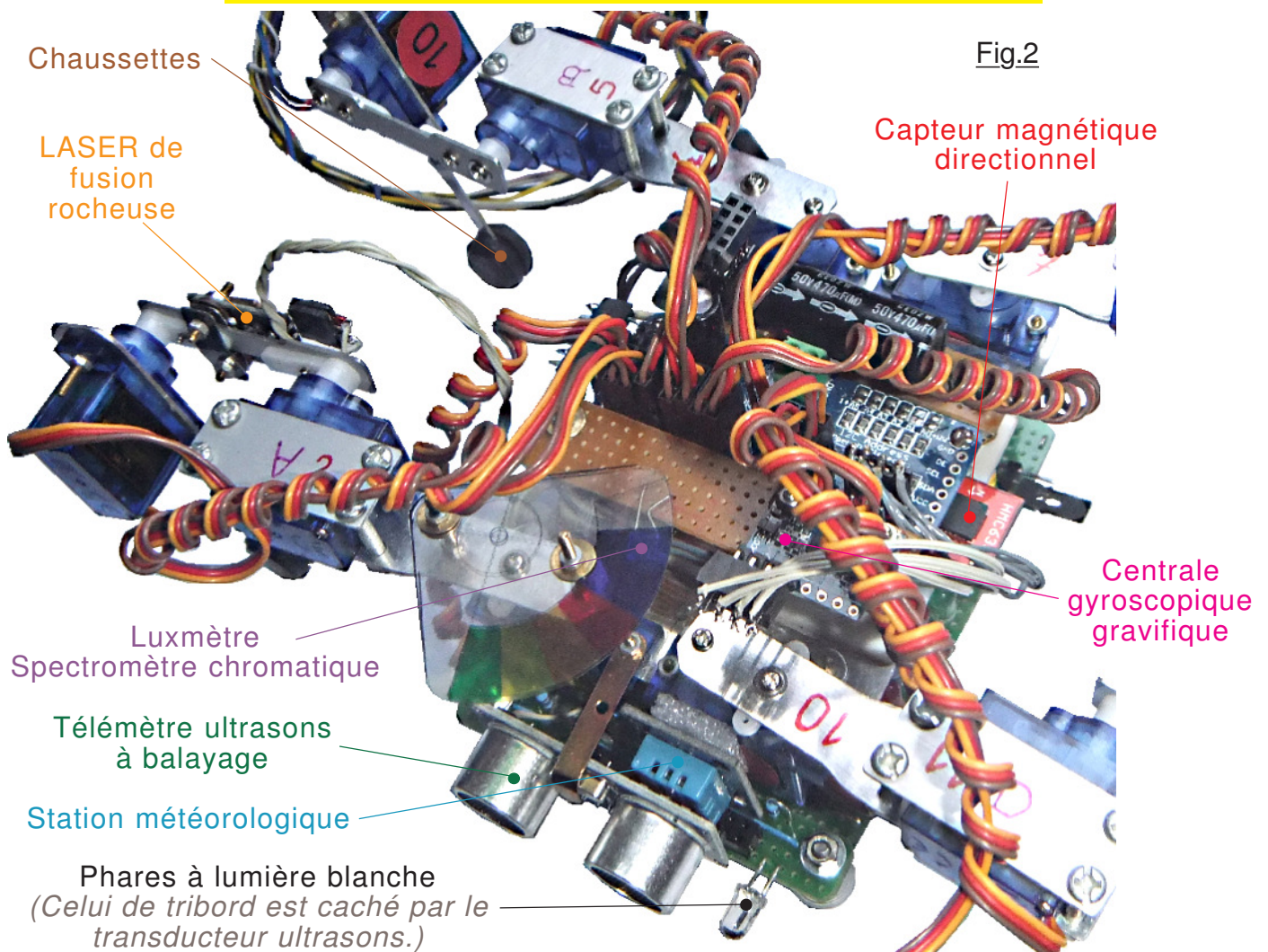
## 01) Présentation de la sonde.

**P**réambule aux divers chapitres qui vont suivre, il me semble impératif de présenter le bébé pour que vous puissiez évaluer la faisabilité de le réaliser avec vos moyens, qu'ils soient techniques ou disponibilité d'un temps de loisir suffisant pour aboutir dans des temps raisonnables. Deux versions sont disponibles. La plus élaborée est visible sur la Fig.1 la sonde étant totalement autonome et pilotée par le truchement d'un pupitre dédié. Il est clair que réaliser le pupitre double globalement le temps à investir. En "version pauvre", on commande le petit animal mécanique à partir d'un P.C. par une ligne USB. Le logiciel installé sur l'ordinateur est le moniteur de l'**IDE**, c'est à dire l'environnement de programmation des cartes Arduino. Notez que la "version pauvre" alimente la petite carte Arduino par la ligne USB, mais il faudra impérativement disposer d'une alimentation secteur pouvant débiter jusqu'à 4A en pointe sous environ 5Vcc à 6Vcc. Le document séparé **Alimentation secteur pour la Motorisation.pdf** décrit une telle source d'alimentation.

**V**ersion "pauvre" ou version de luxe avec pupitre ne sont en réalité différenciées que par le logiciel adapté qui est logé dans la sonde. Dans un premier temps il est tout à fait concevable d'opter pour la "version P.C.", de téléverser le programme spécifique dans JEKERT et d'imprimer les fiches et le manuel concerné. Puis, par la suite si vos loisirs vous permettent de réaliser le pupitre, de changer le programme dans JEKERT et d'imprimer les nouveaux documents d'utilisation. Donc, rien n'est définitivement figé, c'est tout l'avantage d'une technologie informatisée.

Pour se faire plaisir, la Fig.2 détaille le chargement "utile" de la petite exploratrice. Sur cette photographie la sonde est entièrement terminée, notez au passage les "tortillons" des lignes électriques vers les servomoteurs pour que l'ensemble puisse arborer une présentation soignée. Naturellement, toutes ces expériences embarquées seront explicitées dans ce didacticiel.

➤ **Elle est petite ... mais elle a tout d'une grande !**



## 02) Organisation du didacticiel.

Au tant que possible, je vais tenter de dérouler un tutoriel aussi indépendant que possible, pour vous éviter de nombreux vas et viens sur Internet. Toutefois, bien que globalement ce document sera "complet", pour certains détails vous serez obligés d'aller consulter certains chapitres des ouvrages sur ROBOT MAKER. Je vais m'acharner à minimiser ces références externes. Dans ce but, le fichier compressé contiendra l'intégralité des documents et programmes dont vous aurez besoin. Ces derniers sont répartis dans des dossiers de façon à bien séparer les deux versions possibles, chacune étant accompagnée de fiches, de livrets spécifiques etc. Comme des dessins réalisés à l'échelle 1 sont également proposés, la **visionneuse** dont il sera question plus avant est également fournie. Les chapitres consacrés à la réalisation du pupitre supposeront que vous aurez réalisé la sonde. Bien que la "version pauvre" impose de disposer d'une alimentation secteur de puissance, je crois que débiter par cette technologie est prudent. Ainsi, quand la sonde est parfaitement opérationnelle et donne entière satisfaction quand on la pilote avec le P.C, on peut alors s'engager sereinement pour la réalisation du pupitre de commande et d'alimentation autonome. Pour commencer à rêver, la petite fiche donnée ci-dessous permet de nous faire une idée de la "miniaturisation" de JEKERT.

### Fiche signalétique de JEKERT

#### ➤ **Mensurations sonde au repos posée sur le sol.**

- **Envergure** environ 240mm.
- **Longueur** environ 160mm.
- **Hauteur au repos** environ 105mm. ("Tortillons" électriques compris.)

#### ➤ **Encombrement en exploitation.** (Posture "Stable transversal")

- **largeur** environ 210mm.
- **Longueur** environ 150mm.
- **Hauteur** environ 125mm. ("Tortillons" électriques compris.)
- **Configuration hauteur maximale** environ 150mm. ("Tortillons" électriques compris.)

#### ➤ **Fiche de pesée.**

- **Masse à vide : 240g** intégrant :
  - \* Le châssis et les douze moteurs,
  - \* Le bouclier et les quatre boulons longs de liaison,
  - \* La plaque de support du multiplexeur,
  - \* Le multiplexeur,
  - \* Une petite carte Arduino NANO.
- **Circuit imprimé principal : 50g à 60g** comprenant :
  - \* Le circuit imprimé principal et tous ses composants y compris le petit C.I. de complément situé à l'avant,
  - \* La carte Arduino NANO sur le connecteur HE14 ainsi que le carton d'isolement.
- **Circuit imprimé du condensateur de 470µF : 90g** muni du capteur inertiel gyroscopique.
- **Masse totale en charge : 370g** avec tous les capteurs, les quatre chaussettes, ainsi que la charge du cordon ombilical de dialogue série et celui amenant l'énergie aux servomoteurs.

#### ➤ **Bilan énergétique.**

- **Module Arduino 58mA** prenant en compte : (Alimentation du circuit principal en 5Vcc.)
  - \* La carte Arduino avec la LED Moteurs OFF, la LED du répéteur potentiométrique,
  - \* Les phares au maximum d'éclairage,
  - \* Le LASER au maximum de luminosité.

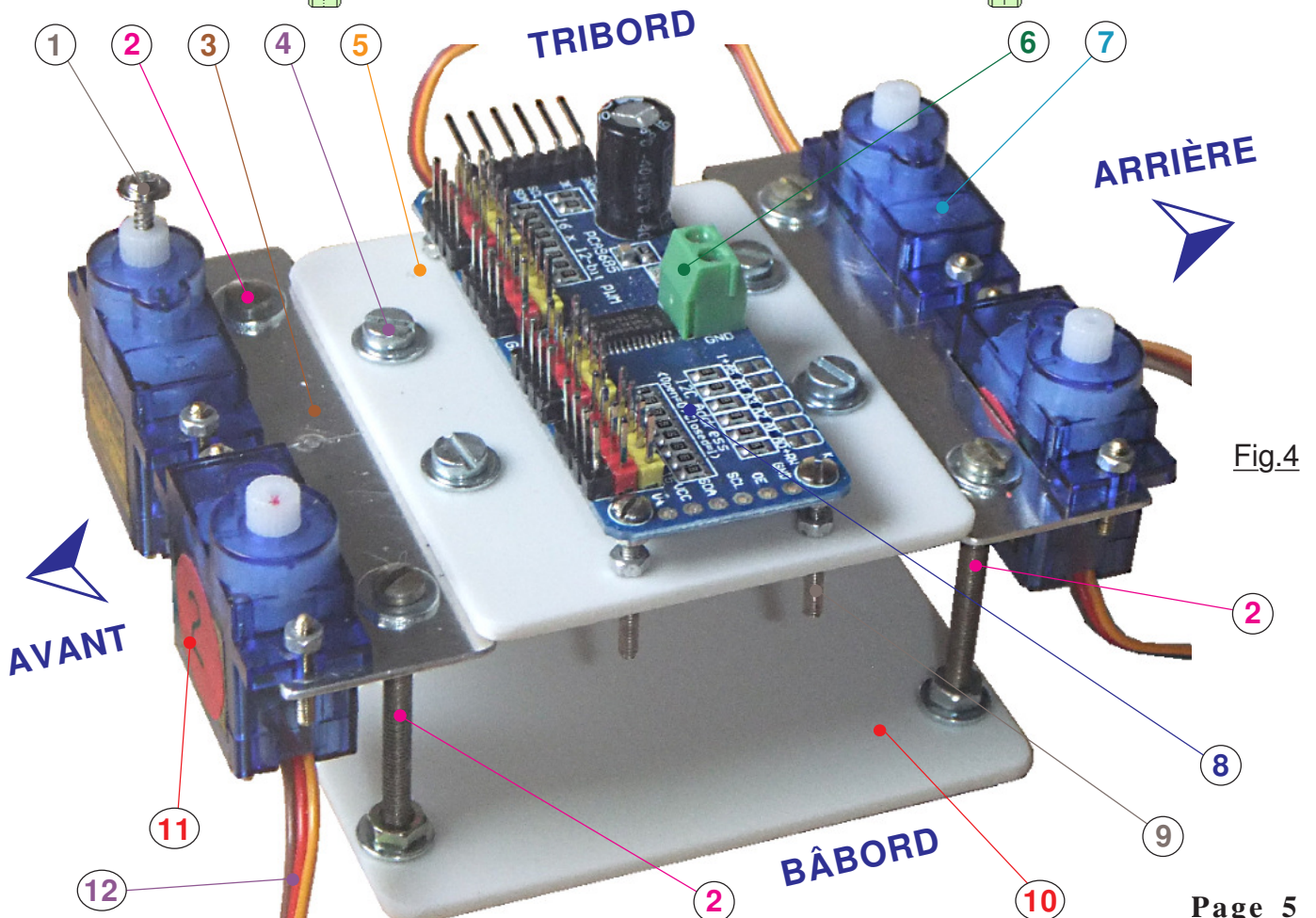
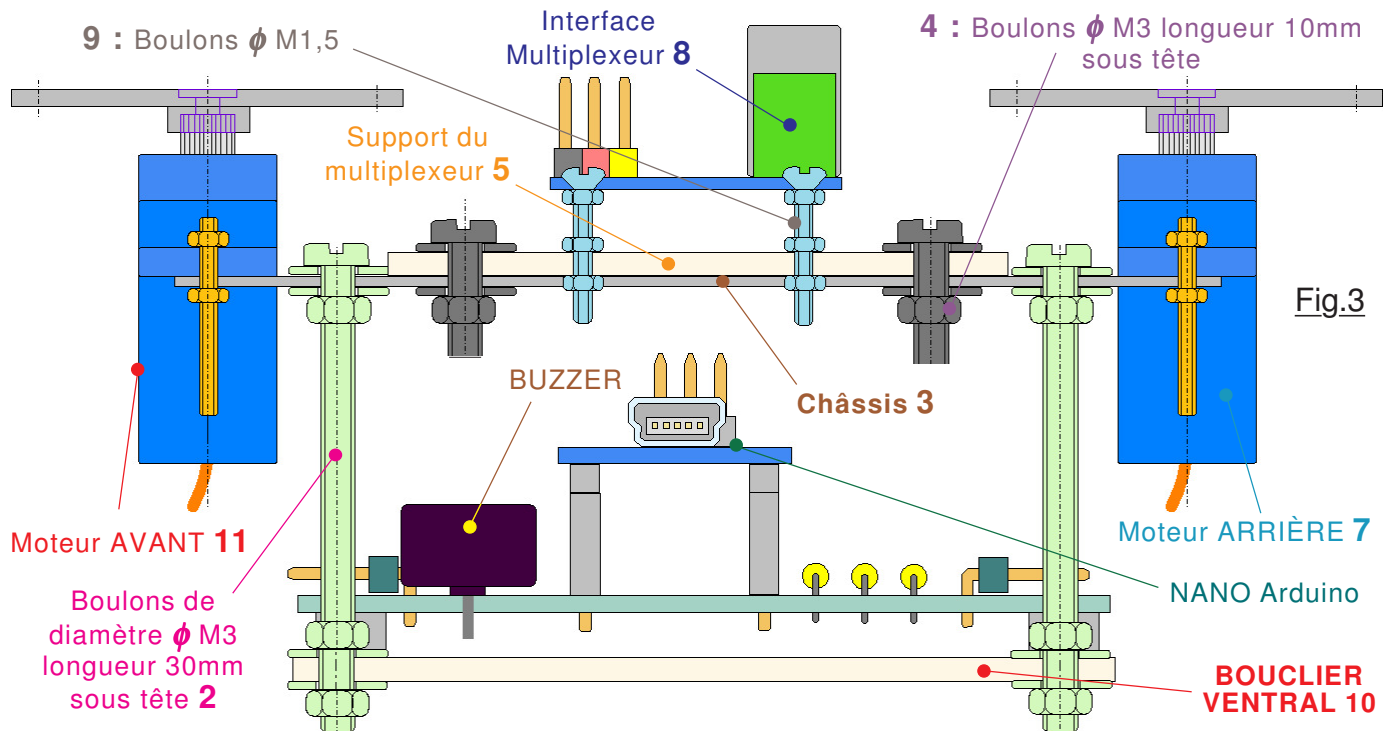
Sans le LASER : 40mA. Sans le LASER et sans les Phares : 30mA.

**Intensité maximale** l'intégralité des consommateurs étant alimentée : **80 à 90mA.**



### 03) Structure globale de la sonde martienne.

**T** rève de bavardages, entrons dans le vif du sujet. Vous avez approvisionné le KIT mécanique ainsi que les servomoteurs. La première étape consiste à réaliser la structure constituant le corps du robot. Puis on ajoutera par la suite divers circuits imprimés, les capteurs et autres dispositifs aboutissant à un ensemble viable. Pour comprendre comment est agencée la structure principale de JEKERT nous allons observer le dessin de la Fig.3 et surtout la Fig.4 sur laquelle ne sont pas encore installés les circuits imprimés de complément et les capteurs. Seul le module "multiplexeur" qui gère les servomoteurs est fixé sur le support. Plus tard il sera immobilisé plus haut sur le châssis pour

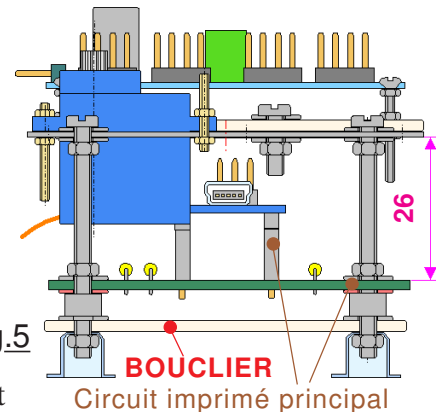


pouvoir placer sous ce dernier le capteur magnétique qui assure la fonction de compas de route. Le "multiplexeur" est un petit module spécialisé du commerce qui peut gérer jusqu'à 16 servomoteurs différents tout en n'étant piloté par le microcontrôleur que sur deux lignes spécialisées.

### ➤ Les éléments principaux de la sonde : Structure et motorisation.

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 laissé la vis de liaison du palonnier avec le Fémur. Les boulons  $\phi$  M3 en **4** assurent la liaison entre la plaque **5** et le châssis **3**. La plaque **5** sert à supporter le multiplexeur **8**, mais également deux autres petits circuits imprimés et le capteur magnétique. On reconnaît en **6** un bornier "sérieux" qui sera réuni à une alimentation de puissance par des conducteurs de sections suffisantes. Le moteur de Hanche **7** doit avoir sa semelle sur le dessus et son arbre de sortie vers l'extérieur. En **9** les vis  $\phi$  M1,5 n'ont pour le moment pas été raccourcies, car le logement de la boussole sous **8** imposera de surélever un peu plus le circuit imprimé. 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. *(La traçabilité consiste à numérotter chaque moteur. Puis ses caractéristiques individuelles sont consignées dans un tableau pour pouvoir affiner les paramétrages dans le logiciel qui anime le petit robot.)*

Contrairement à ce que montre le dessin de la Fig.3 qui représente le circuit imprimé principal assemblé sur le bouclier par des entretoises grises, la solution définitive s'est orientée vers un circuit ayant des dimensions proches de celles de **10** avec une immobilisation par des écrous sur **2**. *(Les quatre entretoises sont conservées.)* Le dessin de la Fig.5 sur lequel la sonde est vue de devant illustre ce propos. On le retrouve sur la Fiche n°20 qui accompagne ce didacticiel.



**NOTE :** Ce tutoriel est accompagné de **Fiches** auxquelles le texte fera régulièrement référence. Certaines sont purement informationnelles. Elles constituent des résumés de documents techniques relatifs à des composants ou des modules du commerce. Il vous sera ainsi plus commode d'établir un lien entre les schémas électriques, les dessins, et les informations qui conduisent à ces agencements. Par exemple la **Fiche n°1** résume la mise en œuvre électrique des servomoteurs SG90. Naturellement, ces documents de complément ne sont pas forcément à imprimer, généralement il suffira de les consulter et de passer à la suite du didacticiel. C'est à vous de voir. En revanche, des fiches d'utilisation de la sonde telles que celles relatives aux protocoles de maîtrise de JEKERT doivent se trouver à portée de la main. Leur petit format pousse à les imprimer et en faire "des petits cartons" aussi indispensables qu'un manuel d'exploitation.

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 côté de la séparation, c'est à dire celui que l'on vient de découper. *(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. Enfin, il reste possible si vous possédez une telle machine thermique devenue banale, de plastifier les fiches ainsi réalisées.

**<Galerie d'Images>** : Ce tutoriel est également illustré par un dossier contenant un grand nombre de photographies commentées. Il n'y a que le minimum vital pour évaluer l'agencement de la sonde. N'hésitez-pas à aller consulter la kyrielle de photographies fournies avec les divers TOMES sur le site <http://www.robot-maker.com/shop/23-kit-robot-quadrupede>. Rapides à consulter elles seront une aide précieuse. le contenu de **<Galerie d'Images>** n'est en réalité qu'un échantillonnage de ces images renumérotées pour coller au texte du tutoriel.

L'assemblage complet suppose que tous les circuits imprimés électroniques soient réalisés, et en particulier le plus important qui supporte la carte NANO Arduino. Pour comprendre aisément l'agencement des divers circuits à ajouter, il importe au préalable d'avoir une idée précise de tout ce qu'ils devront intégrer. Dans ce but nous allons passer en revue les diverses expériences embarquées car on se doute qu'elles mobilisent des ressources électroniques.



#### 04) Le LASER de désintégration rocheuse.

**R**assurez-vous, c'est de la frime ! Le LASER utilisé ne percera pas les murs de votre maison ni ceux des voisins. On va installer sur JEKERT un petit module du commerce dédié au pointage visuel. Puissance dérisoire. Ce dispositif est supposé constituer le matériel embarqué sur Curiosity qui est capable de faire fondre de la roche pour en effectuer une analyse spectrométrique. Ici l'effet sera purement visuel. Le petit module immobilisé sur le **Tibia** de la **Jambe A** pour pouvoir le pointer horizontalement et verticalement est décrit dans la **Fiche n°1**. En observant la **Fiche n°6** on constate que la sortie binaire **D6** du microcontrôleur pilote directement ce composant qui sera soumis à l'intensité maximale de 22mA soit une puissance consommée de 0,11W. Pas de quoi prévenir le ministre des armées ! Et encore, compte tenu du rendement lumineux de ce composant la puissance rayonnée dans le spectre rouge rubis ne dépassera pas les 5mW.

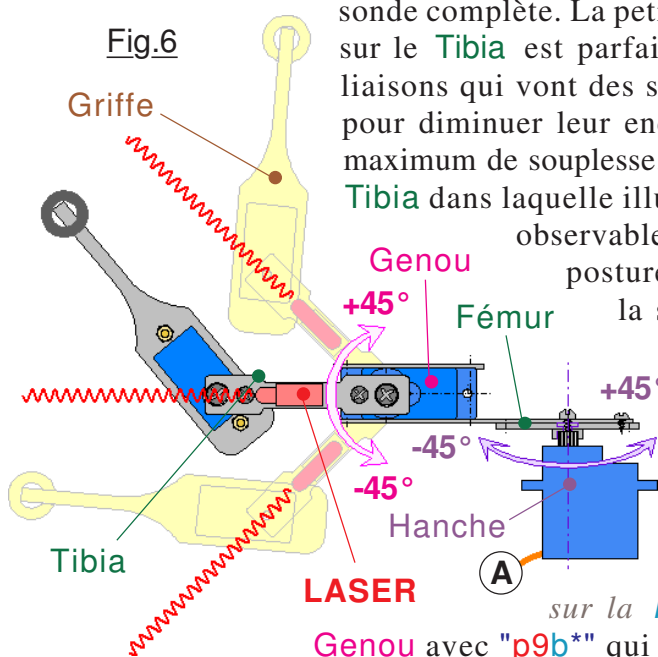
Aucun danger pour l'environnement ... **SAUF POUR LES YEUX** des personnes ou des animaux présents dans le local. **Donc les protocoles d'exploitation sont élaborés pour écarter au maximum ce type d'incident.** (Risque pour la vue dérisoire dans les annonces commerciales, mais pour tout ce qui concerne la sécurité il importe de se monter intraitable voir paranoïaque.)

**⚠ DANGER :** Tout dispositif lumineux intégrant un composant de type LASER ou assimilé est potentiellement dangereux pour l'œil humain ou animal. Les diodes "MASER" appartiennent à cette catégorie de composants. **NE JAMAIS LES REGARDER DIRECTEMENT OU EN DIRIGER LE FAISCEAU LUMINEUX VERS UNE PERSONNE OU UN ANIMAL.** Sans que ce ne soit précisé par les fournisseurs, beaucoup de diodes électroluminescentes à haut rendement lumineux font partie de ces dispositifs. Aussi, lorsqu'une telle diode diffuse un rayonnement "scintillant", adopter impérativement les précautions d'usage relatives à ce type de composant optronique.

**R**emarquons au passage que dans l'affectation des Entrées/Sorties, la ligne relative à la sortie binaire **D6** du microcontrôleur est précédée du symbole  $\approx$ . Ce petit signe précise que la broche concernée peut par programme fonctionner en PWM. (*Impulsions à largeur variable.*) De ce fait il sera possible de piloter ce qui s'y trouve branché en analogique. La puissance lumineuse du LASER sera par programme ajustable à convenance par l'opérateur d'exploitation.

Sur **Image 1.JPG** dans **<Galerie d'Images>** le petit module LASER est bridé sur le **Tibia** de la **Jambe A**. Ainsi on peut le pointer en hauteur et en largeur sans avoir à mobiliser de la mécanique et des moteurs supplémentaires pour le diriger. Il suffit d'ajouter une séquence logicielle pour cette application dans le programme d'animation de la sonde. La "Chaussette" mentionnée sur l'image n'est qu'un simple "passe fil" en caoutchouc collé avec la colle Araldite sur l'extrémité de la **Griffe**. On améliore ainsi l'adhérence avec le sol. L'**Image 2.JPG** en vue plongeante présente la sonde complète. La petite bride métallique qui immobilise le module LASER sur le **Tibia** est parfaitement visible. On voit également que les diverses liaisons qui vont des servomoteurs au "multiplexeur" ont été "tournicotées" pour diminuer leur encombrement dans l'espace tout en leur octroyant un maximum de souplesse. La **Griffe A** est levée pour dégager la direction du **Tibia** dans laquelle illumine le canon à photons. Enfin, sur la vue de dessus observable sur **Image 3.JPG** nous avons l'ensemble dans la posture d'exploitation du LASER. Dans cette configuration la sonde ne porte que sur les **Jambes B, C et D** la **A** étant relevée pour dégager la ligne de tir.

Lorsque tous les moteurs sont ramenés au **Neutre opérationnel** avec l'instruction "**p15\***", les **Tibias** sont horizontaux. La Fig.6 présente cette posture particulière. Avec "**p9a\***" le servomoteur de la **Hanche A** fait tourner le **Fémur** de  $-45^\circ$  à  $+45^\circ$  par rapport au centrage du SG90. (Voir les codes sur la **Fiche n°15**.) Verticalement il suffit de piloter le **Genou** avec "**p9b\***" qui peut cabrer ou piquer jusqu'à  $\pm 45^\circ$ .



## 05) Les phares à gradateur numérique.

**É**lever ces deux diodes électroluminescentes au statut d'expérience scientifique confine scandaleusement à de la publicité mensongère. Tout au plus, avec un bon avocat, on pourra plaider que cet éclairage sert à évaluer la transparence de l'atmosphère pour que les techniciens de maîtrise puissent prédire l'arrivée d'une tempête de sable et protéger par anticipation JEKERT en la plaçant en configuration VEILLE. Les deux LEDs blanches situées à l'avant de la sonde éclairent à notre guise s'il fait noir dans le local. Un petit regard sur la [Fiche n°6](#) et l'on constate que pilotées par la sortie binaire **D5**, à pleine puissance elles ne consomment que 7mA au total. Autant dire que l'électronique ne va pas chauffer. C'est le rendement étonnant des composants actuels qui autorise une telle performance, car avec 35mW de puissance consommée, l'éclairage qui en résulte est assez surprenant. Commandé en PWM il sera possible par logiciel de graduer l'intensité lumineuse à notre convenance. (*D5 est sélectionnée car également de type ≈.*)

**C**onsidérant à son tour la [Fiche n°7](#), on constate que les deux diodes électroluminescentes dépassent notablement du circuit imprimé principal. Elles sont de ce fait en situation vulnérable. Lorsque vous allez manipuler JEKERT et procéder à des essais, en particulier avec la motorisation active, un grand nombre d'incidents vont engendrer un basculement du robot sur le nez. À chaque fois les LEDs des phares se tordent ce qui ne présage rien de bon pour leur pérennité. Pour les protéger de tels incidents fréquents lors du développement, on se contente comme montré sur la Fig.7 d'ajouter un **Pare-chocs** immobilisé sur le petit circuit imprimé de complément par les deux boulons  $\phi$  M3 de liaison de ce dernier sur le circuit imprimé principal. Ajouré en son centre, cette petite pièce mécanique est taillée pour le prototype dans un morceau de circuit imprimé. Notons au passage que pour faciliter l'étude des dessins des circuits imprimés en relation directe avec le schéma électronique, les [Fiche n°6](#) à [Fiche n°8](#) sont conçues pour une lecture simultanée. Par exemple on peut mettre en vis à vis la [Fiche n°6](#) avec la [Fiche n°7](#) pour comparer le schéma au dessin du circuit imprimé. De la même façon, approcher la [Fiche n°7](#) avec la [Fiche n°8](#) permet d'observer les deux faces de cette plaque électronique principale.

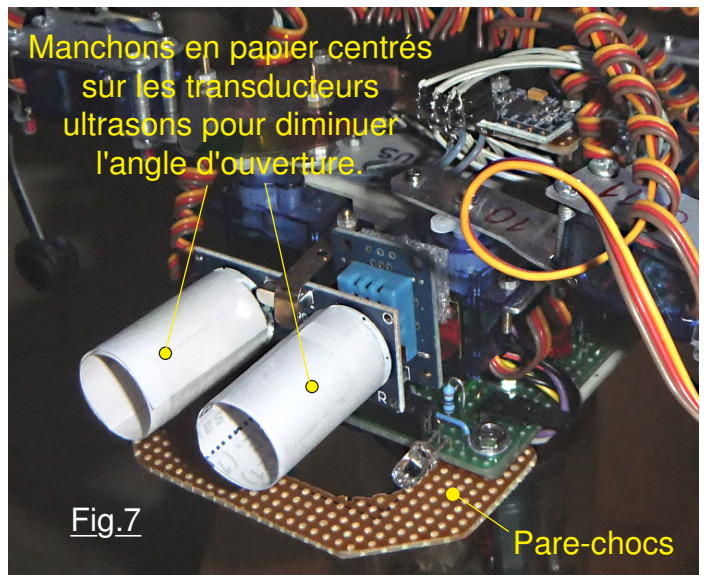


Fig.7

## 06) Le spectromètre chromatique.

**S**congreneueu balivernique, avec un tel dispositif on se propulse au sommet de la technologie du futur, nom d'une sonde martienne ! Pour frimer tu sors ça à ta réunion ministérielle et tout le monde te vote les crédits que tu voulais pour le projet JEKERT ! En effet, sous ce nom technologico-scientifique se cache un composant ultra compliqué assorti à un schéma d'utilisation démentiel. La Fig.8 dévoile l'électronique ultra secrète que seuls les électroniciens les plus avertis peuvent comprendre. Un simple diviseur de tension constitué d'une résistance fixe de  $1k\Omega$  et du capteur **S** sensible à la lumière constitué d'une **photorésistance** soumet la tension **U** à l'entrée analogique **A6**. Ce type de composant montré sur la Fig.9 est disponible à profusion sur Internet à des prix de vente dérisoires. Peu importe ses caractéristiques précises, car dans l'optique d'une approche résolument simple, la sonde se contentera de retourner la valeur numérisée sur l'entrée analogique **A6**. Pour minimiser le code généré par le compilateur, des formules complexes transposant la valeur entière en donnée exprimée dans les unités du système S.I. ont été écartées. Ce type de cellule photoélectrique voit sa résistance électrique diminuer quand la quantité de lumière reçue augmente. Ainsi placée dans la branche **+5Vcc / GND** la tension mesurée **U** variera dans le sens de l'énergie reçue. Quand vous approvisionnez le composant photorésistant, tout modèle **Page 8**

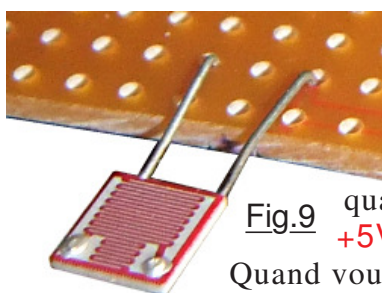


Fig.9

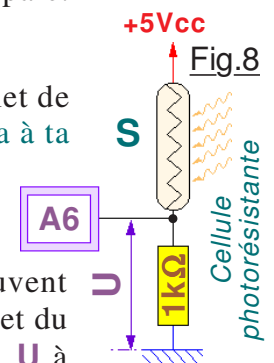


Fig.8

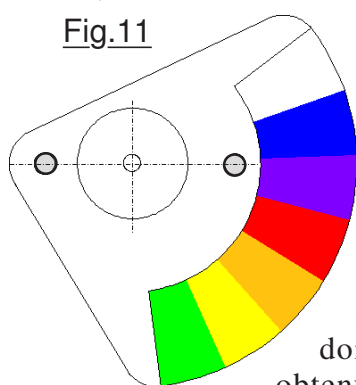
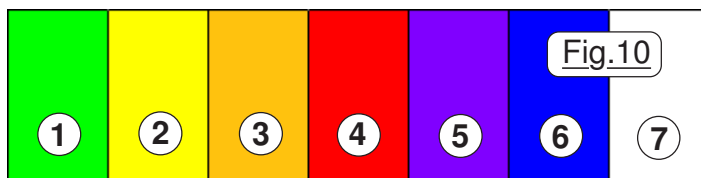


conviendra, qu'il soit rond ou carré peu importe. Ses caractéristiques seront voisines. Certainement qu'au lieu de retourner 652 valeur issue de la cellule du prototype vous obtiendrez 589 ou 698. Peu importe à partir du moment où l'on ne cherche pas précisément à calibrer l'instrument.

Si l'on en restait là, seule la quantité totale de lumière captée par la cellule photorésistante serait évaluée. **Nous allons expérimenter les filtres colorimétriques.** De quoi est-il question ?

Depuis "toujours", les astrophysiciens à l'aide de leurs télescopes exploitent les couleurs pour déterminer des informations cruciales arrivant des étoiles ou les planètes, qu'ils observent avec des dispositifs matériels de plus en plus sophistiqués. L'idée de base consiste à décomposer la lumière reçue pour en "étalement" les couleurs, un peu comme le fait naturellement cette merveille que l'on nomme arc en ciel. L'idée simple consiste à munir JEKERT d'un spectromètre chromatique, c'est à dire un appareil sensé analyser la lumière reçue par la cellule photorésistante et filtrer couleur par couleur la quantité d'énergie lumineuse reçue.

L'instrument réalisé est rudimentaire et n'impose strictement aucun complément électronique aux circuits du robot. Son principe de fonctionnement est basé sur l'usage de filtres colorés qui sont placés devant le capteur photosensible. Chaque filtre ne laisse passer qu'une "tranche" du spectre lumineux. Pour simplifier, nous allons nous contenter de six couleurs comme le montre la Fig.10 qui présente l'ordre dans lequel seront laissées passées les différentes longueurs d'ondes. En 7 le masque sera totalement transparent. Ainsi l'appareil enregistrera six valeurs chromatiques et la quantité totale d'énergie lumineuse reçue par la sonde. Il sera alors possible d'établir des pourcentages énergétiques si on le souhaite. Notez au passage que pour concevoir notre spectromètre, on utilise les quatre couleurs fondamentales en 1, 2, 4 et 6. Ainsi nous n'écartons au point de vue conceptuel ni la soustraction, ni l'addition des teintes. (*Voir éventuellement l'encadré en bas de la page 13 du TOME 3.*) Les deux nuances intermédiaires 3 et 5 sont des "mélanges" établis "à l'estime" avec le logiciel **PAINT.exe**. Pour interposer chaque filtre coloré entre la cellule photorésistante et le ciel, l'idée de base consiste à transformer le modèle de la Fig.10 en un équivalent circulaire. Ce



filtre montré sur la Fig.11 sera immobilisé à la bonne hauteur sur le **Fémur** de la **Jambe A**. Au final, avec un trois fois rien de "mécanique" on anobli la cellule photorésistante qui ne pouvait que mesurer une intensité lumineuse globale en un spectromètre chromatique qui ouvrira une foule d'expériences à la fois simples et très formatrices. Sur **Image 3.JPG** la cellule photorésistante n'est pas visible car masquée par le filtre coloré. En **Image 4.JPG** elle se trouve sous le secteur coloré du jaune. Consultez la **Fiche n°9**. Pour créer le filtre de couleurs il faut l'imprimer sur des feuilles de milard transparentes. ATTENTION, chaque imprimante doit utiliser des feuilles qui lui sont dédiées. Quand on regarde le résultat obtenu, les couleurs jaune et orange semblent trop pâles. Aussi, sur le prototype

j'ai découpé avec soin deux secteurs colorés. Ils sont immobilisés "parfaitement" l'un au dessus de l'autre. (*C'est peu visible sur la photographie mais bien réel.*)

- En toute rigueur deux secteurs colorés sont suffisant pour équiper la sonde.
- La **Fiche n°9** en propose douze ... **gaspillage !**

Pas forcément. L'opération de découpage de cet élément n'est pas immédiate et les risques de loupés sont bien réels. Avec tous les éléments imprimés vous arriverez forcément à en façonner deux de parfaits. L'argument le plus pertinent à mon sens concerne les copains. Perdre une feuille A4 complète pour deux secteurs imprimés serait incontestablement un gaspillage patent. Les divers secteurs non utilisés seront particulièrement appréciés par les copains. Je suggérerais fortement de vous grouper. L'un d'entre vous se chargerait de l'achat du support, et de l'impression sur son ordinateur. Les autres participeraient financièrement. Ainsi vous arriveriez à un coût raisonnable pour le petit bout de transparent coloré. (*Ne demandez quand même pas au copain de découper les filtres !*)

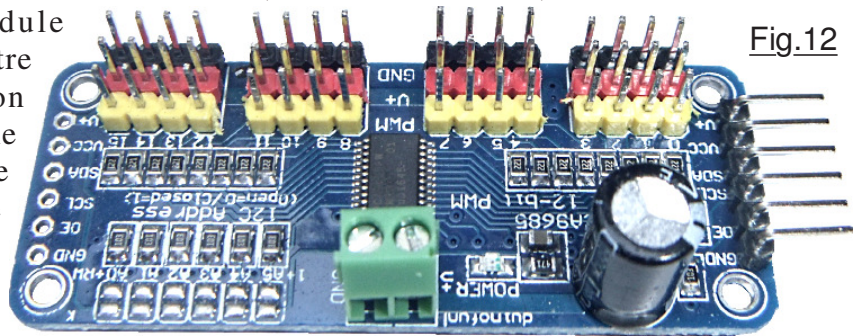
Reprenant la technique d'orientation du LASER, c'est encore la **Jambe A** qui est sollicitée. On optimise ainsi le logiciel car la posture stable sur trois jambes est réutilisée. Le programme se contente alors de positionner avec précision les sept secteurs du filtre au dessus de la cellule et d'enregistrer pour chacune la valeur numérisée sur **A6**. Par ces choix nous avons optimisé le matériel et le logiciel pour aboutir à une solution très économique.

## 07) Le bus de communication I2C et les bibliothèques Arduino.

**B**ien que relevant d'une technologie que vous désirez intensément ignorer, il me semble pourtant indispensable d'ouvrir une petite parenthèse technique. Rassurez-vous, ce sera vraiment minimaliste. 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 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*. Si vous consultez la [Fiche n°1](#) vous constaterez que le pilotage d'un servomoteur de type SG90 n'est pas spécialement élémentaire. Le module électronique nous affranchit d'avoir à générer en permanence les seize signaux à 50Hz, avec des rapports cycliques correspondant à la position désirée pour chaque moteur. Du reste on peut aussi sur l'une quelconque des sorties commander en analogique aussi bien une résistance chauffante qu'une LED par exemple. Du reste c'est ce que l'on fait sur les sorties **S12 à S15**. (Voir la [Fiche n°3](#).)

Particulièrement compact, Le module

PCA9685 présenté sur la Fig.12 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. **Pour commander un moteur individuel, il faut préciser au PCA9685 lequel est concerné, et dans quelle orientation angulaire on désire le voir se positionner.** La consigne est envoyée sous



forme de signaux compatibles avec l'utilisation d'un bus de commande au standard I2C.

**I**ncontournable dans des secteurs industriels tels que la domotique, le pilotage de procès sur des lignes de fabrication, en robotique, *le standard I2C regroupe une normalisation matérielle et logicielle qui autorise le pilotage de plusieurs périphériques sur une ligne commune constituée de deux fils pour le dialogue entre les divers éléments et une ligne de masse GND commune*. La [Fiche n°5](#) précise les caractéristiques de base du standard industriel I2C. Comme chaque périphérique branché sur le bus I2C doit pouvoir être sélectionné, il est distingué par une adresse qui lui est propre, c'est à dire une valeur numérique qui lui est réservée. Ainsi le dialogue entre les divers acteurs sera parfaitement orchestré. On se doute bien que programmer des échanges d'information sur une ligne I2C avec des protocoles spécifiques à chaque périphérique constitue une opération assez complexe et pourrait imposer des heures de développement.

*Pour rendre très facile la programmation des produits commerciaux*, quel que soit leur complexité, les fournisseurs de cartes électroniques associent des séquences de programmes dédiées à un microcontrôleur cible. Arduino n'échappe pas à cette règle, les modules logiciels sont fournis sous forme de *bibliothèques*. Par exemple pour émuler la ligne I2C sur la carte Arduino NANO nous allons incorporer au programme la "library" **Wire.h** comme précisé sur la [Fiche n°5](#).

**T**out aussi simplement, commander le circuit PCA9685 très complexe va consister à utiliser quelques *Méthodes* de la bibliothèque **Adafruit\_PWMServoDriver.h** qui accompagne le module "multiplexeur". On peut constater sur la [Fiche n°4](#) qu'avec seulement cinq instructions élémentaires pour le langage C++ d'Arduino on peut dominer facilement la programmation des divers servomoteurs SG90 qui équipent JEKERT. Quelle simplicité !

Puisque nous en sommes à la gestion de la motorisation, autant aborder ici l'un des problèmes principaux posé par cette dernière. Bien que minuscules en taille, les petits servomoteurs SG90 sont particulièrement nerveux. Vous serez étonnés de la rapidité avec laquelle ils réagissent. Cette performance s'accompagne de transitoires d'intensité virulents quand on pilote plusieurs de ces moteurs simultanément. Les appels de courant sont tellement intenses qu'*il est totalement interdit d'utiliser la ligne 5Vcc qui alimente les microcontrôleurs pour fournir l'énergie à la motorisation*. Comme le précise la [Fiche n°3](#) il faudra impérativement employer deux sources d'énergie : L'une à faible débit pour alimenter les cartes Arduino, (Par exemple la ligne USB de téléversement des programme et de dialogue avec le Moniteur.) l'autre "bien musclée" pour pouvoir fournir des pointes de courant de l'ordre de 5A à tous ces petits moteurs très nerveux. Une telle source d'énergie sera décrite plus avant. Nous en savons assez pour poursuivre l'étude des expériences scientifiques.



## 08) Le compas magnétique de route.

Consultons la [Fiche n°10](#) qui décrit le tout petit module magnétique qui sera ajouté sur le bus I2C de la sonde et qui va fonctionner en esclave. Basée sur l'effet Hall, la "puce électronique" contient matériellement deux périphériques indépendants pouvant dialoguer sur le bus I2C avec pour adresses respectives [42HEX](#) et [43HEX](#). Chaque entité mesure séparément la valeur du champ magnétique dans une orientation cartésienne. Puis un module de calcul interne combine les deux valeurs pour déterminer l'orientation des "lignes de force" pour les traduire sous forme d'un CAP. La Fig.13 présente une copie d'écran vidéo quand on a envoyé à JEKERT la commande "o\*" qui retourne l'orientation magnétique du petit robot. Initialement pour appréhender ce petit module, la bibliothèque spécialisée [hmc6352.h](#) avait été intégrée dans le programme d'évaluation. Mais son utilisation actuelle sur la sonde n'en a plus besoin, il faut juste inclure les routines de gestion de la ligne I2C c'est à dire [Wire.h](#) qui de toute façon est dès le début indispensable pour dialoguer avec le multiplexeur PCA9685.

Fig.13

```
o* >
Orientation : 215°
!PGM o OK!
o* >
Orientation : 200°
!PGM o OK!
```

### ➤ **Conflits d'adressages sur une ligne I2C.**

Interroger une personne pour dialoguer quand on est en présence d'une classe, implique de désigner de façon univoque celle à laquelle on s'adresse. Par exemple l'institutrice qui sollicite l'une de ses gamines par : "*Alice tu veux bien venir au tableau s'il te plait*" va avoir la surprise de constater que cinq de ses fillettes se lèvent pour obtempérer. Nous sommes en présence d'un conflit d'adressage verbal. Quand une "séquence Maître" sollicite un périphérique sur la ligne commune I2C, elle précise en premier l'adresse, puis la nature de la réaction attendue. Si deux entités ont une adresse identique, elles vont répondre simultanément et les données vont mutuellement polluer leur accusé de réception par le phénomène Dominant/Récessif. Le Maître recevra alors du "bruit binaire incompréhensible". Aussi, **il est IMPÉRATIF** de s'assurer *que tous les modules branchés en parallèle sur une ligne I2C soient conditionnés matériellement à des adresses physiques différentes.*

Considérons la Fig.14 qui représente l'assemblage électronique actuel quand on branche simultanément le multiplexeur de motorisation PCA9685 et la petite boussole HMC6352.

Il n'a pas été nécessaire d'ajouter des résistances "Pull Up" au module PCA9685 pour forcer le niveau haut +5Vcc. Généralement les fournisseurs de modules prêts à l'emploi intègrent tout ce qu'il faut sur leur circuit imprimé pour que l'utilisateur n'ait strictement rien d'autre à ajouter dans son application. Dans ce but, le module PCA9685 dispose de résistances de 10kΩ entre le +5Vcc et les deux lignes SDA et SCL. En sortie d'usine, l'adresse pour le multiplexeur est [40HEX](#). La boussole étant nativement sur [42HEX](#) et sur [43HEX](#) les trois périphériques sont bien distingués et peuvent cohabiter sans problème sans que nous n'ayons rien à faire de particulier.

L'[Image 5.JPG](#) et l'[Image 6.JPG](#) présentent la façon dont le compas magnétique de route est immobilisé sur la plaque qui sert également à supporter le multiplexeur.

Tout compas magnétique quel qu'il soit est perturbé par les masses métalliques environnantes. Le circuit HMC6352 est particulièrement sensible aux parasites générés par les servomoteurs. Le cap qu'il indiquera ne sera correct que lorsque les moteurs seront au repos. La valeur retournée sera alors stable, mais il n'en reste pas moins vrai qu'elle sera considérablement faussée par l'environnement du petit module. N'oublions pas que les servomoteurs intègrent des aimants permanents pour leurs inducteurs, ces derniers rayonnant joyeusement des champs magnétiques parasites. Pour déduire le CAP magnétique réel (*Qui de toute manière subit une déviation locale par rapport aux orientations géographiques.*) il importe d'établir une fiche de correction. Pour vous donner une idée précise de ce que peut contenir un tel document, la [Fiche n°12](#) présente sous forme d'une *polaire* la courbe de correction de cap valide pour le prototype réalisé.

## 09) Le télémètre à ultrasons.

**P**rendre des décisions pour la suite à donner à l'exploitation d'une sonde aussi éloignée dans le système solaire n'est jamais anodin. Les échanges radio entre la Terre et Mars sont laborieux et prennent un temps considérable. Par ailleurs, évaluer l'éloignement d'un obstacle à partir des images à haute résolution issues d'une caméra embarquées n'est pas évident et toujours imprégné d'une certaine imprécision aléatoire. Hors il faut décider de la trajectoire à imposer. Choisir entre poursuivre sans changer de direction ou orienter différemment le mobile. Si l'on constate que l'on s'est trompé, faire reculer la sonde puis élaborer une autre stratégie va englober des heures. Aussi, pour "rentabiliser" la machine scientifique et le coût des personnels impliqués dans sa gestion, il devient pratiquement indispensable de munir l'explorateur d'un radar. Celui installé sur JEKERT est immobile sur le châssis et orienté en capture dans l'axe vers l'avant du véhicule.

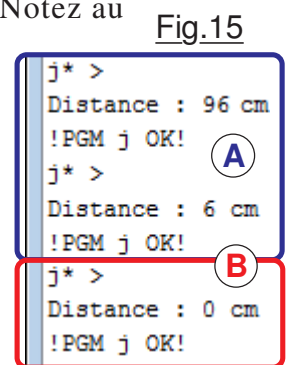
**F**ondamentalement, le principe de fonctionnement d'un radar ou d'un sonar est élémentaire. On projette dans le milieu observé une "pulse" sous forme d'une onde électromagnétique ou sonore. Cette dernière ricoche sur l'obstacle dont on désire déterminer la distance. Le temps **T** mis par l'onde pour parcourir l'aller et le retour est mesuré. La distance **D** à laquelle se trouve l'écho est égale à  $D = V \times T / 2$ , formule dans laquelle **V** est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu traversé. Il faut diviser par deux car avec l'aller et le retour de l'écho l'onde a franchi deux fois l'éloignement. Considérons la [Fiche n°11](#) qui traite du petit module HC-SR04 équipé de deux transducteurs piézo-électriques identiques. Il serait possible de n'utiliser qu'un seul composant ultrasonore, ce qui compliquerait sa mise en œuvre, car un système de commutation rapide devrait effectuer l'aiguillage entre l'oscillateur du transmetteur et l'amplificateur sensible du récepteur. Ce type de composant restant d'un prix d'achat vraiment faible, il devient nettement plus simple et plus économique d'oublier l'électronique d'aiguillage et d'installer deux transducteurs.

C'est **D12** et **D13** qui sont affectées au HC-SR04 qui intègre une logistique électronique et informatique qui en rend la mise en application élémentaire. La [Fiche n°11](#) expose le principe de mesurage qui se fait en deux temps. On déclenche la transmission d'une impulsion acoustique en plaçant un état logique "1" d'au moins 10 µs sur la broche **Trig** pilotée par **D12** qui correspond à une entrée sur le module pour déclencher une mesure. En retour, sur sa sortie **Output** (*Ou écho électronique.*) branchée sur **D13** on mesure l'impulsion fournie dont la durée est proportionnelle à la distance, si le module détecte un objet. Afin de pouvoir calculer la distance exprimée en cm, on utilise la formule de conversion **Distance en cm = (Durée de l'impulsion Echo en µs) / 58** précisée dans les documents de caractéristiques qui accompagnent le module. Notez au passage que le "Ping" sonore émis dans l'atmosphère présente une fréquence de 40kHz. Comme une oreille humaine ne détecte que des sons globalement inférieurs à 18kHz, nous n'entendons pas le signal envoyé par le transducteur. C'est la raison pour laquelle un tel "bruit" est qualifié d'Ultrason.

La commande qui incite la sonde à effectuer la mesure d'une distance d'obstacle **"j\*"** déclenche une mesure ultrasonore vers l'avant de la sonde et retourne la distance d'un éventuel obstacle exprimée en centimètres. La portée maximale est limitée par le logiciel à 2,5m car pour minimiser la taille des variables on a utilisé pour **Distance** un **byte** et pour **Lecture\_Echo** un **int**. Si vous ne disposez pas du module et que le connecteur HE14 est inoccupé, la distance indiquée sera de 0cm. Sur la Fig.15 en **A** le module fonctionne correctement. En **B** il a été enlevé du connecteur.

Donc ceux qui n'ont pas encore reçu leur petit capteur peuvent effectuer tous les essais logiciels qu'ils désirent sans pénalité. Il vous arrivera certainement de diriger le châssis vers un mur lointain et d'avoir en retour des distances du genre 96cm. Ce n'est pas que le module ne fonctionne pas bien. Si vous analysez les caractéristiques du HC-SR04, vous constaterez que l'angle d'ouverture de l'antenne ultrasonore (*Diagramme polaire.*) dépasse les  $\pm 25^\circ$ . Du coup une pulse peut accrocher des échos latéraux sur des obstacles qui semblent visuellement très éloignés. En revanche, placez votre main bien dans l'axe et vous observerez que le dispositif fonctionne parfaitement. Ainsi il est utilisé pour l'anti-collision dans les séquences de protection logicielle avec une fiabilité remarquable. JEKERT ne risque pas de se taper le nez contre un lampadaire !

Jalonnez, jalonnez, il en restera toujours quelque chose. Autrement dit, testez ce radar pour en cerner les comportements, les réactions. Expérimentez des obstacles divers comme une plaque de carton, miroir en verre, matériau absorbant comme du polystyrène expansé, du tissu ...





## 10) Le radar panoramique ultrasonore à balayage.

Bien que le cône d'ouverture du transducteur HC-SR04 soit bien trop évasé pour permettre une analyse fine de la topographie de l'environnement situé à l'avant de la sonde, créer un programme qui se charge d'effectuer un balayage avec enregistrement des échos est tout à fait séduisant au point de vue informatique. Aussi nous allons munir la sonde d'un télémètre à ouverture avec balayage angulaire, enregistrement et visualisation graphique du spectre. Enregistrer un panoramique télémétrique reste assez élémentaire en théorie. La pratique n'est pas très complexe non plus. Il suffit d'exploiter la faculté de "Torsion" de JEKERT et ainsi lui faire adopter une suite d'orientations du châssis apte à "embrasser du regard" l'environnement situé devant la sonde. Par programme on impose une torsion en butée logicielle à droite. Puis le logiciel va imposer l'adoption de 64 orientations intermédiaires pour balayer entièrement la plage du panoramique envisagée. À chaque position le logiciel déclenche une mesure de distance et enregistre le résultat dans la mémoire statique non volatile EEPROM du microcontrôleur. On dispose ainsi d'une sorte de "photographie télémétrique" apte à construire un spectre topographique.

Pourquoi 64 échantillons ? La valeur adoptée résulte d'un compromis. Chaque échantillon ne consomme qu'un octet en EEPROM, il serait tentant d'augmenter la résolution de l'instrument. Toutefois, ce serait illusoire pour deux raisons. Nous avons vu que le transducteur présente un cône de réception qui manque singulièrement de finesse. Par ailleurs, on peut toujours envisager la restitution du spectre sur un écran graphique. Dans cette hypothèse, la valeur de 64 est bien adaptée aux composants du commerce de définitions "standards". Enfin, avec 64 positions intermédiaires, on optimise la "sensibilité" d'orientation angulaire des servomoteurs. C'est la commande sur un caractère "e\*" qui déclenche un balayage télémétrique avec enregistrement topographique.

Visualiser le spectre enregistré se commande avec "w\*", le w faisant référence à "Waveform". (Pour programmer cette fonction, les lettres de l'alphabet étaient pratiquement toutes déjà affectées à d'autres commandes sur un caractère.) Le résultat est présenté sur la Fig.16 sur laquelle en 1 le mesurage est déclenché. Puis en 2 on sollicite la sonde pour qu'elle nous retourne sous forme graphique la "forme" de l'environnement qui a été enregistré. Ces données resteront en EEPROM aussi longtemps qu'un nouvel enregistrement ne sera pas initié avec "e\*". Il sera possible librement et à tout moment de se faire visualiser le panoramique avec "w\*". Ce dernier est montré sous forme graphique sur l'écran du P.C. avec un encadrement vertical 3 et 8 et terminé par l'ACR 9. Les 64 lignes de représentation dépassent largement en hauteur l'écran vidéo, raison pour laquelle sur la Fig.16 le repère 7 symbolise une coupure. Sur le moniteur vidéo il faudra utiliser "l'ascenseur" latéral et la souris pour exploiter verticalement cette image artificielle. Toute image radar peut être polluée par des échos scintillants parasites tels que ceux visibles par exemple en 5 et 6. C'est la raison pour laquelle, s'il s'agissait d'un système technique élaboré, il faudrait inclure dans le programme d'exploitation des techniques de filtrage pour éliminer les "échos fantômes". Sur JEKERT un tel développement logiciel ne se justifie pas, trop consommateur d'octets de programme. On se contentera donc d'une informatique simplifiée. Si ces deux fonctions sont très séduisantes pour enrichir notablement les performances opérationnelles de la petite machine robotisée, il ne faut toutefois pas en attendre des miracles. N'espérez pas retrouver sur le graphe le beau visage de votre compagne ou compagnon. L'angle d'ouverture des transducteurs est bien trop "flou" pour en faire un portraitiste de renommée mondiale !

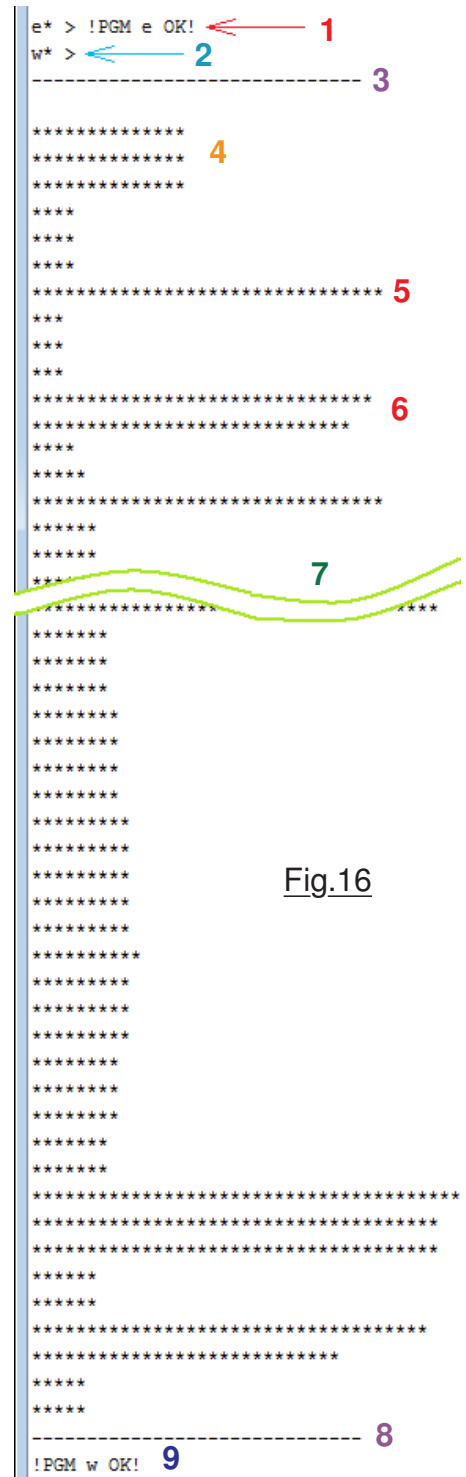


Fig.16

## 11) La petite station météorologique.

Incontournable sur un explorateur réel pour tenir compte de l'environnement et parer l'arrivée des tempêtes, mesurer les facteurs atmosphériques constituent pour toutes les sondes d'exploration des missions fondamentales ... à condition toutefois que l'astre visité possède une atmosphère ! Déterminer la composition moléculaire, la présence d'eau, la température constituent les fondamentaux de tout géophysicien consacrant sa carrière à ce que l'on nomme l'espace. La petite station météorologique installée sur JEKERT est élémentaire. Elle ne comporte qu'un petit module ajouté au luxmètre. Bien que simplissime elle n'en mesure pas moins et avec une précision raisonnable deux données primordiales dans l'air ambiant de la petite machine : La température et surtout l'hygrométrie. D'une banalité manifeste, vraiment très facile à se procurer dans le commerce en ligne pour des broutilles, le petit module utilisé DHT11 fait l'objet de la [Fiche n°12](#). On peut y observer que le module DHT11 ne mobilise qu'une seule broche binaire **D11** qui sera employée à la fois en entrée binaire et en sortie binaire.

Basés sur des phénomènes physiques complexes, les capteurs d'humidité exigent des traitements informatiques délicats pour traduire les mesures effectuées en valeur d'humidité relative par rapport à la saturation théorique de l'atmosphère terrestre. Représentant un marché de loisir considérable, les petites stations météorologiques domestiques ont envahi les chaumières. Aussi, pour gagner des parts de marché, les fournisseurs de capteurs spécifiques ont muni leurs produits d'une informatique locale les rendant presque simples à les mettre en service. Les bibliothèques spécialisées ont fait le reste. L'intégralité du traitement gérant le DHT11 se résume à peu de lignes de code source. Le code objet qui en résulte consomme 556 octets, affichages des valeurs comprises. Notons au passage que pour son fonctionnement interne ce type de capteur doit aussi mesurer la valeur de la température atmosphérique, car le taux de saturation en dépend. Aussi, le fabricant de ce circuit a ajouté un peu de logiciel à son composant. Outre l'humidité, le module fournit aussi la valeur de la température, et l'on fait ainsi d'une pierre deux coups. La Fig.17 représente une copie d'écran du moniteur vidéo quand la commande "m\*" est envoyée à la sonde. On observe qu'avec cette consigne, la sonde retourne également la valeur de la luminosité totale fournie par le luxmètre. Comme la transparence de l'atmosphère permet de prédire les tempêtes de sable, ce paramètre est considéré comme une donnée météorologique. *(Sans compter le fait que l'on économise au passage un code de consigne car toutes les lettres de l'alphabet sont utilisées.)*

m\* >  
Luxmetre : 241  
Humidite : 66%  
Temperature : 20°C  
!PGM m OK!

Fig.17

Le gros du travail informatique est contenu dans la bibliothèque **DHT11.h** qui rend dérisoire la mise en œuvre de ce composant. Cette "library" devra donc être déclarée dans l'**IDE** pour pouvoir compiler le programme lorsque l'on provoque le téléversement de ce dernier dans l'ATmega328. Le logiciel peut générer un **BIP** d'alerte sonore et un message d'erreur n°16 ou n°17 si un incident de dialogue est détecté entre le microcontrôleur et le capteur. Par exemple **"!ERR 16!"** si le petit module est en panne ou non présent sur la ligne **D11**.

## 12) Les principes de la NAVIGATION INERTIELLE.

Impossible de saisir l'aspect fabuleux de la centrale gyroscopique intégrée dans les systèmes de JEKERT et la prouesse technologique réalisée avec le MPU60-50 sans avoir une notion élémentaire relative au chapitre incontournable de la navigation inertielle. Comme vous désirez éviter tout encombrement théorique dans ce didacticiel, on va dans ce chapitre ne faire qu'effleurer à peine le sujet. Une sacré récompense nous attend à l'arrivée, en faisant un petit détour vers les machines mythiques qui ont permis, pour la toute première fois à l'humanité, de poser le pied sur la Lune.

***Naviguer, c'est l'action de déterminer en permanence où l'on se trouve, et s'orienter pour continuer à cheminer dans la bonne direction.*** Sur Terre c'est relativement facile, car l'on se contente de suivre des routes qui sont jalonnées de repères précis pour nous aider tout le long du voyage afin de nous situer. En automobile ce sont les panneaux indicateurs. En aviation ce sont des balises radio. *(Remplacées actuellement par le système GPS)* Quelle que soit la technologie utilisée, on constate dans ces systèmes de navigation que l'on se trouve tributaire d'installations au sol ou de satellites en orbite. Mais il existe des cas où l'on se trouve totalement isolé de toute assistance extérieure. Par exemple un sous-marin nucléaire pour des raisons de discrétion, une fusée car un téléguidage radar ne serait pas assez rapide pour réagir en temps réel, enfin, pour le cas qui nous



occupe, la sonde JEKERT doit pouvoir naviguer en autarcie. Dans tous ces exemples, *l'autonomie totale réside dans l'inertie*.

### ➤ La navigation inertielle.

**Q**uelle que soit la situation d'un mobile, il sera soumis où qu'il se trouve dans l'Univers à l'inertie, phénomène totalement général et omniprésent. *L'inertie, c'est le refus que présente tout objet à voir son mouvement se modifier*. Pour changer la vitesse d'un corps quel qu'il soit, il faut forcer sur ce dernier. Réciproquement, si on force sur un objet il accélère dans la direction de

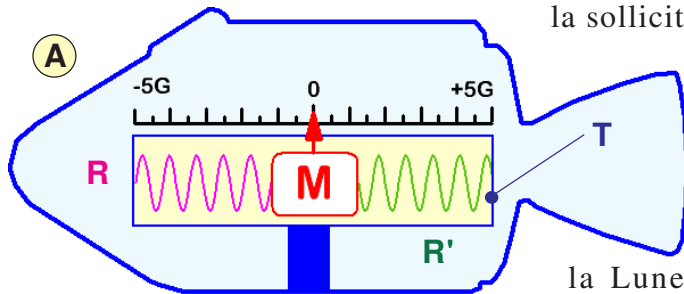
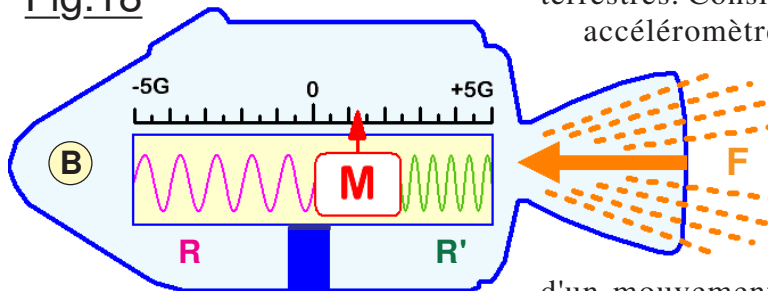


Fig.18



la sollicitation. L'idée fondamentale consiste donc à utiliser le phénomène d'inertie pour mesurer l'accélération subie par notre mobile. Pour illustrer ce propos, nous allons considérer le cas du vaisseau CSM Apollo qui à l'époque des vols lunaires habités devait se "débrouiller" seul quand il était isolé dans l'immensité du vide sidéral, ou caché derrière

la Lune sans aucun secours possible des installations terrestres. Considérons la Fig.18 A qui montre le principe d'un

accéléromètre. Une masse inerte **M** est centrée dans un guide tubulaire **T** au moyen des deux ressorts **R** et **R'**. Allumons comme montré sur la Fig.18 B le moteur orbital, le vaisseau subit une poussée **F** et accélère vers l'avant. Le tube **T** accélère, mais la masse **M** par inertie présente une tendance naturelle à continuer d'un mouvement uniforme. Elle "refuse" cette accélération.

Le ressort **R'** se tasse, poussé par **T**. À son tour il force sur **M** jusqu'à ce qu'il exerce sur cette dernière une action suffisante. Du coup la masse **M** accélère et suit alors le vaisseau dans son mouvement, avec un petit retard dû au tassement de **R'**. Le ressort **R** pour son compte se détend un peu, mais il ne sera vraiment utile que pour des accélérations dans l'autre sens, quand le vaisseau accélérera à reculons avec les moteurs de manœuvre. Si nous avons soudé une flèche sur **M**, et qu'elle se déplace devant des graduations, il sera alors facile de lire directement la valeur de l'accélération, qu'elle soit vers l'avant ou vers l'arrière. Nous avons décortiqué ici le principe de fonctionnement de tout accéléromètre.

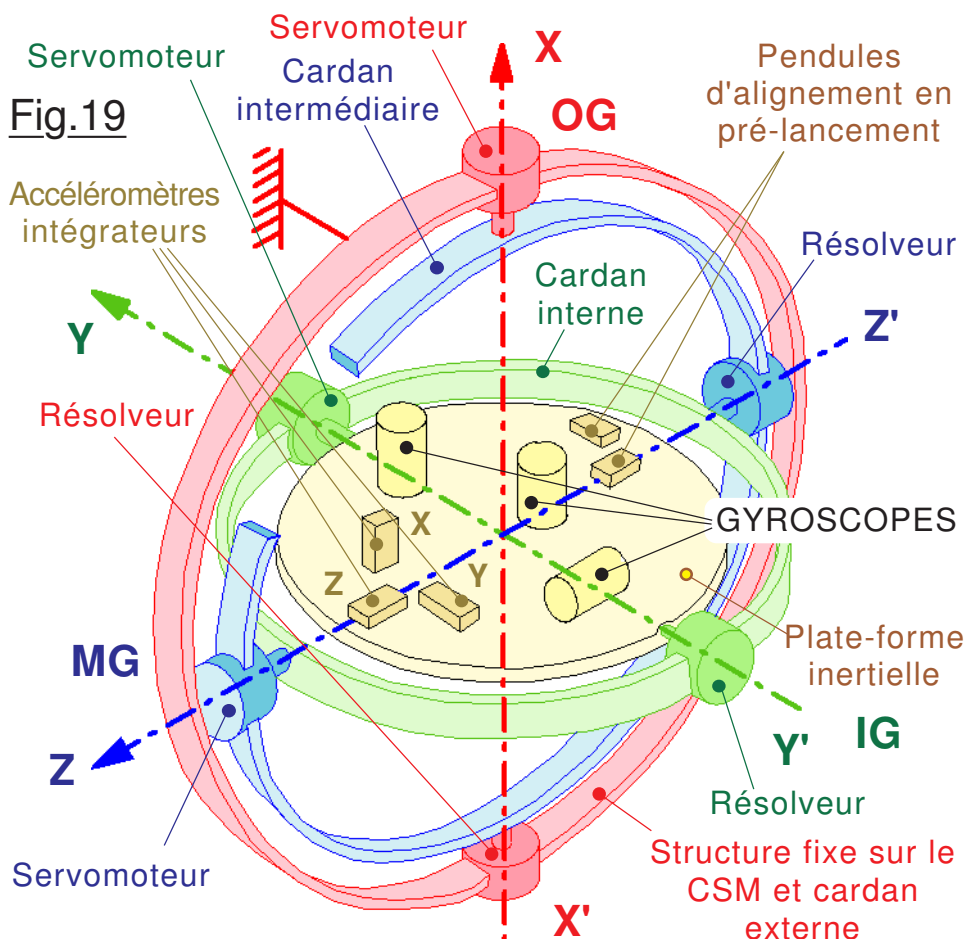
### ➤ La centrale inertielle d'Apollo.

**T**raiter de la navigation inertielle exigerait un livre plus gros qu'une encyclopédie tellement le sujet est complexe, tant au point de vue théorique que technique. Totalement hors sujet dans ce didacticiel, nous allons juste "regarder" l'intérieur de la machinerie de navigation du CSM.

La clef de voûte du système est constituée par la **plate-forme inertielle** connue sous le signe IMU. (*Inertial Measurement Unit*) Le cœur d'une centrale à inertie est constitué comme montré sur la Fig.19 d'une **Plate-forme inertielle** sur laquelle sont liés trois **Accéléromètres intégrateurs** cartésiens. (*Orientés à angle droit les uns par rapport aux autres pour former un repère trirectangle*) Cette "table inertielle" est articulée sur trois joints de cardans **X'X**, **Y'Y** et **Z'Z** pour pouvoir s'orienter librement dans toutes les directions par rapport à la structure du vaisseau. Sur la **Plate-forme inertielle** sont également liés trois Gyroscopes (*Mécaniques à l'époque d'Apollo*) eux même articulés "à la **Cardan**" pour pouvoir s'orienter librement dans l'espace. Des chaînes d'asservissement utilisant des **Résolveurs** commandent des **Servomoteurs** sur chaque axe. Les signaux issus des gyroscopes sont utilisés pour assujettir les servomoteurs de façon à ce que la cage (*Plate-forme*) conserve au cours du temps une orientation constante par rapport à l'univers. **Les trois accélérations sont prises en compte par des calculateurs ultrarapides pour en déduire les vitesses et les déplacements**. Nous disposons alors de l'orientation dans l'espace, et de la position actuelle du vaisseau par rapport à celle de départ quand la centrale inertielle a été initialisée.

**C**ette technologie qui relève de mécanismes d'horlogerie particulièrement précis était enfermée dans un boîtier antichoc, étanche et thermostaté. Il fallait pratiquement une heure pour qu'elle soit pleinement opérationnelle. Comme tout ce qui est mécanique, quelles que soient les précautions prises, il y a inexorablement des frottements "partout" où des pièces glissent les

unes sur les autres. Par exemple les balais qui font transiter "l'électricité" vers des électroniques qui



peuvent se mouvoir sur plusieurs tours, du glissement parasite dans les roulements des pivots etc.

Conséquence de ces incontournables, la centrale inertielle dérivait lentement, et il était impératif de la recalibrer.

Dans ce but, à bord du vaisseau était disponible un télescope pour pointer des étoiles à partir desquelles le calculateur de bord réinitialisait les données.

*C'est pour apprécier à sa juste valeur les avancées technologiques phénoménales, que j'ai trouvé acceptable, d'encombrer avec deux pages "historiques" le cours linéaire de notre tutoriel.*

### 13) Une centrale gyroscopique sur JEKERT.

C'est probablement le module électronique le plus fabuleux intégré à la petite machine, qui lui alloue une performance technique presque magique. Missiles balistiques, vaisseaux Apollo lors des missions lunaires, les avions de ligne actuels, les sous-marins nucléaires, tous sont équipés de centrales inertielles qui leur permettent une autonomie totale pour effectuer leur navigation. Alors pouvoir équiper le petit robot d'un tel dispositif relève presque de la science fiction ... et pourtant ! Pour exactement 2,1• port compris, on peut s'offrir le summum de la technologie actuelle dont les caractéristiques de base sont proposées dans la [Fiche n°13](#) et la [Fiche n°14](#). Cerise sur le gâteau, il ne sera pas obligatoire d'aller consacrer cinq à six années d'études pointues au MIT pour pouvoir mettre en service ce fabuleux module. Avec la bibliothèque fournie, c'est pratiquement élémentaire.

Chapitre sur la boussole, nous avons apporté la preuve que trois périphériques étaient capables de cohabiter sur le réseau I2C. Avec le module MPU-6050 nous allons conforter cette certitude en y rajoutant une couche. En effet, c'est à l'adresse **68HEX** que réside le circuit intégré qui inclut un calculateur ultra rapide. Nous avons de la chance, car cette adresse n'interfère avec aucune des trois autres habitations de la rue I2C. Donc la compatibilité est assurée. Par la suite nous utiliserons le vocable **centrale gyroscopique**. C'est volontairement que je n'utilise pas dans ces lignes l'expression de **centrale inertielle**, car bien que le circuit comporte effectivement des accéléromètres et peut en fournir les valeurs, nous n'exploiterons dans cette application qu'une partie de toutes les informations numériques disponibles. (*Simplification du logiciel oblige.*)

#### ➤ Mise en service du capteur gravitationnel.

Nous adopterons pour les branchements électriques le schéma minimal indiqué en Fig.1 sur la [Fiche n°13](#). Vous pouvez constater en observant l'agencement du petit module que l'on retrouve certains aspects déjà découverts pour la boussole HMC6352 comme par exemple son fonctionnement interne en 3,3Vcc. Les deux broches **SDA** et **SCL** ne vont pas directement sur le bus I2C, des résistances de **1kΩ** sont intercalées pour sécurité. En standard Arduino ce sont les broches **A4** et **A5** de l'ATmega328 qui sont affectées au dialogue sur le réseau I2C. Lorsque le logiciel démarre, il vérifie la présence du module gyroscopique. Si ce dernier ne



répond pas à l'appel, le double message d'erreur de la Fig.20 est envoyé en réponse assorti d'un BIP d'alerte sonore. Si le module inertiel est détecté, l'affichage sur le moniteur série de l'IDE étale une ligne de données correspondant à une première série de mesures effectuées automatiquement suivi de l'invitation à envoyer des commandes ">>>". (Voir la Fig.21) Lors de ce premier mesurage la référence en LACET est

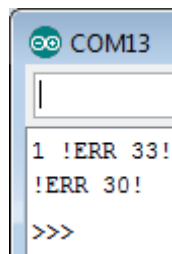


Fig.20

```
COM13
|g*
Tangage = -2, Roulis = -2, Lacet = +0 Calage Gyro = 0 Ecart = 0
>>>
g* > !PGM g OK!
Tangage = -1, Roulis = -2, Lacet = -1 Calage Gyro = 0 Ecart = 1
g* > !PGM g OK!
Tangage = -0, Roulis = -2, Lacet = -2 Calage Gyro = 0 Ecart = 2
g* > !PGM g OK!
Tangage = -0, Roulis = -2, Lacet = -3 Calage Gyro = 0 Ecart = 3
g* > !PGM g OK!
Tangage = -0, Roulis = -3, Lacet = -4 Calage Gyro = 0 Ecart = 4
g* > !PGM g OK!
Tangage = -0, Roulis = -3, Lacet = -5 Calage Gyro = 0 Ecart = 5
g* > !PGM g OK!
Tangage = -1, Roulis = -2, Lacet = -6 Calage Gyro = 0 Ecart = 6
g* > !PGM g OK!
Tangage = -2, Roulis = -2, Lacet = -6 Calage Gyro = 0 Ecart = 6
g* > !PGM g OK!
```

Fig.21

enregistrée, c'est à dire la valeur initiale qui est forcée à zéro dans l'unité de calcul intégrée. La donnée **Calage Gyro** contiendra la valeur mesurée du LACET chaque fois que l'on provoquera un **ReCalage** du **Gyroscope** virtuel. Toute commande "g\*" impose de réaliser un mesurage de la gravitation et de renvoyer les composantes angulaire du vecteur poids. Interpréter cette donnée n'est pas immédiat. Sur la **Fiche n°14** en Fig.2 sont montrés les axes classiques de repérage en référence au mobile qui emporte une telle centrale gyroscopique.

En particulier le repère cartésien **XYZ** est normalisé et les sens de rotation autour de ces directions trirectangles respectent la convention d'un repère dit de sens direct. **ATTENTION : Les angles d'inclinaison retournés par la centrale ne seront corrects que si le repère de référence est correctement orienté par rapport au mobile.** Il faudra vérifier que sur le module électronique que vous avez approvisionné, la minuscule "puce électronique" soit soudée avec la même orientation que celle sur le circuit imprimé du prototype. Si ce n'est pas le cas ROULIS et LACET voir TANGAGE seront permutés et les sens de rotation ne seront pas conformes à la théorie. Il vous suffira dans ce cas d'immobiliser votre module avec l'orientation correcte par rapport au châssis.

**R**ien ne permet à un accéléromètre de faire la différence entre un changement de vitesse du vaisseau dans lequel il se trouve, et le poids éventuel subit par tout corps quel qu'il soit situé dans un champ gravitationnel généré par l'astre à proximité duquel il se trouve. La pesanteur terrestre (Ou martienne dans l'hypothèse de la

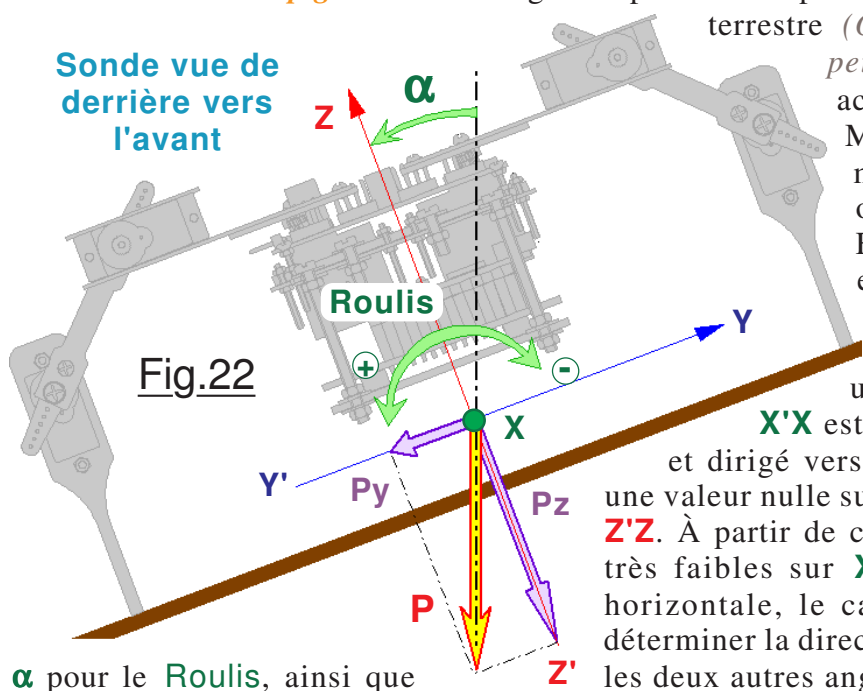


Fig.22

$\alpha$  pour le **Roulis**, ainsi que

est interprétée comme une accélération par les capteurs du circuit MPU-6050. Pour comprendre un peu mieux ce qu'affiche le moniteur vidéo, on va se placer derrière la sonde sur la Fig.22 et supposer qu'en tangage elle est parfaitement horizontale. Le sol sur lequel elle se trouve est donc un plan incliné sur lequel elle est penchée uniquement en roulis. L'axe de **Roulis** **X'X** est vu en "bout". Le poids **P** est vertical et dirigé vers le bas. Les accéléromètres détectent une valeur nulle sur **X'X**, une valeur **Py** sur **Y'Y** et **Pz** sur **Z'Z**. À partir de ces **composantes** algébriques qui sont très faibles sur **X'X** et **Y'Y** si la sonde est presque horizontale, le calculateur intégré au MPU-6050 va déterminer la direction du vecteur **P** et déterminer l'angle les deux autres angles pour le **Lacet** et le

**Tangage.** Ce sont ces angles qui sont affichés par le logiciel. Supposons maintenant que l'on prenne le petit robot en main et que l'on modifie son assiette un peu dans toutes les attitudes et tous les sens. Outre le changement de direction du vecteur poids **P** le calculateur interne au minuscule circuit intégré va prendre en compte les variations des accélérations angulaires et déterminer ainsi les angles balayés. C'est en brassant mathématiquement toutes ces informations que la petite merveille électronique nous retourne les valeurs déduites pour les trois angles qui caractérisent l'attitude actuelle adoptée par la sonde.

➤ **Perfectionnement du capteur gravitationnel.**

**C**ontrairement au "monstre de technologie" décrit sur la Fig.19 le MPU-6050 totalement statique ne comporte aucun élément mécanique. De ce fait tous les inconvénients issus du frottement sont radicalement éliminés. Ce n'est pas pour autant que cette technologie soit exempte de faiblesses. Observez à nouveau la Fig.21 qui représente une copie d'écran. Par la commande "**g\***" répétée assez rapidement au moment du démarrage de l'IMU, on constate, mis en évidence par la couleur jaune, que la valeur calculée pour le **Lacet** dérive de façon "notable" pendant les quelques premières secondes. Plusieurs facteurs engendrent ce comportement. En particulier le substrat électronique monte en température ce qui influence la sensibilité des capteurs. De plus, si la sonde est pratiquement horizontale, les composantes **Px** et **Py** sont vraiment très faibles. Hors ce sont ces deux projections qui permettent de déterminer le **Lacet** à partir du vecteur **P**. Il est donc assez logique de constater ce type de divergence. En revanche, quand l'équilibre thermique est atteint, les rotations sont détectées avec une précision étonnante. (*On ne s'en rend pas trop compte car le logiciel arrondi l'affichage et ne donne aucune décimale.*) Quand on désirera maintenir la sonde sur un CAP précis, après avoir **Recalé le Gyroscope** de **Lacet** nous aurons à notre disposition un conservateur de CAP absolument fabuleux. Reste que, même si cette technologie était parfaite, de toute façon les valeurs fournies changeraient au cours du temps, sonde au repos sur son bouclier. *N'oublions pas que la Terre tourne par rapport à l'Univers, et la centrale enregistre cette rotation.*

➤ **Utiliser le module MPU60-50.**

**P**our faciliter les expérimentations, si vous allumez les phares avec la commande "**a\***", vous armez une option de listage gyroscopique en continu. Dans ce cas, dès que vous allez frapper "**g\***", l'écran vidéo va lister en permanence les trois angles d'attitude de la sonde. Orientez à votre guise, cabrez, piquez, tournez en CAP etc. Bref, manipulez librement et observez les valeurs affichées pour bien cerner ce que retourne le petit insecte robotisé. Vous pouvez à tout moment **Recaler le Gyroscope** avec la commande "**f\***" qui active l'initialisation quand la LED moteurs OFF est allumée. Vous aurez rapidement compris qu'il faut réitérer "**f\***" et éteindre la LED pour ne pas avoir à l'écran un écart calculé nul en permanence.

Le petit module électronique MPU-6050 est immobilisé par deux minuscules boulons  $\phi$  M2 sur le circuit imprimé sur lequel est soudée la cellule photorésistante. Il est supporté par des petites entretoises isolantes. On voit bien sur la Fig.23 que l'on n'utilise que quatre broches pour le connecter électriquement au reste de l'électronique embarquée. Sur cette photographie la fiche HE14 femelle qui permet le raccordement n'est pas insérée à sa place car elle masque trop le petit module. Juste derrière on peut voir les nombreuses fiches qui sur le multiplexeur vont aux divers servomoteurs.

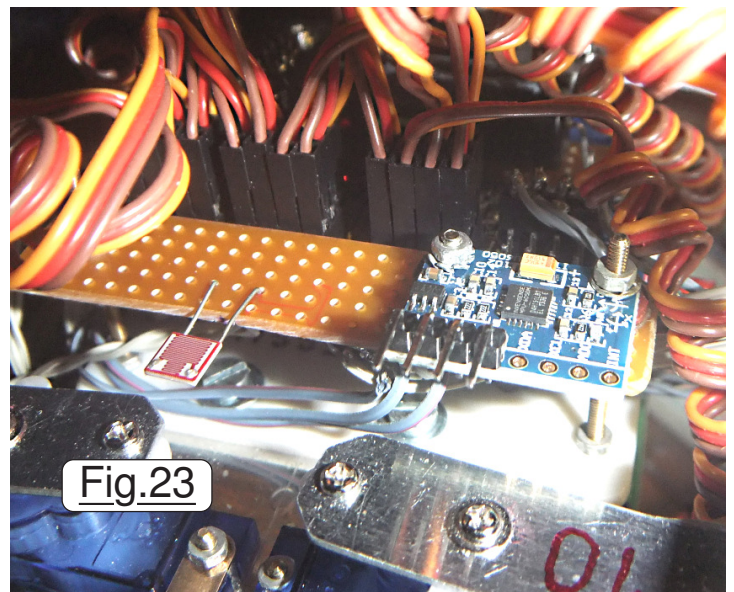


Fig.23

Tout ce petit monde est bien tassé, peu de place est perdue. En termes de densité, avec JEKERT on approche la limite de ce que l'on peut faire tout en évitant de trop galérer.

Avant de passer à la réalisation des divers modules électroniques qui seront intégrés sur JEKERT nous allons ouvrir une petite parenthèse relative à la commande analogique par le truchement d'un potentiomètre. *C'est une particularité de la version "pauvre" pilotée par le P.C.*



**NOTE :** Comme ce didacticiel vise au plus court, les diverses façons de se déplacer pour JEKERT ne seront pas examinées dans ce document, pas plus que la répétition des mouvements de base avec des commandes spécifiques. Pour tout ce qui concerne les déplacements de la sonde, les postures qu'elle devra adopter ainsi que les commandes affectées, consulter le **TOME 2** soit directement en ligne sur <http://www.robot-maker.com/ouvrages/00-2/> soit en téléchargeant les documents sur le lien qui est disponible sur la ligne **TOME 2 : Les fichiers du TOME 2 sont ici.**

#### 14) S'orienter avec précision : Les mouvements de TORSION.

Pouvoir orienter l'axe longitudinal en finesse est indispensable en exploitation pour satisfaire les exigences de certaines expériences embarquées. Nous pouvons vérifier que la technologie globale n'est pas apte à satisfaire cet impératif *avec les deux mouvements de base Tourner à droite et Tourner à gauche*. Aussi, il est prévu la faculté pour JEKERT de changer subtilement de posture par mouvement de torsion en LACET, la configuration initiale étant en standard la géométrie du **Stable Transversal**. C'est la commande à un seul caractère "t\*" qui active ce mode de **pilotage en manuel avec le potentiomètre**. Ce composant permettra également d'ajuster la puissance sur PHARES et LASER. La Torsion ressemble à la rotation. Pour tourner, on changeait la position des **Hanches**, donc des contacts avec le sol. Puis on faisait tourner les moteurs dans un sens contraire à bâbord et à tribord. Pour effectuer une torsion, on procède par une technique réciproque. On ne modifie pas les contacts au sol, on se contente de faire tourner les **Hanches** dans des sens contraires de chaque côté. C'est en manœuvrant le potentiomètre que l'on provoque la déviation. Durant ce mode d'exploitation la valeur de la tension potentiométrique est mesurée puis transposée pour que la course totale du bouton rotatif engendre une torsion d'environ  $\pm 13^\circ$  de part et d'autre de l'axe longitudinal du châssis. L'orientation peut se voir ainsi finement ajustée.

Théoriquement, quand on utilise une entrée analogique câblée comme sur la Fig.24 on devrait obtenir en U sur A0 une différence de potentiel avec GND qui varie entre 0 et +5Vcc, la tension d'alimentation théorique de l'ATmega328. Cette variation appliquée sur le Convertisseur Analogique/Numérique CAN devrait logiquement engendrer une plage de valeurs variant entre 0 et 1023. La pratique est un peu différente. Technologiquement, **Pot.** ne retournera pas exactement les tensions U attendues. La piste conductrice dont la résistance varie au cours de la rotation du curseur de contact n'est pas idéale. Et l'on observe une variation qui ressemble à [+0.12v à +4.94v]. La numérisation CAN sera alors comprise entre des limites de l'ordre de [4 à 1000]. Si l'on désire utiliser la pleine plage de variation sans se voir tributaire du composant que nous avons inséré dans le montage électrique, il importe de corriger les limites. Dans ce but, deux directives sont prévues en tête de programme :

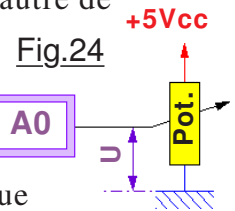


Fig.24

```
#define CAN_Inf 4 // Valeur minimale retournée par le CAN du potentiomètre.
#define CAN_Sup 1000 // Valeur maximale retournée par le CAN du potentiomètre.
```

Comme il y a d'autres corrections logicielles possibles à effectuer dans le programme définitif, ces ajustements virtuels sont regroupés en tête du listage source. Vous les trouverez facilement car les lignes qui les contiennent sont terminées par des commentaires visuels repérables sans hésitation de type : `//@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@`

"L'exploitation sur le terrain" montre que parfois il serait souhaitable de neutraliser le potentiomètre, c'est à dire d'imposer comme valeur de CAN la moitié de la valeur théorique. ( $1023 / 2 \approx 511$ )

La commande qui impose de prendre en compte une valeur moyenne "n\*" permettra de forcer un éclairage moyen sur les phares, un centrage d'orientation des moteurs, une puissance moyenne d'énergie sur le LASER etc. (On adopte 'n' pour signifier **Neutraliser**.)

#### 15) Apprendre à apprendre.

Fixer définitivement le logiciel d'exploitation d'une sonde spatiale n'est pas une option en astronautique. Ne sachant jamais ce que découvrira le vaisseau au cours de ses explorations, il faut pouvoir à convenance modifier le comportement du robot par de l'apprentissage sous forme de nouveaux programmes qui seront transmis depuis la Terre et logés dans de la mémoire permanente prévue à cet effet sur le calculateur de bord. JEKERT peut satisfaire cet impératif.

Cette *aptitudes à l'apprentissage* impose que le programme qui anime la machine soit capable de :

- "d\*" : Débuter un apprentissage, (*Et naturellement suspendre ce mode.*)
- "x\*" : Lister le programme actuellement mémorisé, (*Il faut le vérifier avant de s'en servir.*)
- "u\*" : Utiliser le programme actuellement sauvegardé en mémoire non volatile.
- "y\*" : Effacer un programme devenu caduque qui encombre la mémoire.

Philosophiquement, doter JEKERT d'une faculté à apprendre est fort séduisant. Il serait toutefois hors propos d'imaginer concevoir un éditeur sophistiqué associé à un compilateur ultra performant. Nous allons aborder ce thème en douceur, *aussi, pour l'apprentissage* sur la version "économique", *nous allons simplifier au maximum*. Écologiquement ce n'est pas l'idéal, toutefois je crois indispensable d'imprimer les *Fiche n° 15* à *Fiche n° 17*, dont les deux dernières présentent les divers protocoles qui seront utilisés pour exploiter la sonde quand elle sera à son poste et débutera sa mission. On observe que pour activer le mode pilotage manuel des moteurs on utilise une commande programme "p9m\*", alors que pour le désactiver on se contente d'une instruction à un seul caractère "k\*". Cette différence dans les genres ressemble à un manque de cohérence. Nous sommes obligés d'employer une commande du type programme car il faut la compléter par le caractère 'm' qui précise le moteur concerné. Pour annuler ce mode, une commande à un seul caractère est suffisante. La lettre 'k' est choisie car elle était disponible et suggère le mot KILL pour en faciliter la mémorisation. Je vous suggère chaque fois que vous allez activer un quelconque apprentissage ou un effacement dans l'EEPROM, de lister le contenu de cette dernière avant et après pour cerner avec précision les effets "binaires" obtenus ou qui en résultent. Pensez à la commande "b\*" qui imposera l'affichage en Hexadécimal, plus facile à interpréter pour ce type de pages d'écran.

Enfin, notez qu'une EEPROM qui n'a jamais été programmée ne contient que des \$FF. Si vous utiliser "p20\*" comme commande vous obtiendrez des -1 pour toutes les consignes, car les octets sont considérés comme des entiers. Il se trouve que \$FFFF est la représentation binaire de la valeur -1 pour un *int*, d'où ces données étranges au premier regard. Dès que vous aurez sauvegardé au moins une fois une posture, les affichages issus de la commande "p20\*" seront plus vraisemblables. Nous avons passé en revue les diverses expériences scientifiques qui seront intégrées sur JEKERT. Nous avons une idée globale de la façon dont elle est gérée. Il nous reste à concrétiser l'électronique pour donner vie à la sonde. Avant de réaliser les divers circuits intégrés nécessaires, il nous faut étudier quelques détails électroniques.

## 16) *Quelques détails techniques.*

Consulter un minimum le schéma électronique Fig.1 de la *Fiche n°6* me semble impératif pour pouvoir établir un lien sommaire entre ce qui doit équiper la sonde, les circuits imprimés qui concrétisent le matériel ainsi que le câblage qui devra relier tous les modules. Outre les différents capteurs énoncés dans les pages qui précèdent, on peut sur ce schéma observer une kyrielle de LEDs dont les deux blanches sur *D5* qui constituent les phares. Comme bon nombre de broches d'Entrées/Sorties n'étaient pas employées, on a dilapidé les ressources de l'ATmega328 pour munir la sonde de témoins logiques qui s'avèrent particulièrement utiles en programmation lors du développement, voir en exploitation pour vérifier visuellement l'état physique de la sonde.

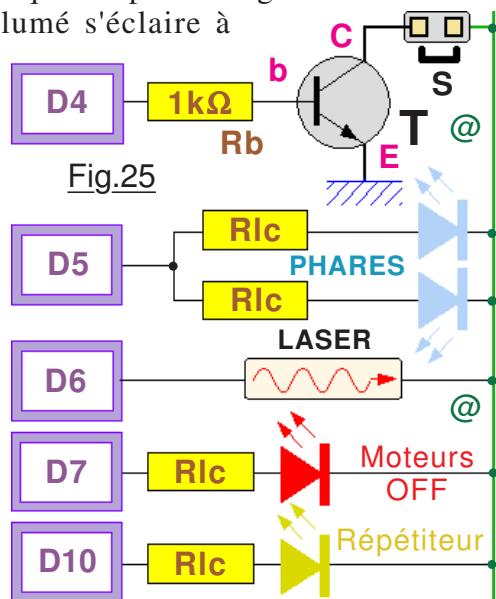
Sur la broche *A3* programmée en sortie binaire on pilote une LED verte. Cette dernière clignote quand le programme est en train de dérouler la boucle de base *void loop()*. Si elle reste stable allumée ou éteinte c'est que le logiciel est occupé dans une routine de servitude ... ou qu'il est bloqué suite à une vermine dans le programme de JEKERT. Lorsque tout est au point, décaler le petit "strap à languette" d'une position vers l'arrière ouvre le circuit. (*Voir la Fig.2 en Fiche n°7*) Ainsi elle ne s'allume plus et on peut l'oublier, car cet appel insistant finit par se montrer "trop présent". Toujours sur la Fig.2 la ribambelle de témoins sur la gauche est prévue pour informer l'opérateur de l'état de la sonde en exploitation. La signification de chaque LED est précisée, et en testant toutes les commandes avec le P.C. vous comprendrez rapidement à quoi font allusion ces diverses informations. En version "pauvre", un petit "couineur" branché sur *D2* génère un BIP sonore chaque fois que l'opérateur commet une erreur où qu'un incident technique survient en exploitation. La liste des erreurs est donnée sur la *Fiche n°18*, leur majorité résultant de consignes incorrectes envoyées par le clavier du P.C. (*Je vous conseille fortement de l'imprimer également.*) Sur la version avec pupitre ce transducteur ne sera plus sollicité, (*Non définie dans les initialisations D2 sera une entrée à haute impédance.*) la console de pilotage incluant son propre avertisseur sonore.



Ce n'est pas moins de douze LEDs de contrôle qui équipent l'explorateur robotisé. Aussi, pour simuler le mode **SOMMEIL**, la commande "s\*" permet à tout moment de suspendre tous les électriques "inutilement consommateurs d'énergie". Toutes les LEDs sont alors éteintes y compris les deux des phares ainsi que le LASER. La commande "s\*" ne fait que couper l'énergie. Un deuxième appel à cette commande restaure l'état initial, ce qui était allumé s'éclaire à nouveau. Pour exploiter cette nouvelle commande, il faut inclure un disjoncteur électronique.

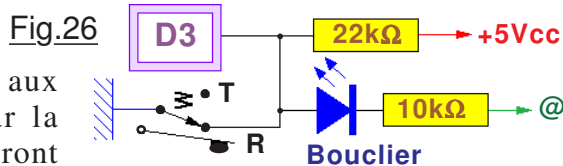
### ➤ Le disjoncteur électronique.

Les différents consommateurs électriques ne sont pas reliés directement à **GND** mais connectés à une masse virtuelle désignée par @. Le "Strap" **S** coupe éventuellement la ligne @ pour pouvoir effectuer des vérifications électroniques. Si vous pontez avec un fil la ligne @ à **GND** l'ensemble lumineux est fonctionnel. Au contraire, si vous enlevez la languette de contact **S** tout sera éteint quel que soit l'état de déroulement du logiciel. Établir ou couper la liaison électrique entre @ et **GND** est précisément le rôle du disjoncteur électronique piloté informatiquement par la sortie binaire **D4**. Le transistor **T** de type NPN est très banal. Tout modèle pour petite puissance tel que les 2N2222 ou 2N1711 conviendront. (Pour les explications détaillées de cette branche particulière du schéma, consultez le **TOME 2** en page 27.)



### ➤ Capteur de "contact du bouclier avec le sol".

Plusieurs circonstances en exploitation imposeront de vérifier que la sonde est bien au repos, son bouclier posé sur le sol martien. Il sera à tout moment possible aux ingénieurs de maîtrise de tester l'état de JEKERT par la commande "i\*". Surtout, des vérifications automatiques seront intégrées dans les programmes si cette attitude constitue un préalable à une action potentiellement risquée. Considérons la Fig.26 sur laquelle on retrouve la masse virtuelle @ coupée par le transistor disjoncteur. Pour élaborer le schéma électrique, la première contrainte résulte de **la LED bleue** qui **indique** visuellement **que le bouclier est en contact avec le sol**. Elle doit s'allumer lorsque le micro contact passe à l'état travail. (Les détails techniques et les contraintes de conception sont détaillés sur le **TOME 2** en page 35.)



Bouclier au sol	État	S.W.	D3	I	LED
NON	Repos	Fermé	0v	250μA	Éteinte
OUI	Travail	Ouvert	3,2v	90μA	Allumé

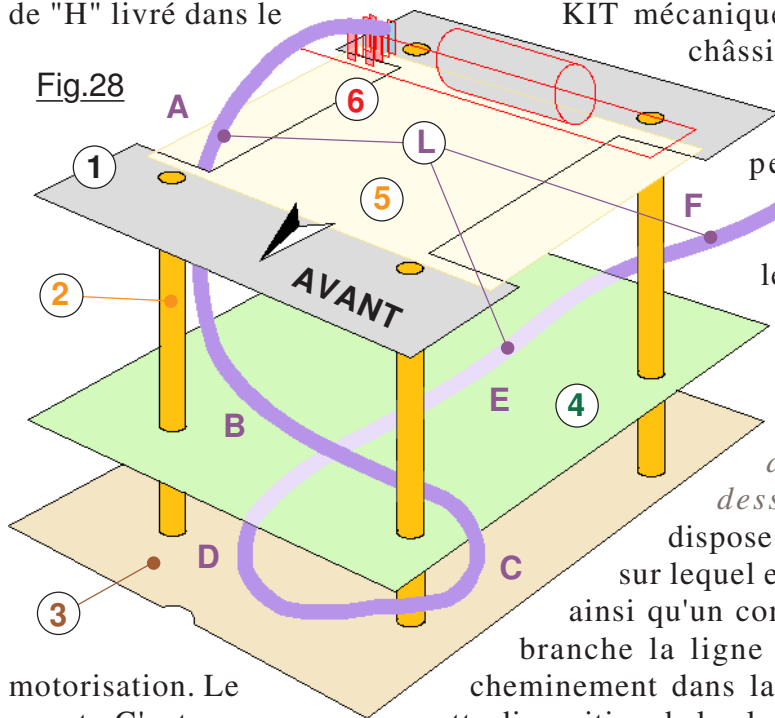
Fig.27

Le tableau de la Fig.27 établit un lien entre la logique et les aspects électriques. Il est amusant de noter au passage que nous nous trouvons en présence d'un cas rares pour lequel la consommation électrique est plus importante quand une lampe est éteinte que lorsqu'elle est allumée. Cet oxymore toutefois nous évite d'avoir à utiliser un micro contact à deux sections. Cette solution est tout à fait acceptable car les diodes électroluminescentes actuelles présentent des rendements lumineux étonnants. À l'époque où il fallait au minimum 20mA pour allumer ce type de composant, cette solution n'aurait pas été raisonnable. Vive les progrès de la technique optronique.

Particulièrement tout ce qui sera ajouté aux servomoteurs et au "Multiplexeur" est défini. En particulier nous pouvons observer sur la Fig.1 de la **Fiche n°6** qu'un condensateur de 220nF associé à un condensateur de 10μF sont intercalés entre le +5Vcc et **GND** pour "découpler" l'alimentation des deux cartes Arduino. Leurs valeurs ne sont absolument pas critiques, seuls les ordres de grandeur sont à respecter. Ce sont des raisons d'encombrement de ces composants qui a servi de critère de choix. Enfin, il faut savoir qu'un **condensateur "réservoir" de 470μF sera placé sur la ligne de puissance pour en favoriser le comportement dynamique lors des appels de courant**. Ce composant sera sur un circuit proche de la carte du "Multiplexeur". Nous avons tous les éléments pour pouvoir enfin passer à la réalisation des circuits imprimés et à l'assemblage.

## 17) Organisation structurelle globale de la sonde.

**P**réambule incontournable à la réalisation des circuits imprimés, il faut impérativement avoir déterminé leur répartition et leur moyens d'assemblages sur la structure du robot. Leurs dimensions en dépendent, ainsi que la position des trous de passage des diverses vis de liaison. Considérons le croquis de la Fig.28 qui présente la structure globale avec en **1** le châssis en forme de "H" livré dans le



KIT mécanique. Avec les longues vis **2** on solidarise le châssis avec le bouclier **3**. Intercalé entre les deux on immobilise par l'entremise des quatre vis **2** le circuit imprimé principal **4** sur la petite machine. Cette plaque préperçée présentera donc des dimensions similaires à celles du châssis **1**. Par ailleurs, ce sont les positions des trous de passage des vis **2** qui imposent sur **4** la position des orifices de traversée. Sur le châssis **1** se trouve immobilisée une petite plaque **5** qui supporte le **multiplexeur** ainsi que la boussole. (Ces deux entités ne sont pas représentées sur le dessin.) Presque contre le **multiplexeur** on dispose un petit circuit imprimé de complément **6** sur lequel est soudé le condensateur réservoir de  $470\mu F$ , ainsi qu'un connecteur HE14 à deux rangées sur lequel se branche la ligne **L** qui amène l'énergie de puissance à la cheminement dans la structure de cette ligne sera examiné plus cette disposition de la plaque imprimées qui en impose ses dimensions.

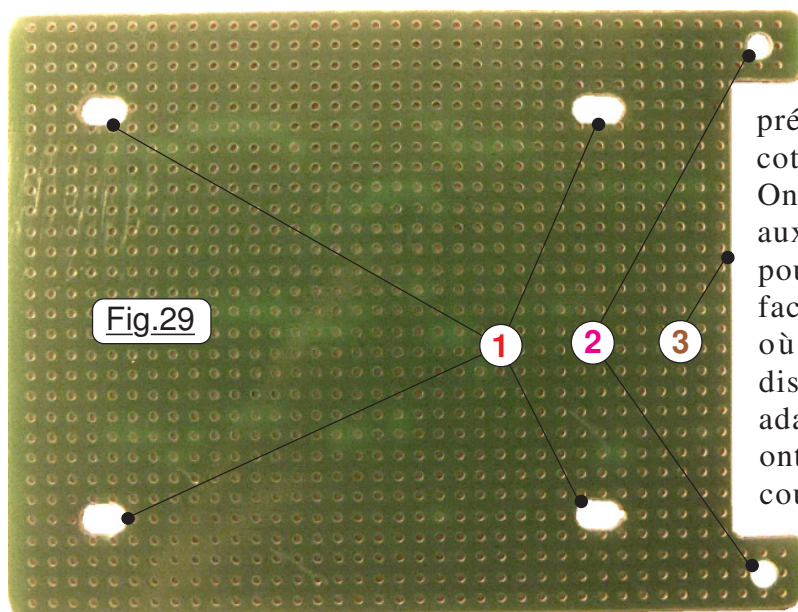
motorisation. Le avant. C'est encore

## 18) Réalisation du circuit imprimé principal.

**S**uite aux informations qui émanent du chapitre précédent, nous savons que la plaque présentera approximativement les dimensions du bouclier et que les positions **des trous de passage des vis d'immobilisation** en **1** de la Fig.29 sont imposées par celles des orifices déjà disponibles sur la pièce en "H" du châssis. Le respect des nombreux critères de conception énumérés dans le **TOME 2** aboutissent à l'implantation des composants précisée en Fig.2 de la **Fiche n°7**. Le circuit imprimé est vu par dessus comme si la plaque était translucide et que par transparence on voyait les pistes cuivrées.

### ➤ **Structure du circuit imprimé principal.**

Contrairement à un circuit imprimé industriel multicouches, on ne dispose que d'un côté cuivré. En contre partie, rien ne nous interdit de faire du 3D, c'est à dire de placer des résistances, des ponts de



câblage les uns aux dessus des autres. Le tout, c'est de respecter tous les critères d'encombrement. Les plaques de circuit préperçées à bandes cuivrées sont constituées coté cuivre par des pistes linéaires parallèles. On doit donc couper ces dernières pour aboutir aux isolements désirées. Ce type de plaques pour développement est malheureusement pas faciles à se procurer. En particulier l'enseigne où je les approvisionnais semble avoir disparue de l'Internet. Il vous faudra peut être adapter. Les plaques les plus faciles à trouver ont une petite pastille carrée à chaque trou. Du coup pour l'orientation c'est plus facile car indifférent. Il suffit de couper aux bonnes



dimensions. Au lieu d'effectuer les coupures de piste, vous remplacez en créant une ligne continue par soudure d'un fil dénudé. Les queues de composants (*Que l'on doit systématiquement raccourcir à l'usage, font merveille pour cette application.*) Dans ce paragraphe sera explicitée la technique mise en œuvre sur le prototype. L'aide la plus efficace que vous trouverez dans ce didacticiel est apportée par le fichier **Circuits Imprimés.spl** qui s'ouvre avec la **visionneuse** déjà citée **SPLAN-VIEWER.EXE**. Ce document représente étape par étape les actions dans l'ordre pour souder les divers composants sur la plaque de prototypage à trous. On commence par percer au bon endroit les quatre trous **1** de la Fig.29 de liaison entre le circuit imprimé et les boulons long qui supportent le bouclier. Ils sont oblongs pour pouvoir translater légèrement le circuit par rapport aux vis de liaison et ainsi positionner finement le circuit dans le sens longitudinal de la sonde. Vous pouvez constater qu'en fin de compte le circuit imprimé dépasse largement le bouclier vers l'avant. Ce débordement est prévu pour pouvoir placer PHARES, capteur météorologique et module télémétrique à ultrasons.

**L'**étude du circuit imprimé montre qu'il faudrait disposer du cas idéal de la Fig.30 pour lequel les pistes sont pratiquement toutes verticales en **A**, sauf à gauche en **B** où elles doivent avoir la direction horizontale. Évidemment un tel circuit n'existe pas, il faut le créer de toutes pièces. Dans ce but on découpe une petite plaque cuivrée dont les bandes sont dans le bon sens. Cette plaque est rapportée sur le circuit principal par des boulons  $\phi$  M3 traversant les trous **2**. Pour que les pistes cuivrées soient "disponibles", la plaque principale est ajourée en **3**. Vous ouvrez le dossier **<Galerie d'Images>** et consultez **Image 7.JPG** qui présente les deux éléments de cet assemblage. L'étape de préparation suivante consiste à couper les pistes comme

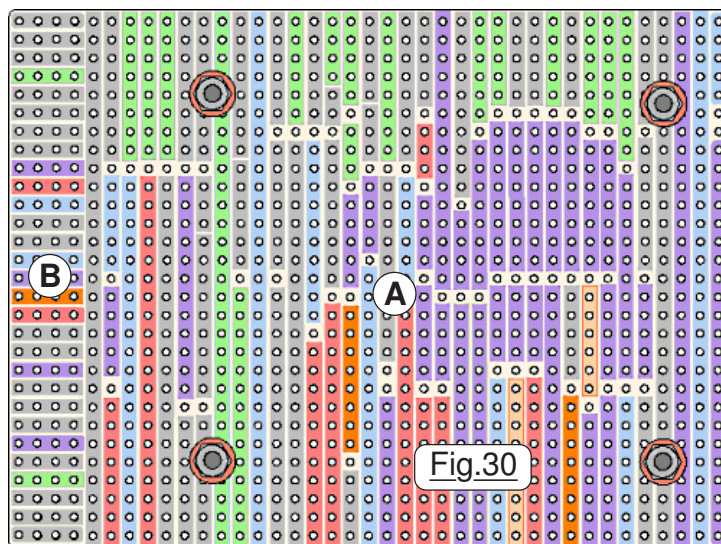
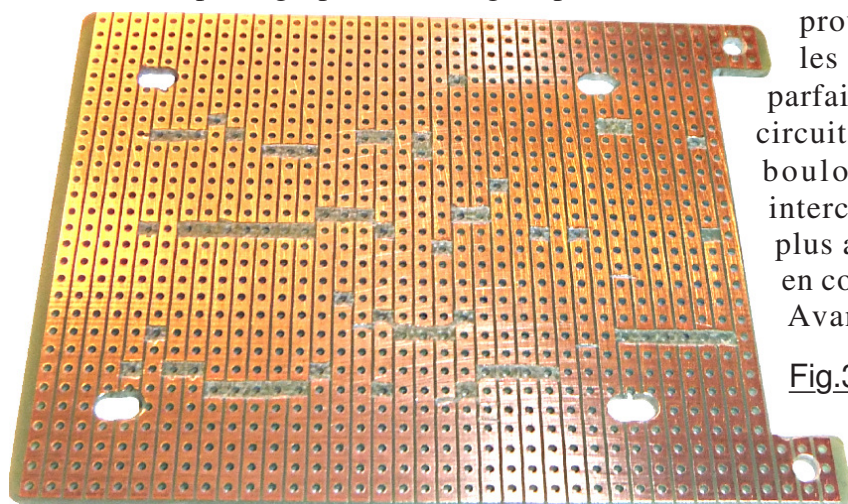


Fig.30



montré sur la photographie de la Fig.31 pour établir les isolements électriques. Un dernier assemblage provisoire sur la structure pour vérifier que les trous de passage des longues vis sont parfaitement positionnés. Immobiliser le petit circuit sur le plus grand mais sans bloquer les boulons, car il faudra les déposer pour intercaler le **Pare-chocs** dont il sera question plus avant. Nous pouvons débuter le câblage en commençant par les fils de liaison rigides.

Avant de passer en revue les photographies, deux remarques s'imposent. Quand vous observez le dessin du circuit imprimé avec attention, vous constaterez que plusieurs fils voisins sont représentés les uns à côté des autres comme montré sur la Fig.32 dans l'encadré **X**. Dans la réalité, ils sont les uns au dessus des autres comme visible sur la photographie en **Y**. Inutile de préciser que l'on soudera en premier ceux de dessous, puis la deuxième "couche" et éventuellement, comme c'est le cas présenté ici sur la Fig.32, le troisième niveau en dernier.

Fig.31

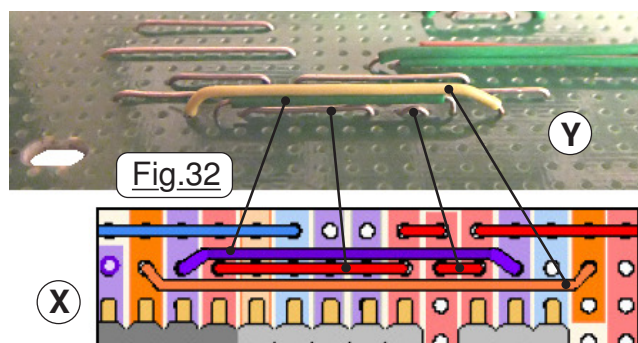


Fig.32

L'étape qui consiste à souder les petits ponts électriques rigides pour aboutir à **Image 8.JPG** est détaillée dans l'onglet 2 du document **visionneuse** intitulé **Étape 1 : Les ponts de câblage rigides**.



**S**oudant séparément les composants sur les deux éléments de prototypage prépercés, on réalise ensuite **Étape 2 : Les connecteurs, les résistances, le bouton poussoir de RESET**. L'idée de base consiste à toujours commencer par les éléments les moins hauts, puis les plus proéminents. Ainsi quand on pose la plaque à l'envers pour pouvoir souder, ils restent en place sans avoir à les brider. Notez sur la Fig.34 l'enchevêtrement des trois résistances de 2,2kΩ situées en dessous des deux résistances de 1kΩ. Donc veiller à l'ordre de câblage. Pour souder les petits connecteurs coudés

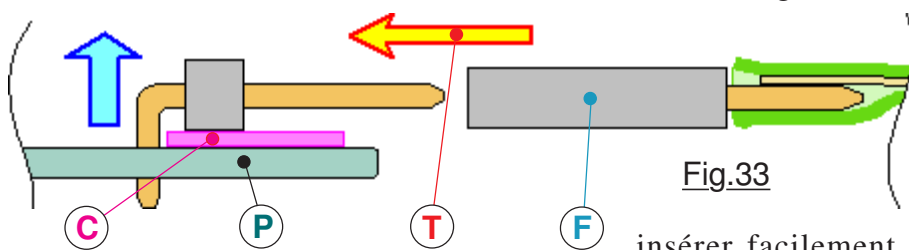


Fig.33

HE14 la procédure est un peu particulière. Considérons la Fig.33 sur laquelle en **P** se trouve le circuit Principal et en **F** la fiche femelle de la liaison filaire extérieure. Pour que l'on puisse

insérer facilement **F** sur le connecteur coudé par la translation **T**, il faut qu'entre le HE14 femelle et le circuit imprimé **P** subsiste un petit jeu. Pour aménager un petit écart suffisant, la technique consiste à surélever le connecteur coudé (*Flèche bleue.*) au moyen d'un petit carton **C** provisoire (*En rose sur le dessin.*) au moment d'effectuer la soudure le total étant maintenu en place par une pince auto serreuse. Veiller à ce que les broches soient bien parallèles à **P**, ou légèrement vers le haut pour faciliter le branchement de **F**. Quand tous les composants sont soudés on enchaîne avec l'**Étape 3 : Assembler les deux circuits et serrer les boulons de liaison**. Pour mémoire il faudra redéposer ces boulons  $\phi$  M3, donc serrer le juste ce qu'il faut pour que les deux plaques soient bien en contact l'une avec l'autre, mais sans plus. Nous en sommes à l'état de la photographie d'**Image 9.JPG** sur laquelle on voit bien que seul le connecteur HE14 de droite en bas dépasse du circuit imprimé. Tous les autres sont en retrait. Sur cette image toutes les résistances ne sont pas encore en place, et une seule est soudée "en épingle", c'est à dire verticalement. Nous allons maintenant souder les composants plus "hauts" tels que le BUZZER, le connecteur HE14 double pour les périphériques se trouvant à l'avant etc. Cette étape aboutit à **Image 10.JPG** qui montre que le transistor est plus plat que le boîtier standard d'un 2N1711. C'est un composant de récupération dont la référence est "quelconque". Pour l'heure, on va naturellement continuer dans l'ordre par **Étape 4 : Le Buzzer**, ainsi que les **deux condensateurs de découplage**. Contrairement à ce que laisse entendre la Fig.34 de cette page, les liaisons souples ne seront soudées que lorsque les deux lignes HE14 qui supportent la carte Arduino NANO seront déjà en place, ainsi que toutes les diodes électroluminescentes placées en quinconce et vues ci-contre.

**P**our toutes les étapes de la réalisation de ce circuit, chaque soudure est vérifiée avec une loupe à fort pouvoir grossissant pour s'assurer qu'il n'y a pas de contact interdit avec les éléments voisins, et que la soudure présente un aspect visuel correct. Un contrôle permanent à chaque étape est le gage d'un fonctionnement immédiat et fiable. Les deux lignes **A** et **B** de connecteurs femelle HE14 présentent une hauteur **H** moyenne. Il faut impérativement que la petite carte électronique entièrement enfichée, il reste entre ses composants situés sur le dessous et les torons de fils une place suffisante. Pour vous donner une idée plus précise, la hauteur **H** des éléments sélectionnés pour équiper le prototype fait presque 9mm. Sur la Fig.34 on distingue nettement les LEDs alignées sur deux rangées décalées et le "strap" à languette qui autorise ou coupe le clignotement de la LED verte. Le connecteur **C** et le petit fil souple qui passe sous les deux résistances peuvent ne pas être montés sur la plaque. Ils servent provisoirement à brancher un microcontact pour simuler celui qui détectera "bouclier posé sur le sol". Pour la mise au point des programmes, l'emplacement du petit contacteur

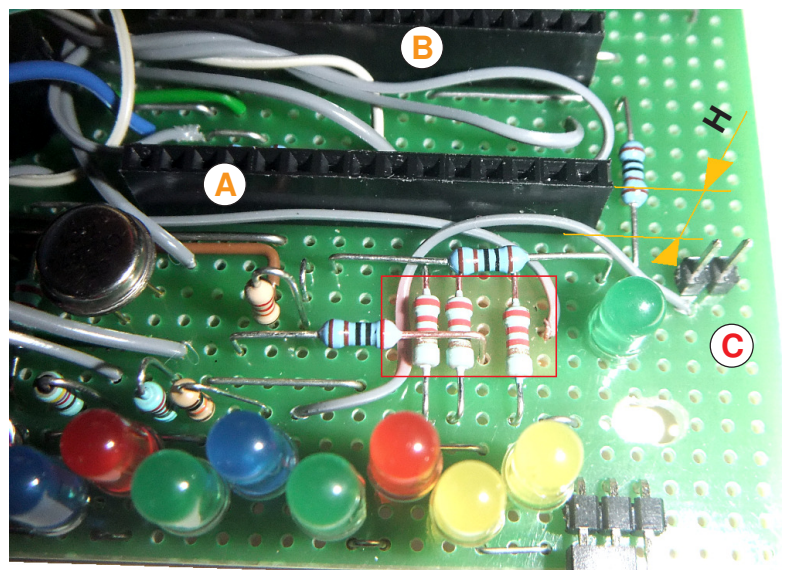
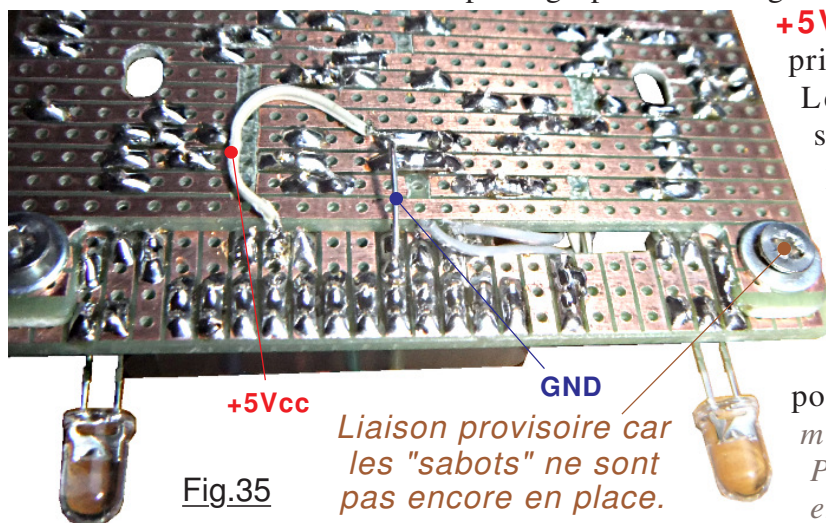


Fig.34

n'avait pas encore été déterminé. En ce qui vous concerne, vous allez le souder dans la foulée, donc inutile de vous compliquer la vie avec la présence de **C**.

**S**ouder les deux lignes **A** et **B** ne présente pas de grosse difficulté. Toutefois, pour assurer un parfait alignement entre les connecteurs HE14 et les broches de la carte Arduino NANO voici comment je procède : Les deux lignes sont insérées sur les broches d'Arduino. Puis l'ensemble est positionné sur le circuit imprimé. Les quatre broches des extrémités sont soudées en s'assurant par une toute petite pression lors de l'opération, que le connecteur est parfaitement en contact avec la plaque percée. Puis la carte de l'ATmega328 est retirée et les autres soudures sont réalisées. Contrôle visuel à la loupe, vérification des liaisons avec l'ohmmètre. Quand tout est parfait, on peut achever la réalisation du circuit complet avec la soudure de toutes les liaisons filaires souples munies à leur extrémité des connecteurs idoines. **On ne place pas encore la carte Arduino sur son support.**

**F**ait assez rare pour être souligné, et contrairement à la majorité de mes publications sur Internet, le circuit imprimé principal ne comporte que deux liaisons filaires ajoutées sur le dessous coté cuivre. Bien visibles sur la photographie de la Fig.35 il s'agit de la ligne de masse **GND** et du



**+5Vcc** pontés entre le circuit imprimé principal et le petit complément rapporté. Les deux LEDs cristal blanches sont soudées sur le dessus de la plaque prépercée. Elles dépassent notablement et sont de ce fait en porte à faux. Cette configuration particulière les rend relativement vulnérables. Il importe à l'avenir, et par voie de conséquences, de manipuler le circuit avec prudence pour ne pas risquer de les tordre. (Ou bien mieux : Réaliser sans plus attendre le Pare-chocs mentionné sur la Fig.7 donnée en page 8 de ce tutoriel.)

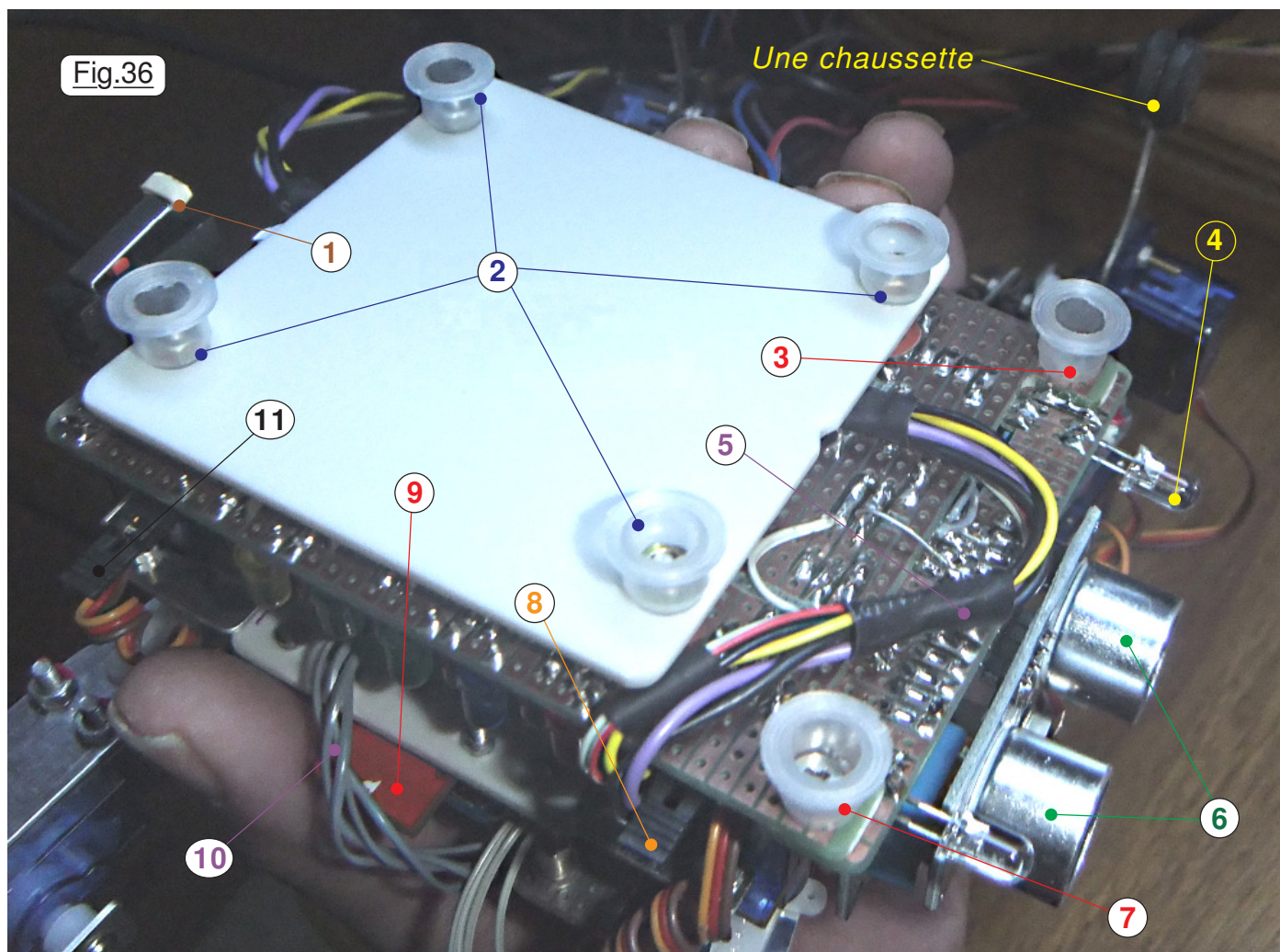
Fig.35

*Liaison provisoire car les "sabots" ne sont pas encore en place.*

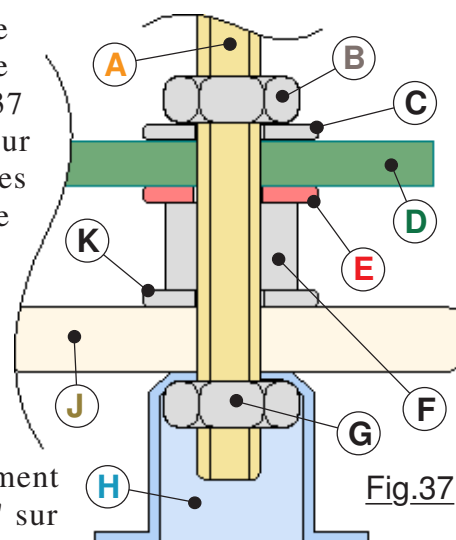
### ➤ Saboter JEKERT !

**A**vertir le contre-espionnage et la brigade d'intervention n'est pas d'actualité. Ce titre scandaleux pour "faire vendre" ne fait pas allusion à une quelconque malveillance. Il ouvre une parenthèse qui anticipe une action qui sera conduite tout à la fin de l'assemblage, mais qui justifie le contenu et les explications du chapitre qui suit. Nous allons chausser le petit robot non pas avec des pantoufles, mais avec des fameux sabots. Quand la sonde se pose sur le sol, la gestuelle est assez vive et l'impact peut s'avérer un peu brutal. Par ailleurs, les quatre longues vis immobilisées sur le châssis qui servent à solidariser le circuit imprimé principal et le bouclier, ne dépassent pas rigoureusement de façon identique. Posée au sol la sonde boîte légèrement. Ce n'est pas vital, tout au plus un petit "imparfait" qui agace l'élégance. Pour palier ces deux petits inconvénients mineurs, on va munir le bouclier de sabots. Vous pouvez dans ce but employer toute technologie qui sera à votre portée. Par exemple du caoutchouc ou du feutre auto collant, produits faciles à trouver dans des magasins de bricolage à des "hauteurs" qui conviendront, quitte à intercaler des rondelles d'épaisseur taillées dans du carton. Sur le prototype, les sabots sont constitués de petits bouchons en matière thermoplastique qui à l'origine devaient boucher des flacons de parfum de luxe. Sur des machines on les moule sous pression par grappes de centaines. Quand le flacon change de forme, commerce oblige, des myriades de ces produits sont déchetés pour recyclage ... certains ont été récupérés ! Il suffit de percer un trou à  $\phi$  M3 avec un poinçon adapté et on peut en **2** sur la Fig.36 munir JEKERT de ces protections. En configuration **VEILLE** la sonde se posera sur ces quatre sabots en forme de cloche à l'intérieur desquels se loge l'écrou. (Voir les détails en Fig.37) Sur la photographie la sonde est entièrement achevée, elle devient délicate à tenir en main sans presser des éléments fragiles débordant sur tous les cotés. Il faut la manipuler avec force douceur et pas mal d'attention. Le capteur à ultrasons **6** est inséré sur son support HE14 et l'on devine en **9** la boussole statique. En **8** est bien visible le "strap" à languette qui coupe l'éclairage des LEDs d'état,





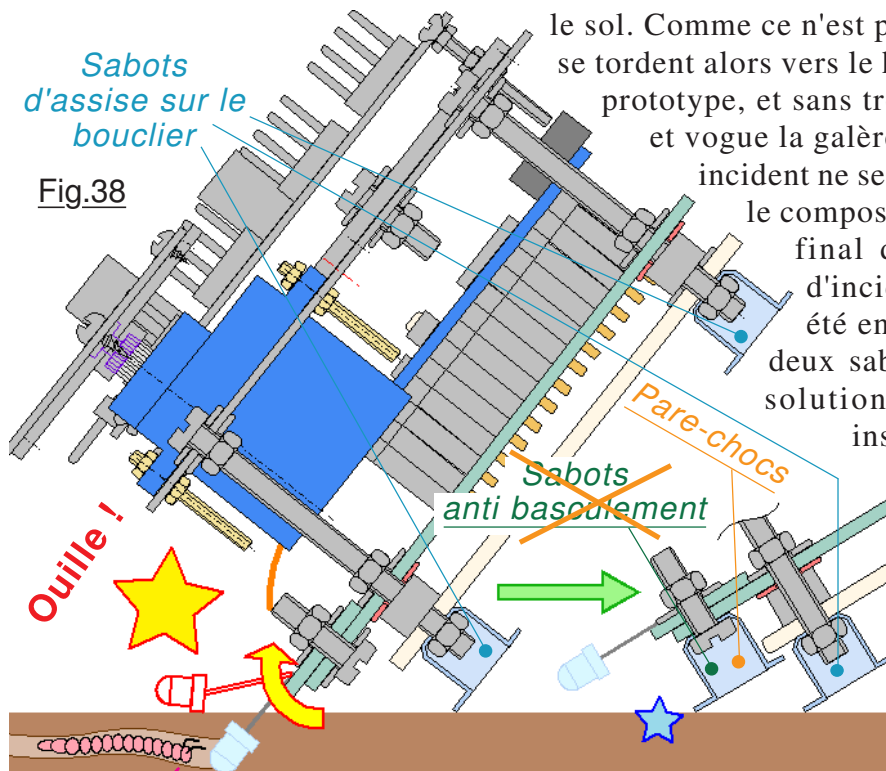
et moins repérable en **11**, celui qui valide la LED verte clignotante attestant de l'activité de la boucle de base dans le logiciel de JEKERT. Revenons sur la structure rigide du robot. En **J** de la Fig.37 on reconnaît le bouclier avec en **A** les vis longues immobilisées sur le châssis. Le circuit imprimé **D** est solidarisé sur l'ensemble par les deux écrous **B** et **G**. Sur le dessus en **C** on trouve une rondelle d'appui métallique indispensable pour assurer une portée correcte sur les trous oblongs. Sur le dessous coté piste il faut impérativement faire appel en **E** à des rondelles isolantes. La portée sur le bouclier **J** est améliorée par la rondelle métallique **K**, la séparation étant assurée par l'entretoise **F**. Pour réaliser l'assemblage final, on desserre volontairement **B**. Puis on insère l'écrou **G** dans le sabot **H** en forme de cloche. L'écrou est légèrement forcé sur ses six pans, on peut donc facilement visser "la cloche" sur **A**. Quand les quatre sabots sont en place et bien de niveau sur un même plan, **on serre alors modérément** les écrous **B**.



➤ **Attention aux faux pas.**

**M**archer est tellement naturel quand on est grand, que notre pensée peut oublier totalement cette activité. Les sensations imprégnées dans nos muscles font le reste. Et pourtant, un faux pas peut arriver à n'importe qui, n'importe quand. Régulièrement lors des essais, une inertie un peu forte sur un mouvement trop nerveux, et la petite machine bascule sur le nez ou sur les fesses. Un geste malchanceux sur le bureau trop encombré et même punition, on lui communique une petite pichenette. Il ne faut pas grand chose pour la voir basculer sur le "nez" comme montré sur la Fig.38 avec pour conséquence inexorable de plier les deux LEDs des phares situées en débordement à l'avant. En effet, la géométrie de la petite machine les obligerait à s'enfoncer dans





le sol. Comme ce n'est pas possible, les tiges des deux LEDs se tordent alors vers le haut. C'est arrivé quelques fois sur le prototype, et sans trop de gravité. On a redressé la barre et vogué la galère. Il ne faudrait toutefois pas que cet incident ne se produise trop souvent car rapidement le composant se dégraderait avec obligation au final de le changer. Pour parer ce type d'incident, une solution élémentaire avait été envisagée. Elle consistait à ajouter les deux sabots repérés **3** et **7** sur la Fig.36 ... solution qui à l'expérience s'est montrée insuffisante. Du coup, le **Pare-chocs**

mentionné sur la Fig.7 donnée en page 8 de ce tutoriel a remplacé les deux sabots. Son immobilisation sur le circuit imprimé principal utilise les deux petits boulons  $\phi M3$  qui solidarissent le petit circuit de complément.

Pour clore cette parenthèse qui a un peu anticipé sur l'intégration

des systèmes, observez en **5** de la Fig.36 le cordon ombilical qui sur le dessous part vers l'arrière de l'insecte mécanique. En ajoutant un morceau de carton à l'endroit stratégique de sa sortie pour le protéger, compte tenu de l'espace situé entre le bouclier et le circuit imprimé, le cordon ombilical sera correctement pincé et ainsi solidarisé modérément avec la structure.

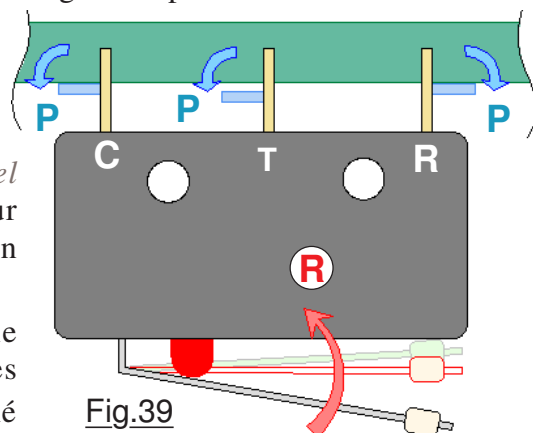
### 19) Finir le circuit imprimé principal.

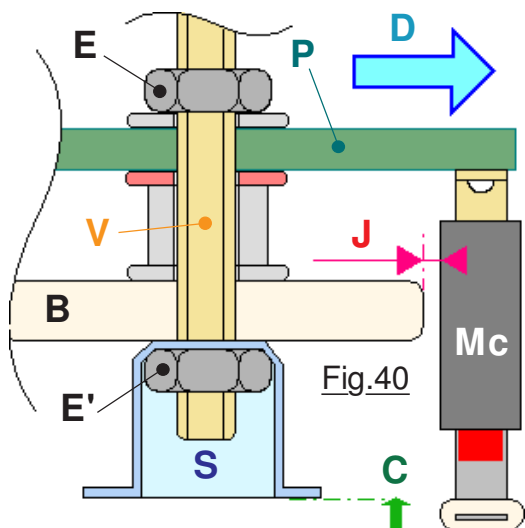
Logiquement, les développements qui vont suivre devraient se trouver dans le chapitre précédent. Vu que le nombre de pages qui le compose commence à devenir un peu trop important, il a été estimé plus raisonnable de changer de chapitre pour aérer un peu la présentation.

#### ➤ **Souder le micro-contacteur sur le circuit imprimé principal.**

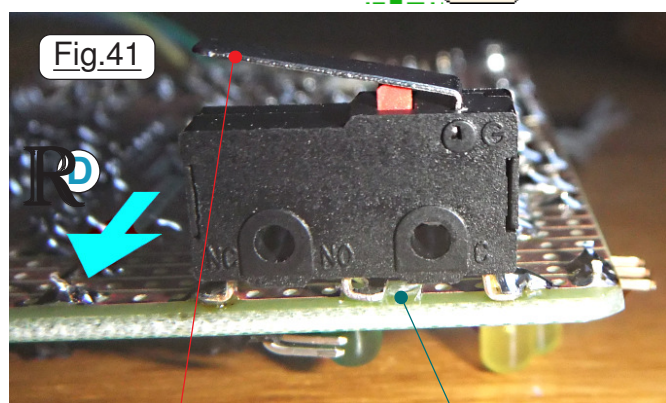
Un chitepu de chirurgie s'impose. En effet, la course en rotation **R** sur ce type de composant est assez limitée. Sur la Fig.39 la palette est représentée au repos. Suite à une course relativement faible, quand elle passe à l'horizontale, le basculement de l'inverseur se produit. (*Épure rouge.*) Observez avec attention le détail **1** sur la Fig.36 de la page 26. Il s'agit d'un petit anneau en caoutchouc qui est passé comme une bague autour de la palette mobile du contacteur. (*Récupération !*) Ce petit artifice assure deux fonctions. En premier, si on force exagérément sur la palette, il vient en contact avec le corps de l'inverseur et évite ainsi de le surcharger mécaniquement. (*Épure coloriée en vert pastel sur le dessin donné ci-contre.*) Il ajoute une petite épaisseur qui optimise la course du microcontact quand ce dernier est en place sur la machine.

Quand la sonde sera entièrement achevée et au repos, le bouclier ne touchera pas le sol car nous savons que les sabots surélèvent ce dernier d'environ 8mm. Le circuit imprimé pour son propre compte est encore plus haut puisqu'écarté par les entretoises de 4mm et les rondelles d'appui. La hauteur totale de l'inverseur non modifié soudé "en bout" par ses cosses de raccordement est trop importante. Pour les raccourcir elles sont pliées au milieu du côté indiqué sur la Fig.39 par **P**. Notez que la cosse centrale est volontairement plus courte pour ne pas toucher le circuit imprimé car le contact travail **T** ne doit pas interférer électriquement avec le reste du circuit. Du reste, pour assurer l'isolement, la piste cuivrée est coupée en dessous de ce contact interdit.



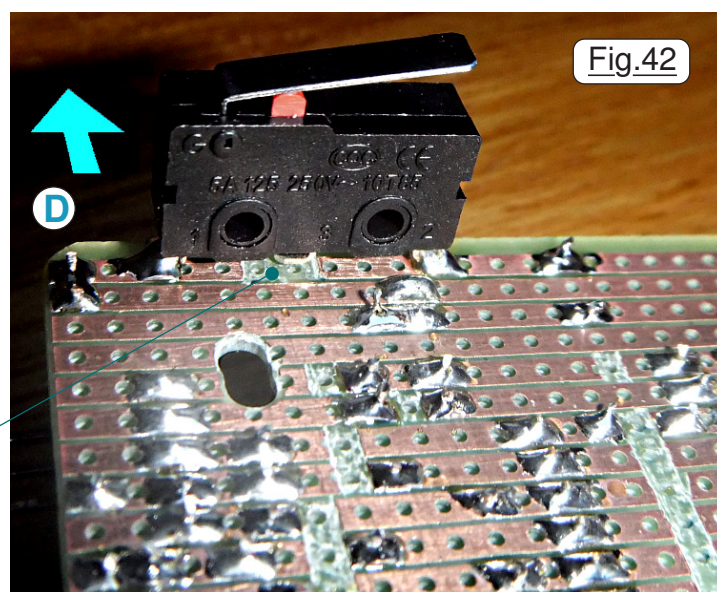


Considérons le dessin de la Fig.40 pour lequel la sonde n'est pas posée sur le sol, l'inverseur **Mc** n'est donc pas sollicité. Quand la sonde passe en mode **VEILLE** elle se pose sur les sabots **S** du bouclier. En ajustant finement la position axiale des écrous **E** et **E'** sur la vis **V** on optimise au montage la course **C** du micro-contacteur **Mc**. La plaque **P** du circuit imprimé principal dépasse vers l'arrière du bouclier **B**. Si l'on observe avec attention la Fig.42 on peut vérifier que **Mc** n'est pas soudé centré latéralement sur la piste cuivrée, mais **D**écalé vers l'extérieur comme symbolisé par la flèche bleue. Le but de ce petit décalage consiste à assurer un jeu **J** assez large entre **Mc** et **B** pour ne pas risquer d'interférence matérielle au montage, et faciliter au maximum l'assemblage final du circuit imprimé sur la structure.



**ATTENTION à orienter correctement la palette vers le milieu du châssis**

La piste cuivrée est coupée sous le contact central qui ne touche pas le circuit imprimé



### ➤ Souder les dernières lignes de liaison et vérifier entièrement la carte.

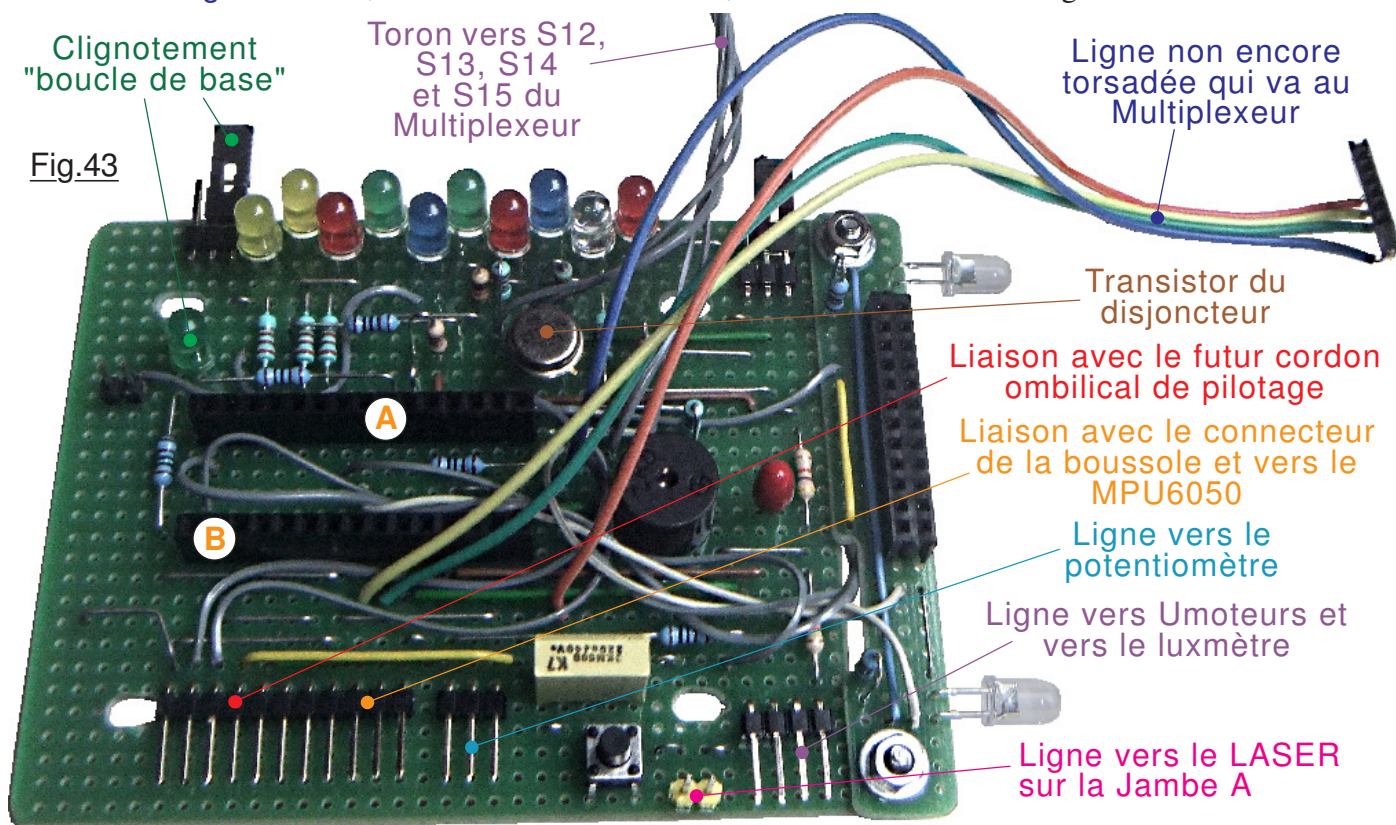
Risquant une fois de plus de rabâcher, avant d'insérer Arduino NANO sur son support et de brancher l'alimentation il importe d'effectuer une vérification complète de la carte électronique. Assemblez provisoirement la carte pour tester la position des écrous et surtout vérifier la course sur le petit contacteur **Mc** puis la redéposer. Avec deux pointes de touche, une sur **GND** et l'autre reliée à un **+5Vcc** il est facile de simuler le microcontrôleur et d'allumer une à une les diverses LED, vérifier que le transistor du disjoncteur électronique fonctionne correctement etc. Il faut absolument superviser l'intégralité des branches du schéma de la **Fiche n°6**, ohmmètre en main. Vérifier qu'à strictement aucun endroit deux pistes voisines ne soient en contact alors qu'en théorie elles doivent être isolées. Ce n'est pas du temps perdu, et rien ne sera aussi valorisant que de voir prendre vie l'ensemble quand vous allez réunir la petite carte par sa minuscule prise USB au P.C. pour envoyer les premières consignes, et que tout va fonctionner du premier coup. *(Ce fut en particulier le cas sur le prototype ...)* Rien ne serait plus frustrant de voir fumer un composant parce qu'une minuscule bavure de soudure touche la piste voisine pile au mauvais endroit. La Fig.43 montre le circuit imprimé principal entièrement terminé, qui par le truchement des divers contacteurs HE14 qui l'équipent est totalement séparable de la sonde. Avec divers fils électriques d'expérimentation on peut librement procéder à la vérification intégrale de ce module électronique vital. C'est le centre nerveux de JEKERT.



**VOTRE CIRCUIT DOIT FONCTIONNER PARFAITEMENT et DU PREMIER COUP ... C'EST UN ORDRE !**



Consultez [Image 11.JPG](#), elle montre la même chose, mais vu du côté de la rangée des LEDs.



➤ Ça va cartonner !

**A** vant de pouvoir placer la carte Arduino NANO sur son support, il importe de logger les données dans la mémoire EEPROM ainsi que le programme d'exploitation. Pour réaliser cette étape incontournable consultez l'encadré de la page 30 qui résume les opérations à conduire.

Validation confirmée du circuit principal, nous allons enfin pouvoir placer l'ordinateur de bord sur les deux lignes A et B du support HE14. Mais au préalable il faut impérativement façonner une petite

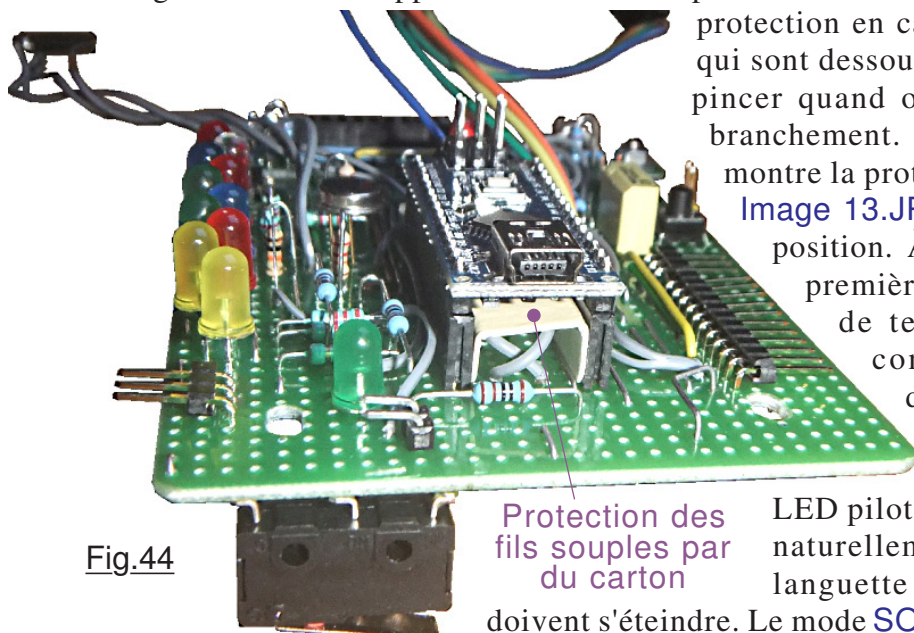


Fig.44

Protection des fils souples par du carton

protection en carton qui plaquera les fils souples qui sont dessous et qui ne demandent qu'à se faire pincer quand on va enchâsser les 32 picots de branchement. La photographie [Image 12.JPG](#) montre la protection mise en place, alors que sur [Image 13.JPG](#) l'ordinateur de bord est enfin en position. À ce stade on doit commencer les premières manipulations de la campagne de tests, inutile pour le moment de connecter le multiplexeur. Par le dialogue avec le moniteur de l'IDE tester toutes les commandes qui n'impliquent pas les moteurs. Les


LED pilotées par S12 à S15 resteront inertes naturellement. Si on enlève les "straps" à languette les diodes électroluminescentes

doivent s'éteindre. Le mode **SOMMEIL** doit aussi aboutir au même résultat alors que les petits connecteurs valident à nouveau les éclairages. Branchez provisoirement un potentiomètre et testez sa présence. Bref, l'intégralité des fonctions seront passées en revue les unes après les autres. Puis la petite station météorologique est placée sur le connecteur et ses accusés de réception vérifiés sur l'écran de l'ordinateur. Ajouter le télémètre à ultrasons. Placer la main à proximité et enregistrez un panoramique. Ajoutez en provisoire une ligne pour brancher la centrale gyroscopique. La vie est belle, tout fonctionne et l'on va pouvoir s'occuper des deux autres petits circuits imprimés. Pensez à achever cette campagne de vérifications avec "q\*".



**L**orsque vous déballez la merveilleuse petite carte Arduino NANO qui vient d'arriver, son microcontrôleur est vierge, tant pour sa mémoire réservée au programme que pour la zone EEPROM non volatile qui est prévue pour conserver des données. Le centre nerveux de JEKERT est donc dans le coma ! Pour pouvoir procéder aux essais dynamiques du circuit imprimé principal, et par la suite pour la motorisation, il faut charger les tables de données dans l'EEPROM et le programme qui anime la sonde. Bien que vous trouverez toutes les informations utiles sur la toile pour apprendre à effectuer ces opérations, je crois impératif de résumer les étapes de cette phase incontournable au projet. (*On devra recommencer pour le pupitre ...*)

- 01) Installer l'environnement **IDE** sur l'ordinateur qui servira à piloter JEKERT.
- 02) Déclarer pour le compilateur les bibliothèques mentionnées dans le texte :
  - **Wire.h** (*Pour gérer la ligne I2C*) ainsi que **I2Cdev.h** (*Pour le MPU6050*)
  - **Adafruit\_PWM servoDriver.h** (*Gère le multiplexeur 16 canaux*)
  - **DHT11.h** (*Pour le capteur d'humidité DHT11*)
  - **MPU6050\_6Axis\_MotionApps20.h** (*Pour la centrale gyroscopique.*)
- 03) La carte Arduino NANO est toute seule et branchée au P.C. par sa ligne Mini USB.

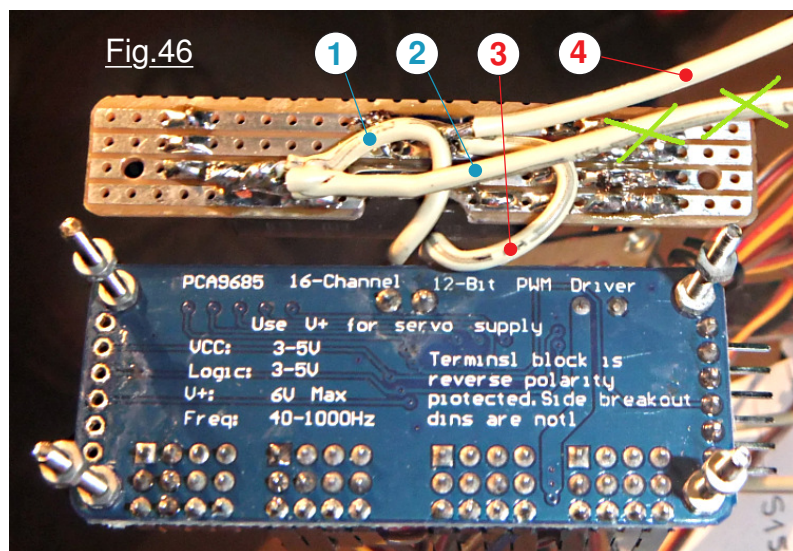
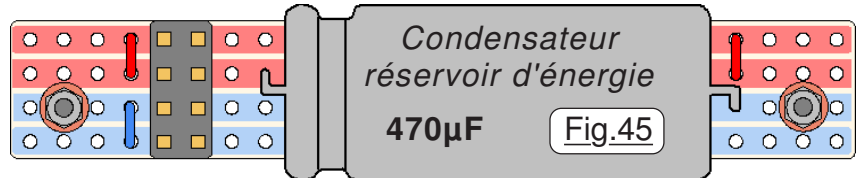
 **ATTENTION :** On trouve de ces cartes à des tarifs absolument dérisoires sur Internet et elles fonctionnent parfaitement. Toutefois, elles ne sont pas forcément reconnues par l'**IDE**. Dans ce cas, les commerçants en ligne proposent le **DRIVER** adapté à leur produit qui doit être inséré dans l'environnement de développement du P.C.

- 04) Ouvrir le programme **P28\_Ecrire\_les\_textes\_en\_EEPROM.ino** dans l'éditeur de l'**IDE** qui en propose le listage à l'écran.
- 05) **Outils > Moniteur série** ou cliquer à droite sur la "loupe" : En bas à droite de la fenêtre contextuelle sélectionner la vitesse de transmission sur USB à 115200bds qui est celle initialisée dans mes programmes. Refermez le Moniteur série.
- 06) Téléverser le programme avec la commande symbolisée par ➡. Quand le programme est inscrit dans l'ATmega328 il s'exécute et procède à l'écriture des données en EEPROM.
- 07) **Outils > Moniteur série** ou cliquer à droite sur la "loupe" : Le programme contenu actuellement dans la carte Arduino NANO liste sur l'écran du moniteur vidéo de l'ordinateur le contenu actuel de l'EEPROM qui correspond aux *textes qui seront affichés* par le moniteur.
- 08) Ouvrir le programme **P29\_Ecriture\_des\_tableaux\_en\_EEPROM\_T4.ino** dans l'éditeur de l'**IDE** qui en propose le listage à l'écran.
- 09) Téléverser le programme avec la commande symbolisée par ➡. Quand l'écriture du programme est inscrit dans l'ATmega328 il s'exécute et procède à l'écriture des données en EEPROM.
- 10) **Outils > Moniteur série** ou cliquer à droite sur la "loupe" : Le programme contenu actuellement dans la carte Arduino NANO liste sur l'écran du moniteur vidéo de l'ordinateur le nouveau contenu actuel de l'EEPROM qui correspond aux *tables des postures*.
- 11) Ouvrir le programme **P30\_Programme\_COMPLET\_T5.ino** dans l'éditeur de l'**IDE** qui en assure le listage à l'écran. Le Téléverser avec la commande ➡.
- 12) **Outils > Moniteur série** ou cliquer à droite sur la "loupe" : Toutes les données sont en EEPROM et le programme d'exploitation peut fonctionner. Sur RESET si la vitesse de la ligne est bien initialisée à 115200bds on peut déjà effectuer des essais avec uniquement la carte NANO Arduino branchée sur la ligne USB. Les erreurs 33 et 30 sont absolument normales puisque la centrale gyroscopique n'est pas encore installée sur son support HE14.

Commencez par effectuer une campagne de tests initiale en respectant le protocole fourni sur la [Fiche n°18](#). Lorsque le jeu d'essais aura donné pleinement satisfaction, vous aurez le loisir de tester toutes les commandes. Certaines provoqueront une erreur, d'autre comme "**g\***" retourne toutes les valeurs à zéro car la centrale gyroscopique n'est pas branchée. Bien utile, la commande "**i\***" peut lister à tout moment l'état logique de la sonde. Vous pouvez ainsi inverser une configuration et immédiatement en avoir confirmation avec "**i\***". Précieuse, la [Fiche n°15](#) nous liste toutes les commandes ainsi que les programmes disponibles. La [Fiche n°18](#) quand à elle nous traduit la signification des numéros d'erreur.

## 20) Le circuit imprimé du condensateur réservoir de 470μF.

**A** couchement délicat s'il en est, réaliser le petit circuit imprimé qui supporte le condensateur de 470μF servant de réservoir énergétique des servomoteurs n'a pas été immédiat car on se heurte à un réel problème de promiscuité. Agencer la solution définitive sur le prototype a imposé de nombreux montages et démontages pour aboutir à un résultat satisfaisant. Aussi, pour vous éviter ces complications, nous allons procéder progressivement et dans l'ordre logique qui maintenant peut être dégagé des atermoiements passés. Posons calmement le problème pour lister les contraintes qu'il faut satisfaire. L'[Image 14.JPG](#) a été photographiée lorsque la sonde était entièrement assemblée, donc en configuration définitive. Sur le dessus du châssis l'espace vital est réduit par la présence des moteurs et surtout par les **Jambes** dont les mouvements ne doivent surtout pas être entravés. Le circuit imprimé qui supporte le condensateur de 470μF a donc été limité à quatre pistes cuivrées de largeur. (Voir la Fig.45) ATTENTION : Sur les images les macrophotographies proposées sont vraiment trompeuses. Par exemple les "gros boulons" visibles sur [Image 16.JPG](#) ne font que  $\phi$  M2mm. On voit nettement que sur [Image 14.JPG](#) le petit circuit imprimé est placé presque à toucher celui du multiplexeur. On remarque également que le condensateur réservoir présente un diamètre plus important que la largeur du petit circuit imprimé, donc il déborde. Hors on doit pouvoir faire circuler des fils entre les pistes cuivrées et le bornier vert. (Et des fils de forte section pour présenter une résistance électrique minimale.)



**R**egardant la Fig.46 sur laquelle on ne peut que constater la grosseur des fils électriques soudés sur le petit circuit imprimé. Les deux liaisons **1** et **3** relient directement le condensateur de 470μF au petit bornier vert du multiplexeur. Vu la section de ces fils nous sommes certains que leur l'impédance sera très faible. Initialement les deux autres fils **2** et **4** étaient prévus comme cordon ombilical pour alimenter les servomoteurs. Au final cette solution a été abandonnée car elle présentait de nombreux inconvénients. Quand on effectue les essais dynamiques pour la solution finale, on constate que

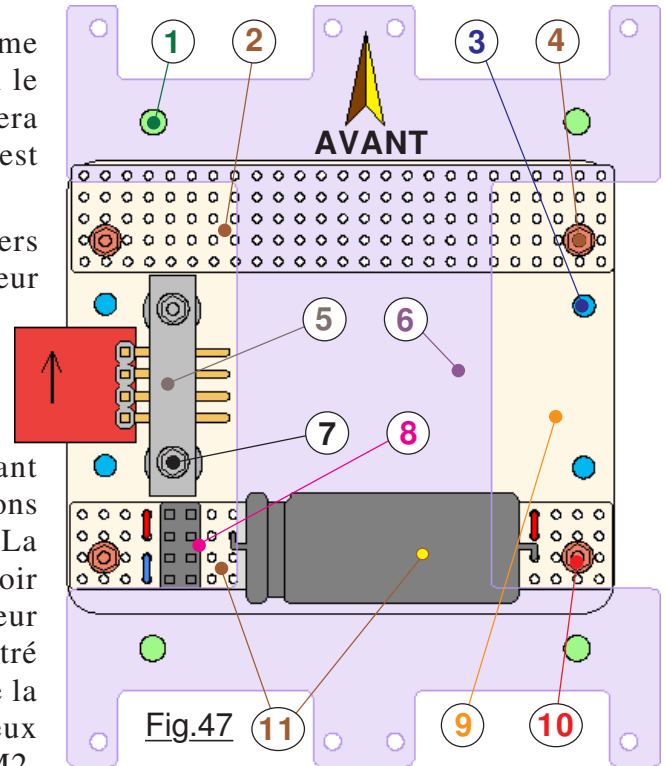
ce n'est pas la résistance de la ligne d'alimentation en puissance qui provoque les chutes de tension lors des appels de courant. C'est la diode de protection insérée en série et l'effondrement de l'alimentation secteur. Du coup, la grosseur de ces fils devient un inconvénient car ils chargent inutilement l'arrière de la sonde et sont un peu trop rigides. Pour faciliter les assemblages, déposes et autres aléas de la vie d'un prototype, c'est un petit connecteur HE14 à huit broches qui sert actuellement à brancher la ligne d'alimentation. Le gros fil **2** a été coupé à quelques centimètres et plié sous le circuit imprimé. Il n'est plus utilisé. Quand au fil **4**, bien qu'un peu gros pour cet usage, il va au petit connecteur du circuit imprimé principal qui sert à mesurer la tension sur les moteurs.

**A**utre contrainte absolument incontournable : Ne pas créer d'interférence matérielle entre le palonnier de la **Hanche**, ni avec le petit circuit imprimé, ni avec le corps du condensateur. On peut vérifier sur l'[Image 16.JPG](#) que pour assurer ce critère, le petit circuit imprimé doit se trouver à la même hauteur que celui du multiplexeur. On comprend facilement qu'il n'y avait vraiment pas la place pour laisser passer les gros fils vers le petit bornier vert. Suite à diverses études géométriques, il est ressorti le fait que de l'autre côté, vers l'avant, on pouvait placer un autre circuit imprimé de complément un peu plus large. Aussi, bien que le dessin de ce dernier n'avait pas encore été étudié, il a été décidé d'installer un circuit de cinq pistes de largeur, quitte à diminuer par la suite si l'étude imposait un amaigrissement. Ce circuit a été taillé et percé des deux

trous de fixation. Ainsi on pouvait passer à la réalisation des trous de passage de tous les éléments sur la plaque du multiplexeur. Comme on ne peut pas écarter le circuit imprimé du multiplexeur, la solution consiste à ménager un passage pour les fils sur la petite plaque à trous. L'Image 15.JPG dévoile la technique utilisée. Le passage est suffisant pour laisser passer deux gros fils. Sur le prototype, cette échancrure a été pratiquée alors que le circuit était terminé. **Gnac, gnac**, deux coups de pince coupante ! Et impossible de passer une petite lime pour peaufiner. Aussi, vous aurez le pouvoir de préparer votre plaquette avant de faire les soudures des composants, ce dégagement improvisé sera de ce fait bien plus esthétique.

Anticipant sur la phase d'assemblage, la Fig.47 résume l'occupation du dessus du châssis, dessin sur lequel le multiplexeur qui se trouve entre **2** et **11**, et qui sera immobilisé par des boulons traversant les trous **3** n'est pas représenté pour simplifier le croquis.

**L'**épure de la Fig.47 résume assez bien les divers perçages à prévoir sur le support du multiplexeur **9** immobilisé sur le châssis **6** par les longues vis de structure **1** qui servent à solidariser le circuit imprimé principal et le bouclier de protection avec le sol. Sur cette photographie la plaque **9** est représentée comme si elle était translucide, laissant entrevoir le châssis **6**. En **3** se trouvent les petits boulons  $\phi$  M2 qui soutiennent le module du multiplexeur. La **boussole** doit se trouver assez à l'extérieur pour pouvoir l'insérer ou la retirer assez facilement du connecteur HE14 repéré **5**. Il faut placer le support **5** bien centré entre les vis **3** pour rendre aisées les manipulations de la **boussole**. Ce centrage détermine la position des deux trous de passage des vis de liaison **7** au diamètre  $\phi$  M2. Sans que le circuit imprimé de complément **2** ne soit actuellement défini, ces deux boulons de liaison **4** sont au même écartement que ceux en **10** du circuit imprimé **11** dont on remarque sur le dessus un connecteur HE14 **8** double rangées qui reçoit la ligne électrique du cordon ombilical d'alimentation en puissance des douze servomoteurs.



## 21) Début de l'intégration des systèmes.

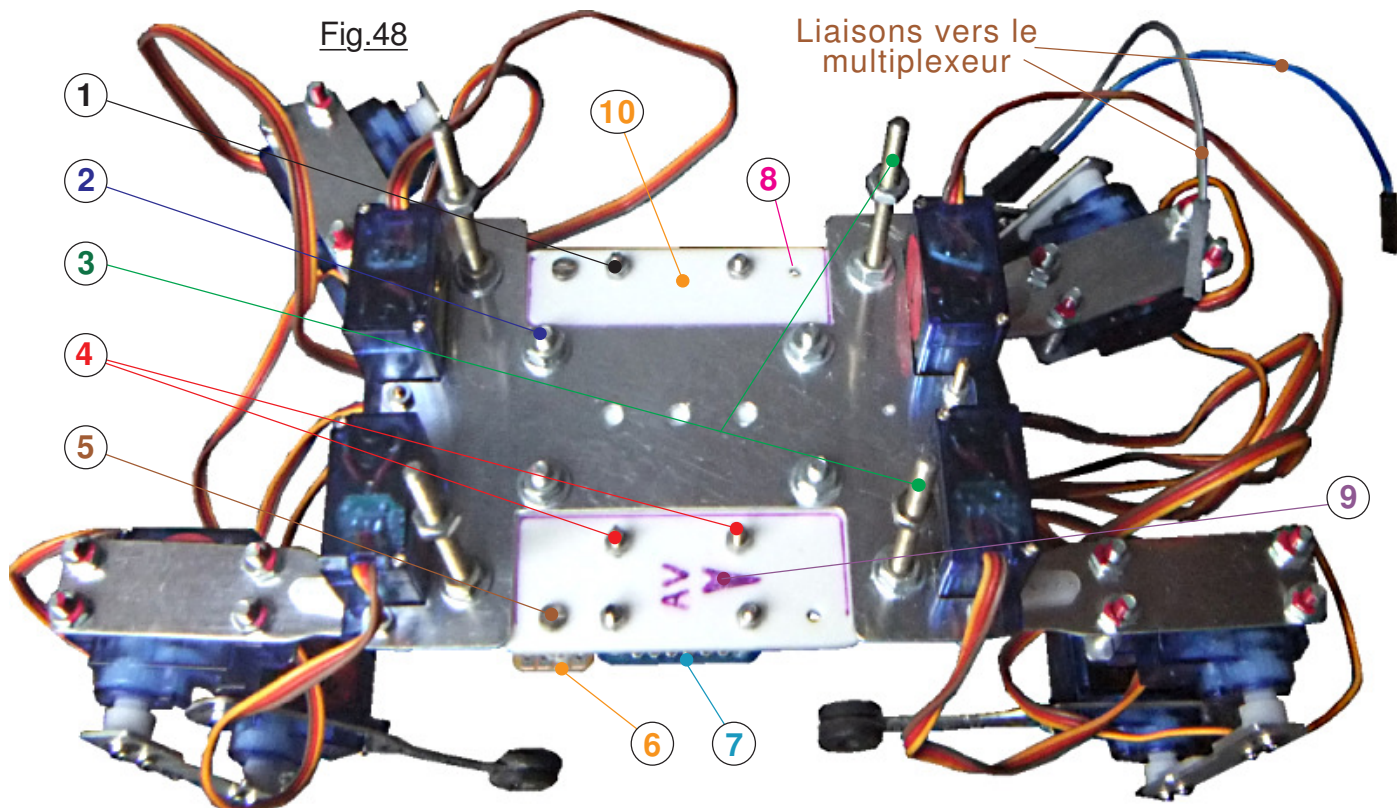
**L**ogiquement nous pourrions penser que débiter l'assemblage du petit robot avant d'avoir fini la réalisation de tous les circuits imprimés relève d'un manque de stratégie manifeste. Il n'en est rien, car l'expérience acquise lors du développement du prototype nous permet une optimisation par simplification des manipulations à conduire. Quand la structure principale de JEKERT est achevée, concrétiser le dernier circuit imprimé de complément est bien plus aisé, car on peut positionner avec précision et directement la cellule photorésistante ce qui n'était pas le cas en cours de développement. (Le filtre de couleur étant à sa place sur la **Jambe A.**)

### ➤ Préparation de la plaque qui supporte le multiplexeur.

**T**erminer entièrement cette pièce est absolument vital pour pouvoir réellement débiter l'intégration. Sur le prototype il a été procédé à de multiples montages/démontages, inévitable quand on crée à partir de rien. On y va progressivement, pas à pas ce qui oblige souvent à déposer des organes pour pouvoir percer de nouveaux trous sur une plaque, ajouter un connecteur etc. La gestation du projet a demandé plus de sept mois. Pour les lecteurs de ce didacticiel c'est différent. Il vous suffit de prendre en compte l'intégralité de la solution possible et dès le début de terminer chaque élément avant de l'ajouter sur la structure. Donc, la première chose à faire consiste à créer la petite plaque support du multiplexeur **10** qui se visse sur le châssis par les boulons  $\phi$  M3 repérés **2** sur la Fig.48 qui représente l'état actuel de la sonde. En réalité, vous l'avez bien compris, sur la photographie qui montre JEKERT retournée sens dessus dessous, la plaque **10** est terminée et remontée sur le châssis. (Remarquez que pour faciliter le travail sur le dessous, les Tibias et les Griffes ont été placés manuellement vers le dessus de la sonde. Donc sur le

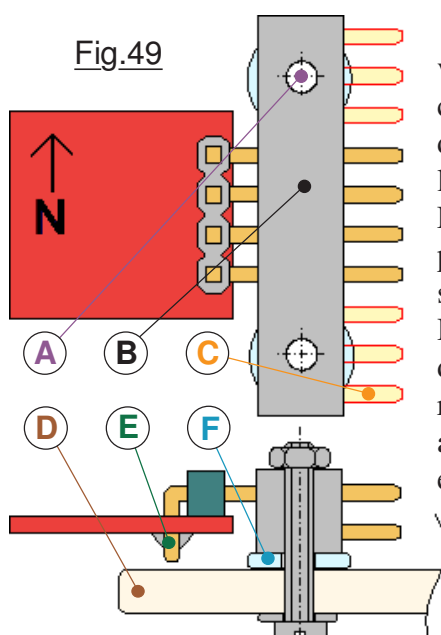


dessous de l'image puisque JEKERT est retournée.) On distingue en 8 les deux trous pour la traversée de boulons  $\phi$  M2 qui serviront à supporter le petit circuit imprimé du luxmètre non encore défini. En 5 on distingue les petits boulons  $\phi$  M2 qui soutiennent le circuit imprimé 6 du condensateur de 470 $\mu$ F. Notez au passage qu'en 9 on trouve le tracé du contour du châssis et le sens de remontage de ce dernier. Le contour servait à vérifier que les divers trous soient assez éloignés du châssis pour ne



pas que les écrous et les rondelles n'interfèrent matériellement avec ce dernier. Quand au sens, sachez que la symétrie des divers éléments mécaniques n'est pas parfaite, aussi repérez systématiquement pour chaque élément son orientation. (C'est à dire où se trouve l'avant et le dessus.) On retrouve facilement sur cette image les quatre boulons  $\phi$  M3 longs 3 qui forment la structure rigide reliant le châssis avec le circuit imprimé principal et avec le bouclier. Enfin en 4 on constate la présence de deux petits boulons  $\phi$  M2 qui servent à assurer la liaison entre 10 et le connecteur de la boussole statique. Le multiplexeur 7 est également en place.

### ➤ Le support du compas magnétique de route.

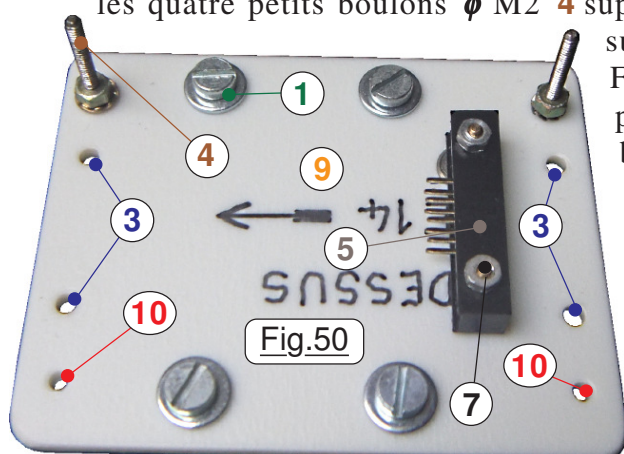


Depuis le chapitre 8 de la page 11 nous savons vaguement qu'il est glissé en dessous du multiplexeur comme le montre vaguement la Fig.2, et l'on ne peut pas dire que c'est suffisant pour comprendre les détails de son intégration. Le but de ce chapitre est de clarifier la situation sur ce point. Considérons la Fig.49 qui présente la boussole vue de dessus et de profil.

En D se trouve le support du multiplexeur qui est immobilisé sur la pièce en H du châssis. Pour ne pas que les picots soudés E ne buttent sur D ce qui inclinerait le petit module, il faut utiliser un connecteur HE14 femelle B à double rangées de lyres. Ainsi en insérant le module dans les picots du haut, on surélève le petit circuit. C'est insuffisant, raison pour laquelle on intercale une rondelle épaisse F. On retire avec une petite pince les 12 lyres telles que C pour dégager les extrémités. Pour immobiliser le connecteur B on le perce en A par des trous de diamètre 2,4mm. Il suffit alors de percer deux trous de passage des vis de liaison sur la plaque D de support du multiplexeur et du C.I. du condensateur de 470 $\mu$ F.

## ► Installer la plaque supportant le multiplexeur.

**F**orcément l'une des toutes premières phases de l'intégration des systèmes puisqu'elle supporte tout ce qui se trouve sur le dessus, et n'autorise la mise en place du circuit imprimé principal que lorsque tout ce qui dépasse sur le dessous est en place. C'est à dire que le connecteur de la **boussole** et les quatre petits boulons  $\phi$  M2 **4** supportant les circuits **2** et **11** de la Fig.47 sont immobilisés sur **9**. La plaque **9** entièrement percée est montrée sur la Fig.50 avec tous les repères identiques à ceux du dessin précédent. Notez qu'il est conseillé de mettre les deux petits boulons **4** en place avant d'installer la plaque **9** sur le châssis **6**, c'est plus facile. Pour le moment ne pas immobiliser définitivement le multiplexeur car pour brancher la ligne sur **5** il faudra l'écarter de la plaque **9**. Portons un petit regard sur [Image 17.JPG](#) qui présente la plaque en cours de finition. Vous pouvez vérifier que les trous sont assez éloignés du contour du châssis, il n'y aura aucun problème pour le passage des vis et des rondelles d'appui.



**B**ien qu'assembler la plaque **9** sur le châssis par ses quatre petits boulons courts  $\phi$  M3 pourrait sembler évident, concrètement c'est une opération assez délicate qui mérite patience et surtout de bien préparer le travail. L'ensemble des **Jambe** a été écarté de la zone d'intervention, mais forcément se trouve en position de vulnérabilité, sans compter que régulièrement un **Tibia** ou une **Griffe** se positionnera exactement dans l'espace pour masquer un trou de passage ou la vis sur laquelle on tente désespérément de placer un écrou. N'oubliez pas que l'insecte mécanique sera retourné dans l'une des deux mains, et qu'avec l'autre il faudra déplacer la petite visserie, les pinces, les clefs de serrage. Bref, il faut avoir des mains de sage-femme ! Aussi, installez-vous confortablement, soignez l'éclairage et armez-vous de patience, car le minuscule écrou  $\phi$  M2 qui vous échappe va ricocher sur le parquet et aller se cacher malicieusement sous le meuble le plus éloigné. (*Si, si, je vous assure que c'est ce qui va se passer. Du coup mon épouse est contente, car pour retrouver le précieux écrou en question j'ai entièrement fait le ménage de la pièce et en particulier sous les meubles ... et je n'ai pas retrouvé ce scongreigneugneu d'écrou  $\phi$  M2 !*)

Bon, restons ZEN et observons sur la Fig.51 la préparation initiale du sous-ensemble juste avant de l'intégrer définitivement sur la structure.

**L'**ordre d'assemblage des divers éléments qui s'impose pour rendre l'opération aussi aisée que possible aboutit au protocole suivant : On a réalisé la ligne électrique **X** qui se branche sur le connecteur HE14 de la **boussole** dédié sur le circuit imprimé principal à la ligne de dialogue I2C. Pour le moment, en **8** le module du condensateur est flottant, et le multiplexeur aussi car il faut pouvoir les soulever légèrement pour passer les vis et les rondelles  $\phi$  M3 de fixation de la plaque **9** sur le châssis **6**.

JEKERT retournée, on place **9** sur le châssis en prenant soin à ce que les vis de liaison ne ressortent pas des trous **Y**. Sur le châssis on place les rondelles, les écrous  $\phi$  M3 et l'on peut enfin procéder au serrage de ces derniers. Le dessous étant pour le moment accessible, on va dans l'ordre placer la visserie **10** et immobiliser le circuit imprimé **8**. Puis dans la foulée on termine la liaison rigide du module multiplexeur. On peut également assembler les deux petits boulons  $\phi$  M2 en **4** qui supporteront **2**. OUF, nous avons bien avancé. Les deux photographies

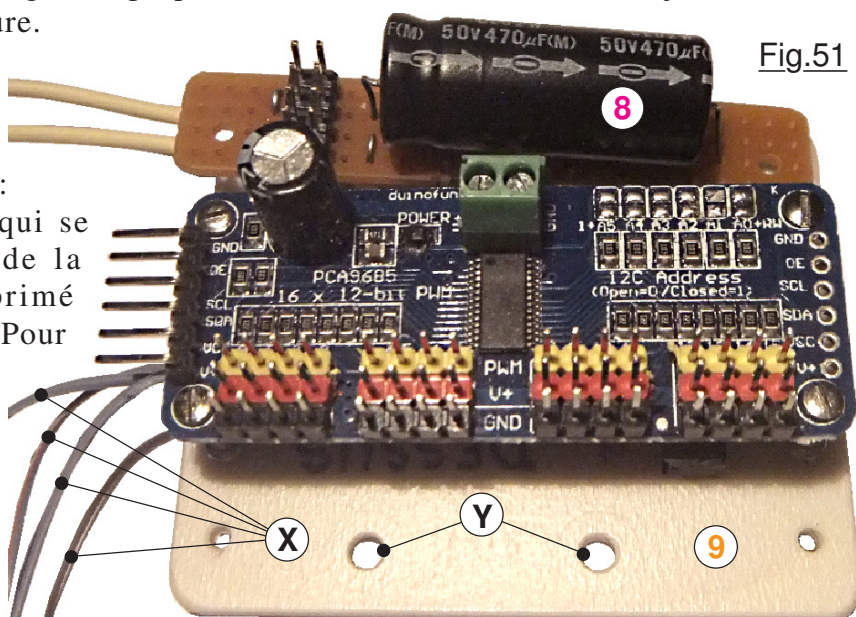




Image 18.JPG et Image 19.JPG doivent ressembler assez à ce que vous avez obtenu sauf que le fil inutile **GND** n'est pas présent chez vous. Quand à celui du **+5Vcc** qui va vers la mesure de tension sur **A7** vous l'avez remplacé par un tout petit fil électrique, ça va sans dire !

### ➤ Les bigoudis : Tournicoti tournicoton.

**A** ce stade de l'intégration des systèmes, il devient important de rebrancher les douze liaisons électriques entre les servomoteurs et le module multiplexeur. Tenter d'intégrer le circuit imprimé principal confine également à une opération assez délicate. Si les diverses liaisons des servomoteurs sont libres, elles brassent l'air et accrochent constamment tout obstacle se trouvant à leur portée dans leur environnement. Il suffit pour éviter ces phénomènes de brancher les petits connecteurs HE14. Hors cette opération impose de la pondération, car les uns sur les autres. Aussi, pour ne pas avoir à réitérer cette manipulation,

*contrairement à ce qui a été fait chronologiquement sur le prototype*, nous allons une permanente à JEKERT et élégance. "Coiffer" les lignes moteurs consiste à les raccourcir au maximum tout en leur laissant la souplesse indispensable aux mouvements mécaniques. Pouvant assurer des pointes de courant notables, les lignes qui alimentent les petits servomoteurs SG90 sont semi rigides. Si l'on effectue un pliage court, elles le conservent. Pour qu'en application de robotique elles puissent ne pas trop gêner les mouvements mécaniques, il faut leur laisser une longueur suffisante et les relier à la machine par une ample boucle plus ou moins courbe. L'encombrement en pâtit. Une solution très simple est possible puisque ces conducteurs électriques conservent une "mise en plis". Comme montré sur la Fig.52 le secret réside dans la queue de cochon. La ligne électrique est devenue courte et ne brasse plus l'air comme un sémaphore, tout en conservant une souplesse parfaitement opérationnelle.

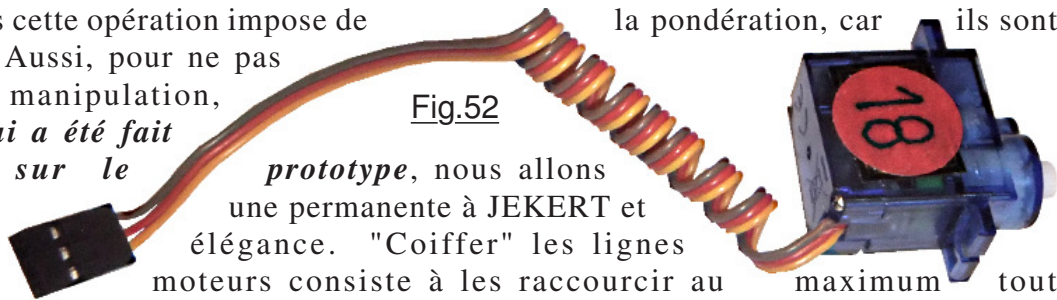


Fig.52

**La ZEN attitude :** Vous en avez forcément entendu parler. C'est une vue de l'esprit assez à la mode qui caractérise le comportement hypothétique d'un individu qui a laissé tomber ce @@@ d'écrou au sol. L'écrou est passé par la minuscule fente du plancher et se trouve définitivement perdu dans le vide sanitaire. Et bien ZEN reste courtois, pondéré, d'un calme olympien. Avec élégance il accepte ce petit aléa de la vie, et le convertit en une expérience tout à fait positive. **C'EST DU PIPO, ÇA N'EXISTE PAS nom d'un écrou @@@@ @@@@ @@@@ !!!**

**C**oiffer les clientes avec un tournevis fait partie des méthodes ultramodernes que l'on rencontre quand on fréquente une enseigne de marque branchée pour VIP. JEKERT manifestement en fait partie puisque la "presse people" de la Fig.53 montre comment on procède. Choisir comme en **1** un quelconque outil terminé par une tige cylindrique longue et fine. On enroule le fil tel que **5** sur un diamètre faible ce qui engendre des courbures rémanentes. La sonde est confortablement installée sur le bocal **4** sur son bouclier. Pour votre machine, ce sera sur le châssis dégagé dessous, puisque bouclier et circuit imprimé principal ne sont pas encore en place. À bien y regarder, on va constater que la petite machine comporte trois sortes de liaisons électriques différentes. Celles comme **2** qui vont des **Hanches** au multiplexeur. Les moteurs sont

immobiles sur la structure. De ce fait elles n'ont pas besoin de souplesse. On les bobinera sur la machine. Moins elles dépassent de la structure, moins il y aura de risque d'interférence avec les organes mobiles. Puis on trouve les moteurs des **Fémurs**. Ils occupent dans l'espace une position intermédiaire. Leurs lignes hélicoïdales seront courbées en une sorte d'arche pour les

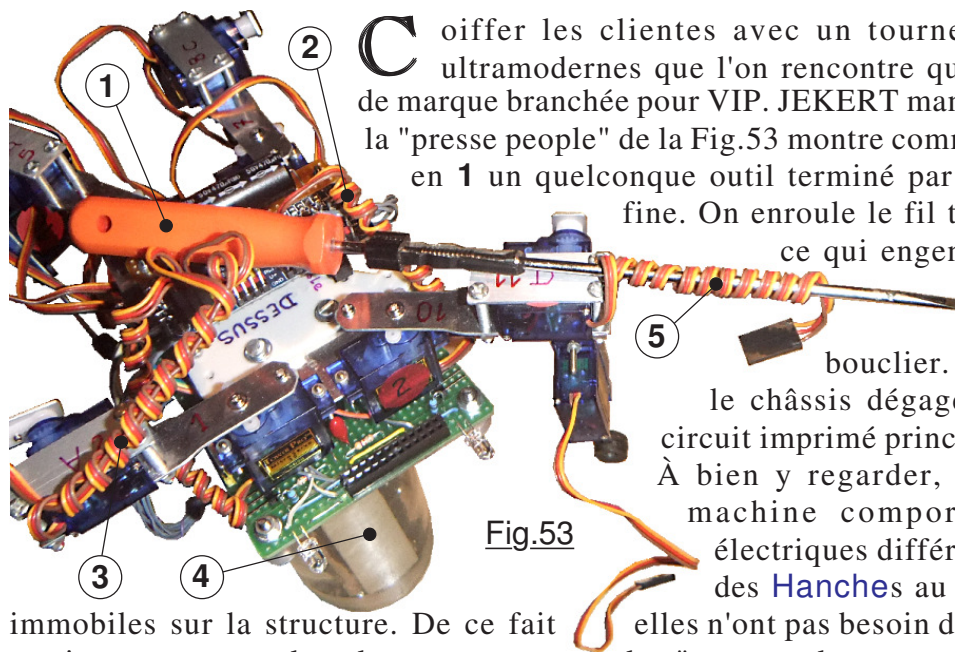
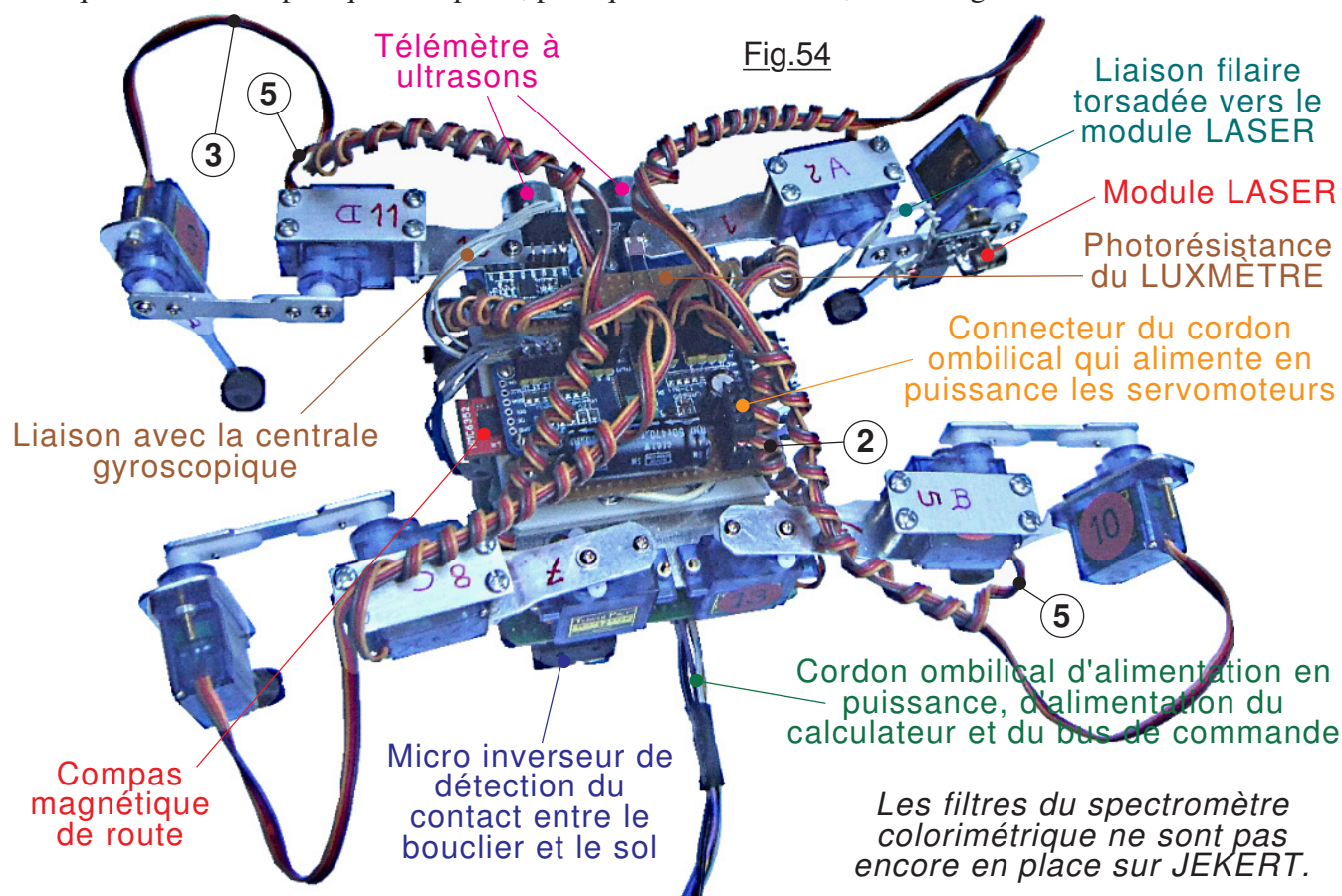


Fig.53

ponter sur le dessus de la sonde. Boudiner de cette façon les fils allant aux SG90 des **Genoux** ne conviendrait pas. En effet, les moteurs qui animent les **Griffes** sont un peu "loin". La ligne enroulée, inévitablement finirait par se mélanger avec les spires de celle des **Fémurs**. Pour contourner cette difficulté, la solution consiste, comme visible en **3**, à passer le fil de liaison à l'intérieur du "tuyau" que constitue la ligne torsadée du **Fémur**. Pour avoir une idée précise de ce à quoi ressemblera la sonde quand elle sera presque complète, pratiquement terminée, sur la Fig.54 JEKERT est en **VEILLE**.



Ben Mômôa quand j'ai voulu coiffer Grand mère avec un tournevis, elle m'a appris plein plein plein de noms d'oiseaux dont j'ignorais totalement l'orthographe !

## 22) Intégration de la grande carte électronique

**E**nfin JEKERT va grandir et adopter sa morphologie adulte. Avec la mise en place du circuit imprimé principal, la compacité du petit animal mécanique va prendre le dessus. Les divers modules seront réunis par des liaisons courtes. On se doute que l'assemblage final du circuit imprimé principal sur la structure représente une opération délicate. Les diverses lignes qui seront reliées sur les périphériques du dessus doivent avoir été correctement torsadées pour les compacter et en faire des lignes électriques plus résistantes mécaniquement. Elles sont réalisées les plus courtes possibles compatible avec des branchements/dépose aisés. Avant de concrétiser l'intégration définitive, il importe de procéder une dernière fois à des essais complets de l'intégralité de l'électronique. À l'usage, on constate que les LEDs d'Arduino, et particulièrement celle qui témoigne de la présence du **+5Vcc** rayonnent une clarté trop importante. Hors cette information n'est pas vitale, d'autant plus que sur le dessus le module du circuit multiplexeur pour son propre compte visualise la présence de l'énergie. Pour ne pas trop diffuser sur les LEDs d'état de la sonde, on a, comme présenté sur **Image 20.JPG** ajouté un petit masque en carton rigide. Sur la Fig.55 le circuit imprimé principal repose sur un bocal, le module météorologique **6** ainsi que le télémètre à ultrasons sont sur le connecteur HE14. On peut observer que les lyres des contacts électriques présentent un certain jeu. Étant en porte à faux le petit circuit **Bascule** en avant et pointe vers le bas. Il faudra le maintenir vertical par un dispositif mécanique quelconque. La liaison externe **2** vers le multiplexeur est branchée par des fils provisoires longs. Le module LASER **1** pend dans le vide.



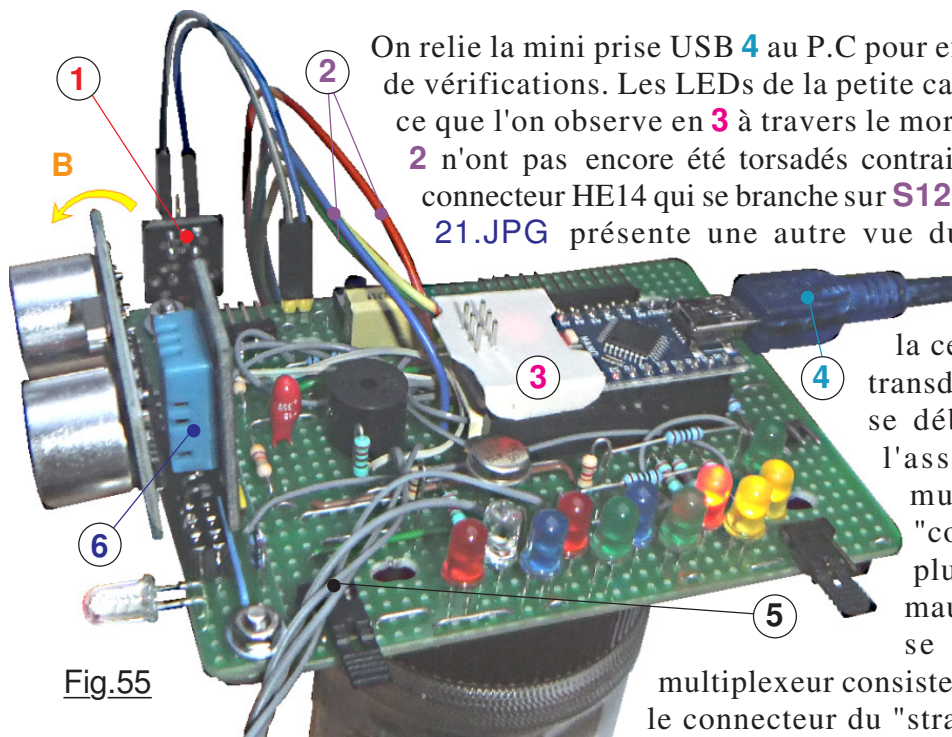


Fig.55

On relie la mini prise USB 4 au P.C pour effectuer cette dernière campagne de vérifications. Les LEDs de la petite carte Arduino NANO s'illuminent, ce que l'on observe en 3 à travers le morceau de carton. Les fils du toron 2 n'ont pas encore été torsadés contrairement à ceux de 5 qui vont au connecteur HE14 qui se branche sur S12 à S15 du multiplexeur. L'Image 21.JPG présente une autre vue du circuit en cours de dernière vérification pour le valiser et passer à l'assemblage. Quand la certitude prédomine, on retire les transducteurs, le LASER et tout ce qui se débranche. Avant de procéder à l'assemblage, la ligne qui va au multiplexeur est soigneusement "compactée" en X. Par ailleurs, le plus sûr moyen de ne pas avoir de mauvaise surprise avec la ligne qui se branche sur S12 à S15 du multiplexeur consiste à la brancher provisoirement sur le connecteur du "strap" de coupure de la LED verte.

Comme montré en Y de la Fig.56 un seul picot suffit. Puis, on a placé les quatre écrous et les quatre rondelles  $\phi$  M3 sur les vis longues de la structure. Tous les outils sont étalés sur le bureau. On prend JEKERT retournée dans la main, on amène imprimé principal, on vérifie bien qu'aucun petit fil souple n'est sur Image 32.JPG que le petit condensateur de entre les corps des deux servomoteurs. L'on place alors les rondelles isolantes rouges ainsi que les entretoises. On ajoute les rondelles métalliques d'appui et JEKERT est en configuration "sur le dos" pour mettre en place PROVISoirement le bouclier.

(Pour bien comprendre la manipulation, consultez la Fig.59 donnée en page 39 qui présente la sonde dans la posture permettant de réaliser cette phase de finalisation de la structure du corps du petit robot.)

En effet, ainsi complétée, la sonde sera pratiquement en apparence définitive. On pourra la placer sur son bouclier et continuer l'intégration des autres éléments, réaliser les lignes électriques non encore disponibles. Ce n'est que tout à la fin, JEKERT étant entièrement terminée, que l'on aura peut être à redémonter le bouclier pour modifier le cordon ombilical. Comme il n'y aura que les quatre écrous inférieurs à déposer, ce sera facile.

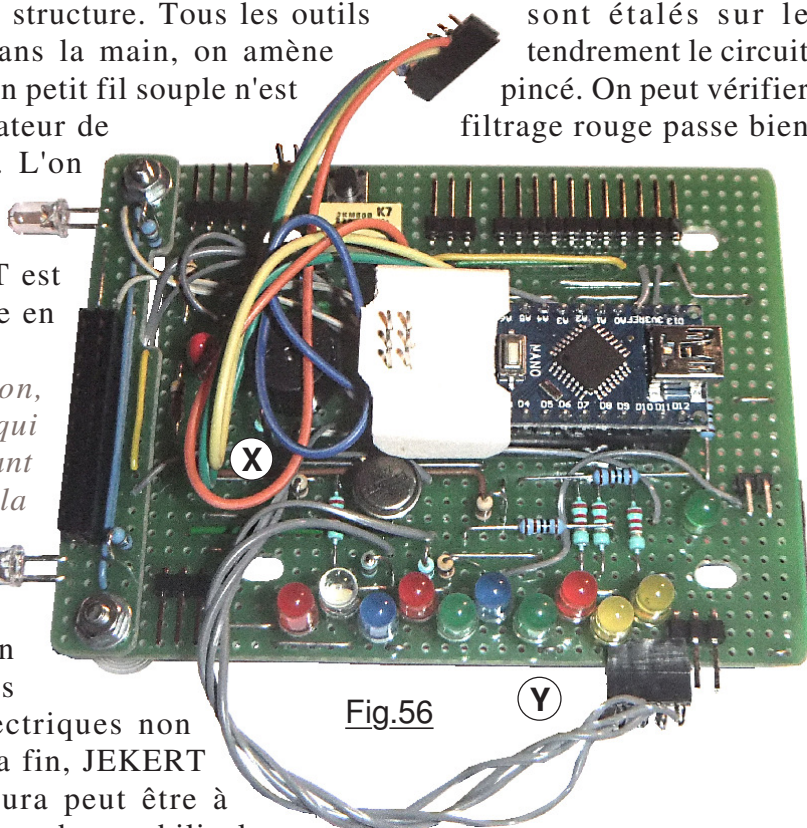
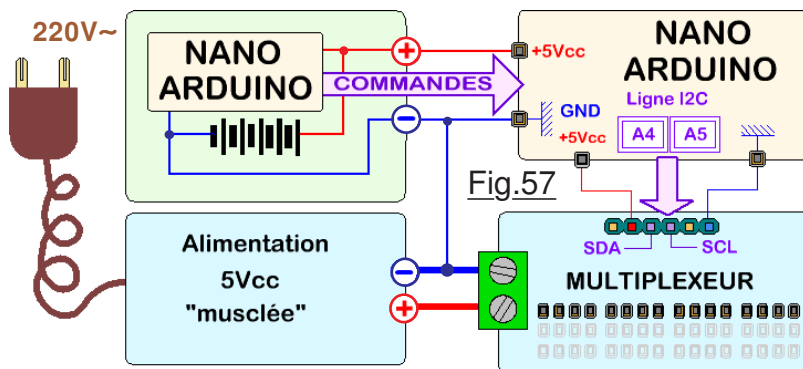


Fig.56

### ➤ Solution retenue pour alimenter en énergie.

Finalement, c'est la solution de la Fig.57 qui a été retenue pour la "version P.C", une version possible pour concrétiser le "+5V musclé" étant décrite en détails pour ceux qui n'en disposent pas, dans le document Alimentation secteur pour la Motorisation.pdf. Tant qu'à avoir "un fil à la patte qui oblige à limiter le lieu des démonstrations à l'environnement immédiat de l'ordinateur, autant profiter du secteur 220V alternatif pour fournir l'énergie de puissance. Quand on passera éventuellement à la version autonome avec pupitre de commande, la sonde ne verra pas la différence, car seule l'extrémité du cordon ombilical sera modifiée. En réalité, sur la version de luxe la

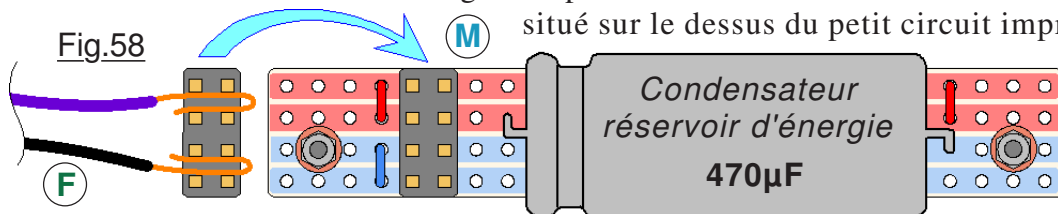


ligne sera doublée d'une liaison supplémentaire à deux fils de faibles sections pour assurer le dialogue. Donc on devra réaliser un cordon ombilical avec deux fils de puissance, deux lignes plus petites pour l'alimentation de la carte Arduino, et des fils pouvant adopter des sections très faibles pour le bus de **COMMANDE**. Dans le cas d'un pilotage avec l'**IDE** on se contentera de ce que l'on

va faire dans ce chapitre, c'est à dire de ne réaliser que le cordon ombilical de puissance. Si un jour vous franchissez le pas pour un pilotage autonome, il suffira de déposer le bouclier et de compléter le cordon ombilical avant de le réinstaller sur JEKERT.

### ➤ Préparer un cordon ombilical provisoire.

**P**réalable à l'assemblage du bouclier, il faut disposer de la ligne électrique qui assurera l'alimentation électrique des servomoteurs, car elle conditionne la mise en place du bouclier. En effet, elle est coincée entre ce dernier et le circuit imprimé principal. Un petit retour sur la Fig.46 remémore la toute première approche qui consistait pour alimenter les moteurs à souder deux gros fils sous le circuit imprimé du condensateur de 470µF. Puis estimés trop rigides, les deux fils **2** et **4** ont été oubliés. La ligne de puissance se branche actuellement sur le connecteur HE14



situé sur le dessus du petit circuit imprimé. Pour minimiser les résistances électriques des contacts entre les broches, sur le circuit imprimé on place en **M** de la Fig.58 un **connecteur** HE14 **mâle** à huit picots. En effet, une règle élémentaire de sécurité fondamentale consiste à **toujours placer en "sortie d'une ligne électrique quelconque" des prises femelles** pour éviter des contacts accidentels. Le cordon ombilical de puissance sera donc branché sur le dessus à l'aide d'une petite fiche HE14 femelle **F**. Quatre picots sont soudés sur le **+5Vcc** dont le fil est violet sur le prototype. Quatre autres lyres sont soudées sur **GND** dont l'isolant du fil est noir.

**L'**environnement de développement n'est pas forcément très lumineux. En particulier quand la nuit est tombée, (*La pauvre, passer sa vie à tomber, c'est un coup à se faire mal ça !*) et que seule la lampe du bureau de l'ordinateur éclaire le clavier. La sonde est alors dans une zone de pénombre. Hors durant les procédures de tests, on branche, on débranche, on mesure des tensions. Bref, il faut y voir un minimum. L'**Image 23.JPG** montre une petite baladeuse électrique improvisée qui fait partie intégrante du matériel expérimental du laboratoire Arduino. Pour pouvoir la brancher facilement sur la sonde, comme sur le dessus de cette dernière on dispose de place, la petite prise **F** a été complétée en soudant en gigogne une deuxième couche femelle picot à picot. L'**Image 24.JPG** présente en gros plan la fiche double gigogne qui amène l'énergie sur les servomoteurs. Notez que sur **Image 25.JPG** la ligne part directement sur le coté de la sonde. Les picots soudés sont "barbouillés" en rouge d'un coté et en vert de l'autre pour éviter une inversion accidentelle de branchement lors des nombreuses manipulations de mise au point de la petite machine.

### ➤ Mise en place du bouclier de protection.

**P**hase ultime de concrétisation de la structure résistante de JEKERT, on a branché **la ligne d'alimentation**. Peu importe ce qui sera branché à son autre extrémité. **Sa longueur** sur le prototype **est d'environ deux mètres** ce qui me semble amplement suffisant car logiquement le petit robot ne franchira probablement jamais de longues distances. Aussi, tout au moins pour l'usage que j'en fais, deux mètres sont plus que suffisants. Revenons analyser le croquis de la Fig.28 en page 22. Le cheminement de cette ligne électrique y est représenté en violet. La structure globale est représentée en **3** pour le châssis, avec les vis longues **4** qui solidarissent le circuit imprimé principal **5** et le bouclier **6**. Sortant sur le coté du connecteur **1**, la ligne longe en **A** le flanc tribord de la sonde. (*Observez la Fig.60 sur laquelle le faisceau en zone **A** est bien visibles en **5** et*



**6** descendant et partant vers l'intérieur) Puis de l'intérieur il passe vers bâbord en **B** pour ressortir en **C** et passer vers l'avant en restant au-dessus du bouclier **6**. La photographie de l'**Image 26.JPG** montre la ligne ombilicale complète (*Version de luxe.*) sortant sur bâbord avant d'être pliée vers le dessous pour passer vers l'avant au dessus du bouclier. Courbée alors vers l'arrière en **D** elle passe en **E** entre le bouclier **6** et le circuit imprimé principal **5**. Puis, coincée entre les deux elle ressort vers l'arrière en **F** pour aller se poser au sol par souplesse. Mis à part le fait que sur la photographie le cordon ombilical est complet, la Fig.59 montre JEKERT en position pour recevoir le bouclier. Les divers fils qui constituent le cordon ombilical sont torsadés en torons pour renforcer leur tenue mécanique et compactés

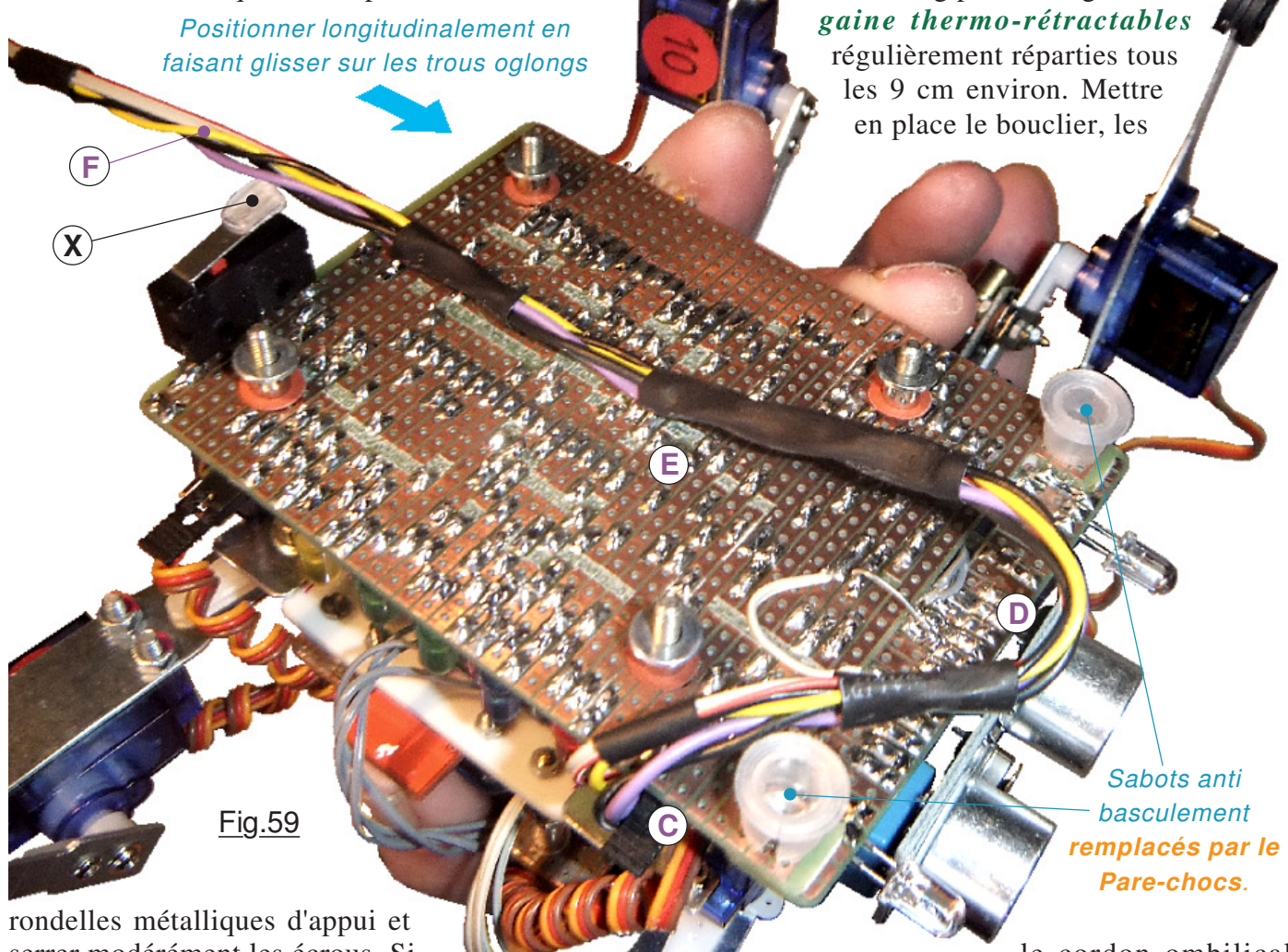


Fig.59

rondelles métalliques d'appui et serrer modérément les écrous. Si est définitif, munir les écrous des sabots avant leur mise en place. Sur la Fig.59 en **X** se trouve une petite butée autocollante en caoutchouc synthétique. Elle a été remplacée par la petite bague en caoutchouc de la Fig.39 car elle se décollait et ne restait pas à demeure. Notez au passage que l'assemblage du bouclier n'est pas spécialement compliqué. On ne peut pas poser la petite mécanique qui reste constamment dans notre main. Seule l'autre est disponible. Aussi, pour mener à bien cette opération il importe de bien préparer tous les outils dont on aura besoin à l'avance. Par ailleurs, le cordon ombilical de deux mètres ne demande qu'à compliquer les choses. Aussi il convient, avant de commencer la manipulation, de l'enrouler et le maintenir dans une boucle avec du petit fil rigide.

#### ➤ Un petit résumé de la connectique sur tribord.

Maintenant que l'on peut poser JEKERT sur son bouclier et que la structure principale est en place, nous allons compléter la machine en assemblant les divers modules scientifiques. Avant de continuer la description, il me semble utile de vous présenter le flanc tribord de la machine avec tous les connecteurs en place, histoire de faire un petit résumé d'anticipation.

La Fig.60 est une photographie réalisée avec la sonde en version ultime, c'est à dire celle qui se pilote avec une raquette de commande. Sur cette vue les sabots anti-basculement **11** sont en place, mais pas encore ceux du bouclier. Le bouton de RESET est parfaitement visible. Le connecteur initialement prévu pour brancher un potentiomètre supporte maintenant en **8** un petit



adaptateur pourvu d'une LED rouge. (Les explications le concernant ainsi que son utilité seront abordées dans le document sur le pupitre.) Ce qui frappe le plus quand on regarde cette image, c'est la compacité matérielle. On peut affirmer qu'il n'y a pas beaucoup de place perdue à l'intérieur de la structure. Si une mouche veut traverser, il vaut mieux qu'elle se munisse d'un GPS ! En 1 se trouve le gros fil GND actuellement inutilisé et replié vers l'intérieur. Partant du dessous, on voit monter en 2 la ligne à quatre couleurs qui se branche sur le multiplexeur. Le paquet de fils qui sort en 3 est en réalité la continuité de 12. Cette ligne part du petit connecteur HE14 à six broches qui véhicule la ligne I2C vers la boussole et vers la centrale gyroscopique. Le gros barreau 4 n'est pas autre chose que le +5Vcc du "circuit 470µF" qui se branche sur le connecteur HE14 à quatre picots en 10. Sur votre exemplaire, c'est un tout petit fil comme ceux de 3 par exemple. En 5 et 6, torsadés intimement, transitent les deux fils de section moyenne constituant le cordon ombilical de puissance 5Vcc. La petite ligne torsadée 7 vient de la cellule photorésistante du luxmètre colorimétrique. En

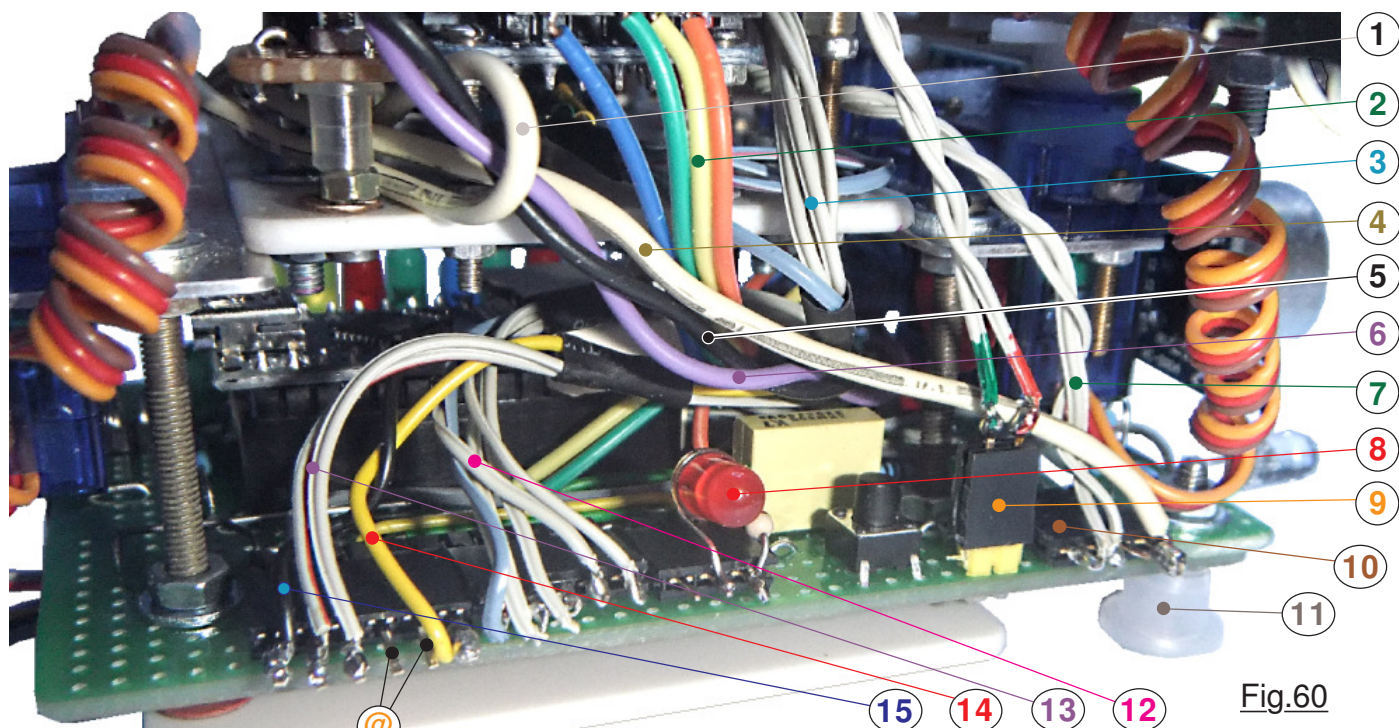


Fig.60

9 est branchée la ligne filaire, également bien torsadée, qui alimente le LASER. Notez que pour diminuer le risque d'inversion lors des nombreux essais, les deux fils sont colorés pour en repérer la polarité. Le cordon ombilical qui relie la carte Arduino de la sonde à celle de la raquette de commande est branché sur le connecteur situé en bas à droite. Initialement six fils étaient prévus. Dans la version définitive seuls quatre sont utilisés, les deux picots @ restant non soudés. En 13 nous avons la ligne de dialogue croisée TX / RX dont la fonction sera détaillée dans le document réservé à la confection du pupitre. Le fil jaune en 14 est soudé sur le picot le plus à droite sur le connecteur. Il amène le +5Vcc au calculateur de bord. En 15 c'est GND qui est soudé sur le premier picot. Ces deux fils constituent la ligne énergétique pour l'Arduino NANO de JEKERT. Vu que le courant total peut aller jusqu'à 90 mA, (Voir la fiche signalétique en page 4.) on utilise deux fils de section plus importantes que ceux des minuscules lignes ne véhiculant que des signaux binaires.

### ➤ Souder les petits fils sur les non moins petits connecteurs HE14.

Opération d'une banalité à pleurer pour un électronicien averti, arriver à souder ces minuscules conducteurs sur les broches des connecteurs HE14 sans faire de court circuit intempestif avec la broche voisine peut tourner au cauchemar pour la roboticienne ou le roboticien occasionnel si l'on ne s'y prend pas correctement. Par correctement, il faut interpréter comme "*Se faciliter la mission en préparant bien son travail*". Pour que cette manipulation ressemble à de la routine, deux conditions seront réunies en préalable : Le petit connecteur HE14 qu'il soit mâle ou femelle sera bien tenu dans l'espace et ne bougera pas quand on va appliquer le fil de soudure. (Inutile de vous préciser que le fer à souder est bien adapté à ce travail d'orfèvre. C'est un petit modèle avec une pointe fine. Le rouleau de soudure est de première qualité et de petite section.)



Sur [Image 27.JPG](#) il s'agit d'une simple pince à auto serrage. Comme elle n'est pas assez stable, ce que ne montre pas la photographie, c'est que par dessus est posé une autre grosse pince plus massive pour faire poids. La deuxième condition réside dans la facilité à enrouler les tout petit fils électriques autour des broches du connecteur. Cette phase est particulièrement indigeste quand on tente directement l'opération sur le connecteur. Elle devient totalement aisée si on commence, comme montré sur [Image 28.JPG](#), à donner au conducteur en cuivre la forme d'une queue de cochon s'enroulant exactement sur la broche du connecteur HE14. Pour réaliser cette préparation, on a récupéré la lyre d'un connecteur dont les broches sont longues et l'on s'en sert de gabarit.

### 23) Intégration des capteurs situés à l'avant.

**L'** encombrement du capteur météorologique et celui du télémètre à ultrasons étaient pris en compte lors de leur implantation sur le circuit imprimé principal. Bien que relativement volumineux, ces deux modules ne posent donc pas de problème d'interférence, tant avec le corps fixe qu'avec les éléments mobiles. Par exemple sur [Image 29.JPG](#) le module météorologique passe très en dessous de la **Hanche** de la **Jambe D**.

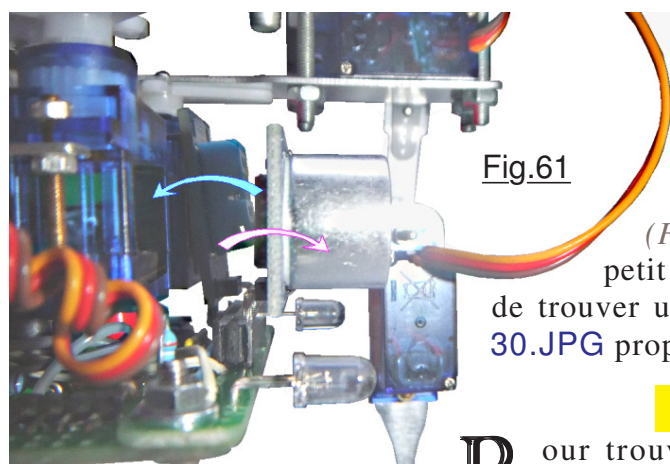


Fig.61

Bien que de mauvaise qualité, la Fig.61 qui observe la sonde vue du coté tribord montre que le jeu dans les lyres du connecteur laisse le module météo basculer à gauche. (*Flèche bleue.*) Le module à ultrasons pour son compte se penche vers l'avant. (*Flèche rose.*) Pour le petit module bleu ce n'est qu'un petit détail esthétique, pour le capteur ultrasons il importe de trouver une solution mécanique pour le redresser. L'[Image 30.JPG](#) propose une vue plongeante proche des deux capteurs.

#### ➤ Immobiliser les deux capteurs.

**P**our trouver une solution mécanique simple, considérons [Image 31.JPG](#) sur laquelle il est manifeste que l'écrou  $\phi$  M2 qui solidarise le servomoteur sur le châssis dépasse légèrement en hauteur au dessus du circuit imprimé du module capteurs à ultrasons. Ce détail permet d'agencer une toute petite bride métallique. Proposée en Fig.62 le dessin représente le petit servomoteur immobilisé sur le châssis **6** par l'écrou de liaison **E** la petite bride **4** qui plaque vers la gauche le quartz **5** du module ultrasons. Le module météorologique **3** est maintenu bien vertical par le petit bloc de mousse synthétique **2** intercalé entre son circuit imprimé et le servomoteur de la **Jambe D**. Comme **3** prend appui sur les dépassements de composants du module ultrasons, (*Pas de problème électrique car le boîtier bleu clair est isolant.*) l'ensemble est entièrement solidaire et plus rien ne peut bouger.

Sur la Fig.63 le petit bloc de mousse synthétique **2** est à peine visible.

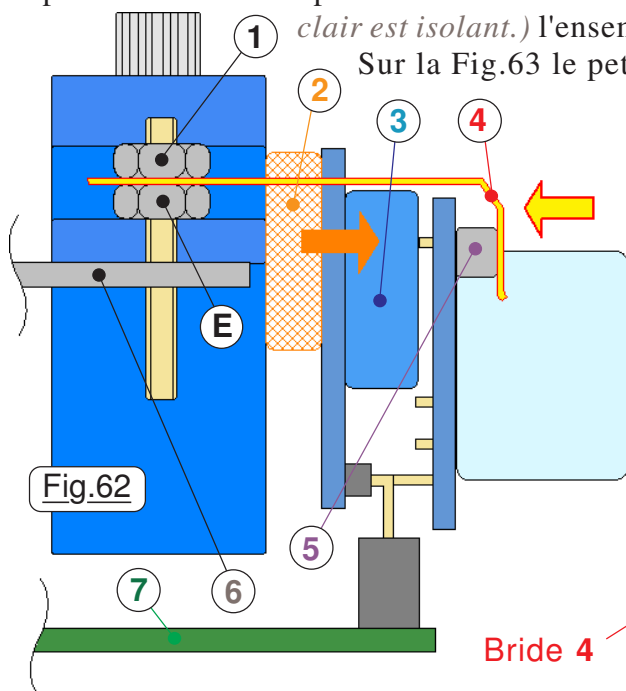


Fig.62

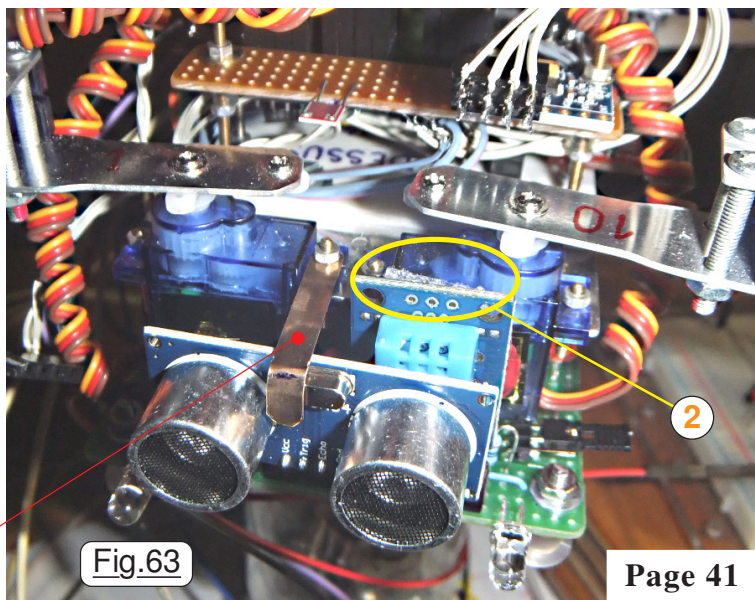


Fig.63

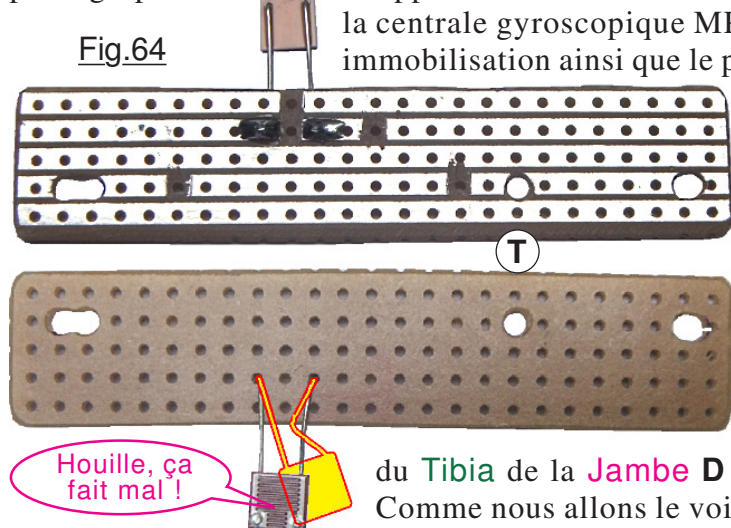
Bride 4

## 24) Circuit imprimé du luxmètre photorésistant.

**D**urant ce chapitre, nous allons nous égarer un peu dans l'historique de la conception, car les photographies proposées sont réalisées chronologiquement et simultanément à l'avancement du projet. En ce qui vous concerne, ce sera bien plus facile, car la solution définitive étant connue, il vous sera possible de réaliser entièrement le petit circuit imprimé avant de le placer sur la sonde. C'est parti, remontons le temps par un petit regard attendri sur la Fig.8 pour se remémorer le schéma électrique du luxmètre. Cette expérience scientifique ultra compliquée ne mobilise que la photorésistance et la résistance de  $1k\Omega$  pour former un diviseur de tension présenté à A6. Sur la Fiche n°7 on vérifie que la résistance de  $1k\Omega$  est logée sur le circuit imprimé principal, donc sur le circuit imprimé de complément, seule sera soudée la cellule photorésistante.

### ➤ Réaliser le circuit imprimé du luxmètre.

**I**nitiallement, le spectromètre colorimétrique n'était qu'une vague hypothèse dont la faisabilité restait à démontrer. Aussi, la cellule photosensible a été simplement dirigée vers le haut et placée un peu vers le centre, pas trop loin du Fémur de la Jambe A en vue d'expérimentations chromatiques futures. Le circuit imprimé tel qu'il se présente sur la Fig.64 correspond à la configuration initiale, la cellule est perpendiculaire au bord de la petite plaque préperçée. Cette photographie est



du Tibia de la Jambe D éliminant tout risque d'interférence matérielle. Comme nous allons le voir dans les chapitres qui suivent, telle qu'elle est positionnée à l'origine la cellule n'est pas située au bon endroit en dessous du filtre chromatique pour le spectromètre colorimétrique. Aussi, sur le prototype, il a fallu la torturer un peu en pliant à angle droit le fil rigide de droite comme dessiné à l'échelle sur la photographie. En ce qui vous concerne, il tombe sous le sens que vous aller procéder avec méthode et la

placer sans la torturer directement en bonne orientation. Autrement dit, les deux tiges de raccordement de la cellule resteront rectilignes, la zone sensible étant placée bien en coïncidence avec le centre des secteurs colorés lorsque le filtre est immobilisé sur le Fémur de la Jambe A. (Voir la Fig.65)

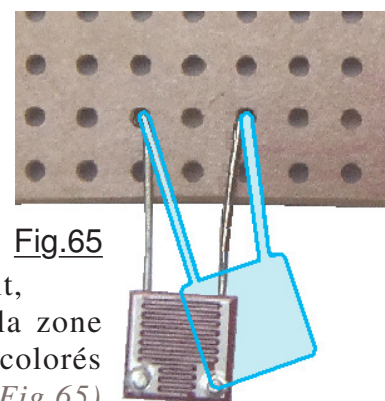


Fig.65

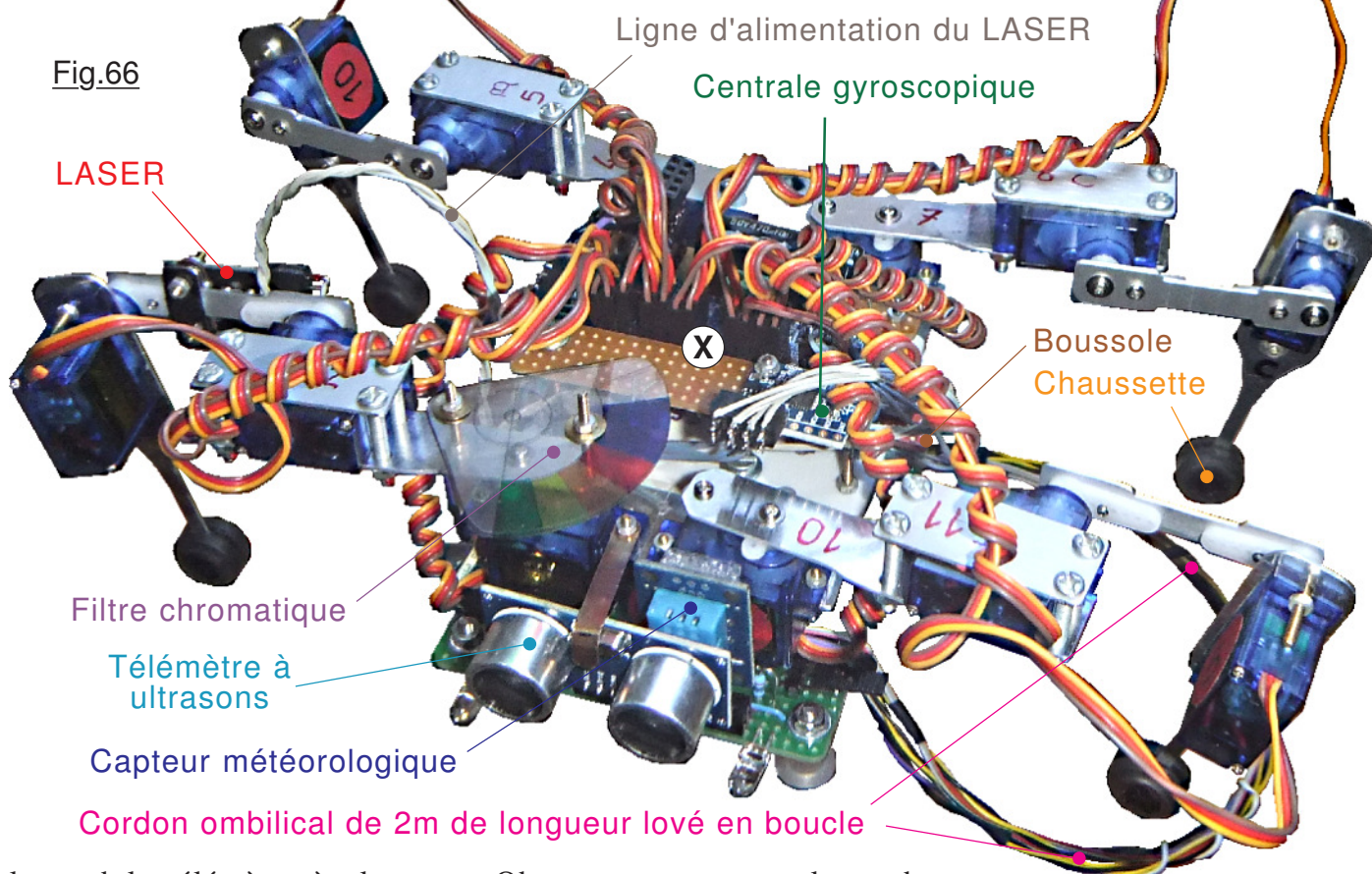
### Protocole pour déterminer la position de la cellule photorésistante :

**S**implicisme à exprimer on se contente de placer provisoirement le circuit imprimé sur les boulons 4 de la Fig.50 pour avoir sa position exacte. Puis on installe les filtres colorés sur le Fémur de la Jambe A. On peut alors avec précision repérer la position précise à imposer au petit carré photoélectrique. On plie alors ses deux fils rigides pour qu'ils traversent les deux trous du petit circuit imprimé. Il n'y a plus qu'à tout redémonter et terminer les soudures sur la plaque préperçée. La photographie d'Image 33.JPG présente le prototype sur lequel on a démonté la Jambe A pour y fixer le filtre polychrome du spectroscopie colorimétrique. Le circuit imprimé de la photorésistance était à ce stade entièrement terminé et branché sur l'électronique générale du circuit imprimé principal. Pour son compte, Image 34.JPG présente la sonde terminée, sachant que dans votre cas ce sera exactement pareil mis à part le fil non tordu à angle droit sur la cellule photorésistante.

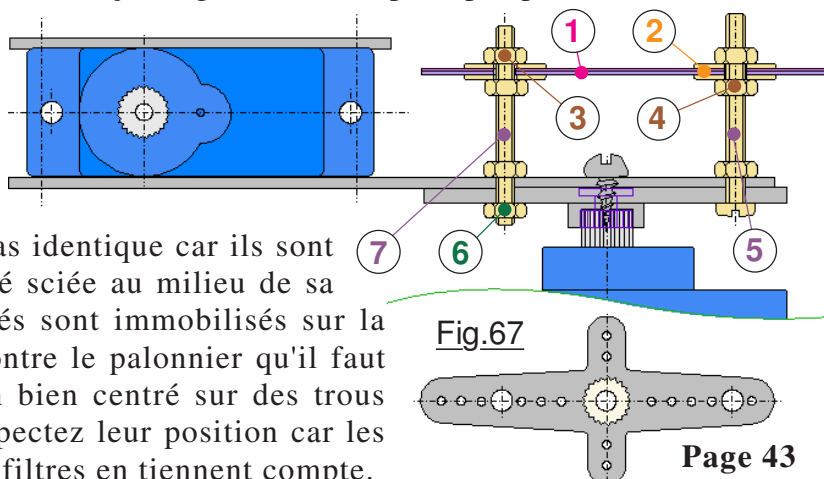


## ➤ Installer le filtre coloré du spectrographe.

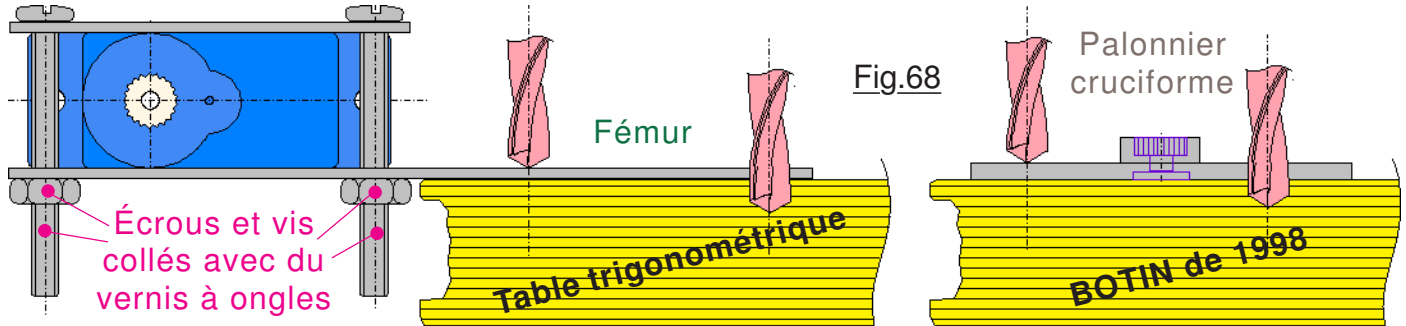
Opération qui suppose que le filtre a été découpé et percé convenablement, travail qui sera décrit dans le prochain chapitre. Toutefois, on comprendra mieux la constitution géométrique du filtre quand son immobilisation sur le **Fémur** de la **Jambe A** sera préparée et les éléments nécessaires disponibles. JEKERT est entièrement achevée sur la Fig.66 dans sa version ultime et au repos sur ses sabots. Tout à fait sur le dessus on observe facilement la présence du filtre chromatique immobilisé par deux petits boulons  $\phi$  M2 qui dépassent sur le dessus des secteurs colorés. Compte tenu du faible surpoids qu'ils entraînent, inutile de les raccourcir. La boussole cachée par les fils des servomoteurs est à peine visible. On distingue bien le petit bloc de mousse synthétique qui cale le capteur météorologique et



le module télémètre à ultrasons. Observez au passage le cordon ombilical lové sagement en une boucle de faible diamètre pour ne pas encombrer l'environnement exigü de l'ordinateur. En **X** on peut repérer la petite plaque marron du circuit imprimé de complément qui supporte le capteur du luxmètre. Il semble bien mal utilisé avec un faible taux d'occupation. En réalité les nombreux fils de liaison sont soudés sur le dessous. Sur la Fig.67 le filtre composé de deux couches de milard **1** est immobilisé de façon rigide dans l'espace par pincement entre deux rondelles plates larges **2**. Ces rondelles sont ajustées à la bonne hauteur et serrées l'une contre l'autre par les écrous **3** et **4**. Les éléments **5** et **7** qui servent de support au filtre participent également à la liaison entre le palonnier et le **Fémur**. Leur dépassement n'est pas identique car ils sont issus d'une vis dont la tige filetée a été sciée au milieu de sa longueur sous tête. Ces éléments filetés sont immobilisés sur la **Jambe** par les écrous **6**. Le dessin montre le palonnier qu'il faut percer à un diamètre d'environ 2,2mm bien centré sur des trous existants pour ne pas le fragiliser. Respectez leur position car les dessins à imprimer pour concrétiser les filtres en tiennent compte.



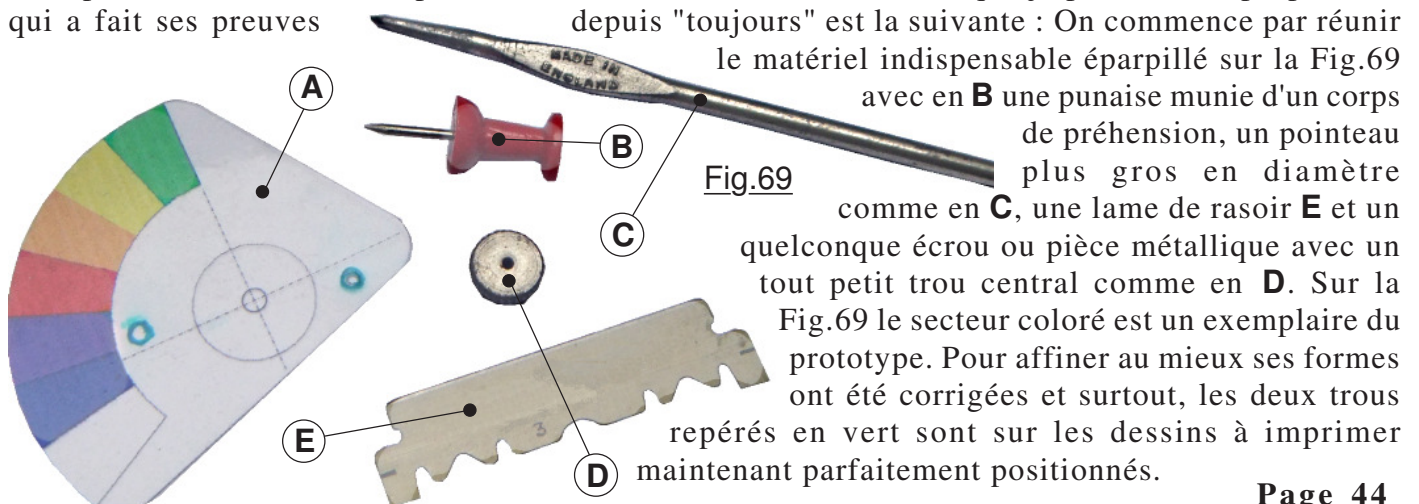
Sur [Image 35.JPG](#) la **Jambe A** a été déposée pour percer les deux trous de passage de la visserie **5** et **7**. Comme à ce stade du développement la sonde était achevée, le module LASER se trouve sur le **Fémur**. On doit percer le trou de gauche et réalésé celui de droite à environ 2,2mm de diamètre. Durant cette opération il sera impératif de prendre toutes les précautions pour évacuer l'intégralité des copeaux d'aluminium conducteurs de l'électricité et avides de créer des courts-circuits à profusion. Comme le perçage est effectué alors que le **Fémur** n'est pas déposé, car les boulons qui brident le servomoteur sont collés au vernis à ongles, caler sous la pièce usinée avec une forte épaisseur de carton. (*Pour ma part je réutilise des vieux manuels scolaires conservés pour cet usage.*)



La présence du vieux recueil de sinus et cosinus maintient le **Fémur** bien à l'horizontale quand on le perce ou que l'on augmente le diamètre de l'alésage initial de droite. N'oublions pas que le foret  $\phi$  M2 est d'une grande fragilité. Il faut y aller très tendrement. Pour le palonnier c'est le risque d'éclatement à la sortie des lèvres coupante que le matériau risque de se fendre. Tout doux, vraiment tout doux il faut mesurer les efforts. Et puis franchement, il vaut mieux percer Dupont et Durand que la belle table vernie du salon ! Un gros paquet de publicités de Noël qui encombraient la boîte aux lettres, bien empilé convient aussi parfaitement. OUF, sur [Image 36.JPG](#) on a terminé cette petite opération chirurgicale, pas un seul copeau métallique n'a été égaré. On peut réassembler la **Jambe A** sur la sonde, les deux petits boulons soutenant le filtre étant alors en place. Sur [Image 37.JPG](#) qui montre le prototype à cette phase de l'intégration, on peut observer que les écrous **4** sont positionnés à la même hauteur que ceux qui sur le dessus immobilisent le circuit imprimé de complément. En ajoutant les rondelles **2** le filtre **1** touchera à peine le haut des vis qui supportent la petite plaque préperçée de la cellule photorésistante. Lorsque le filtre est assemblé correctement, à la bonne hauteur, comme on le voit sur [Image 38.JPG](#), la distance qui sépare la plaque support du multiplexeur au DESSUS du circuit imprimé fait 21mm sur le prototype.

### ➤ Réaliser le filtre coloré du spectrographe.

**P**ratiquement ça revient à découper deux contours dans la planche des filtres, puis à percer deux trous bien positionnés pour les immobiliser sur le **Tibia** de la **Jambe A**. Et bien l'expérience montre que ce n'est pas aussi élémentaire que ne le laisse supposer le préambule de ce chapitre. Avec une bonne paire de ciseaux on découpe très facilement le périmètre du secteur coloré. En revanche, percer les deux trous avec précision est "diabolique". Tenter de percer avec la pointe fine des ciseaux se traduit inévitablement par une fente qui ne demandera qu'à s'agrandir. Le cutter n'est pas mieux lotit. Aussi, personnellement la meilleure méthode que je puisse vous proposer et qui a fait ses preuves



depuis "toujours" est la suivante : On commence par réunir le matériel indispensable éparpillé sur la Fig.69 avec en **B** une punaise munie d'un corps de préhension, un pointeau plus gros en diamètre comme en **C**, une lame de rasoir **E** et un tout petit trou central comme en **D**. Sur la Fig.69 le secteur coloré est un exemplaire du prototype. Pour affiner au mieux ses formes ont été corrigées et surtout, les deux trous repérés en vert sont sur les dessins à imprimer maintenant parfaitement positionnés.



Si vous regardez attentivement l'échantillon **A** de la Fig.69 vous constaterez que les deux trous sont percés, la pièce translucide est terminée et propre à l'emploi. Vous pouvez vérifier que les deux orifices sont propres, bien circulaires et surtout qu'il n'y a aucune amorce de fente partant vers l'extérieur. La technique consiste à disposer l'emplacement du trou exactement au dessus de celui de faible diamètre

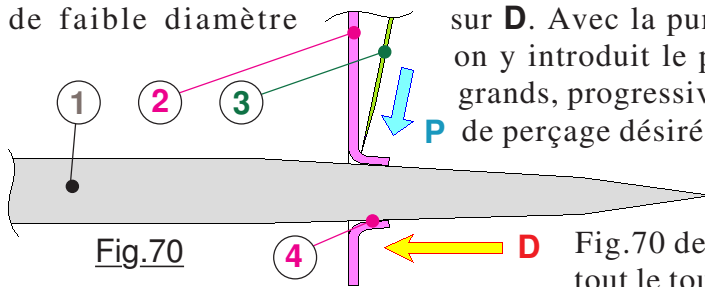


Fig.70

sur **D**. Avec la punaise **B** on perce un premier trou d'amorce. Puis, on y introduit le poinçon **C** et sur des "écrous" de diamètres plus grands, progressivement on "poinçonne" jusqu'à aboutir au diamètre **P** de perçage désiré. Lorsque l'on effectue ce déplacement réciproque **D** le poinçon 1 provoque sur le filtre 2 un bossage 4. Il suffit alors, comme montré sur la

Fig.70 de presser en **P** la lame de rasoir 3 sur 1 et de couper tout le tour la matière déformée. Il résulte de cette opération un trou sans amorce de fente et parfaitement rond. L'Image 39.JPG montre l'un des deux trous presque achevé. Enfin sur Image 40.JPG le secteur coloré est terminé. Vous pouvez constater qu'il n'a pas été découpé sur le profil issu des dessins d'études, mais corrigé pour adopter un contour optimisé. C'est ce contour avec la position des trous corrigée qui est représenté sur la Fiche n°9.

## 25) Installer la centrale gyroscopique.

**I**mpitoyable le planning, pas de répit. La cellule photosensible n'est pas encore soudée sur la plaque à trous que nous allons installer le support de la centrale gyroscopique. Il faut mener les deux installations simultanément, ainsi l'intégralité des systèmes qui se trouve sur le dessus de JEKERT sera achevée. Il ne restera plus qu'à intégrer le LASER et JEKERT sera complète.

➤ **Terminer le circuit imprimé du luxmètre.**

**P**resque oublié ce chapitre, avec ces développements sur le filtre chromatique, on avait abandonné la petite électronique sur l'établi. Il est grand temps d'y revenir et d'en terminer avec le circuit imprimé de complément. Vous avez repéré avec précision la position exacte de la cellule et plié ses deux connections pour pouvoir la souder. Le faisceau de fils qui amène la ligne

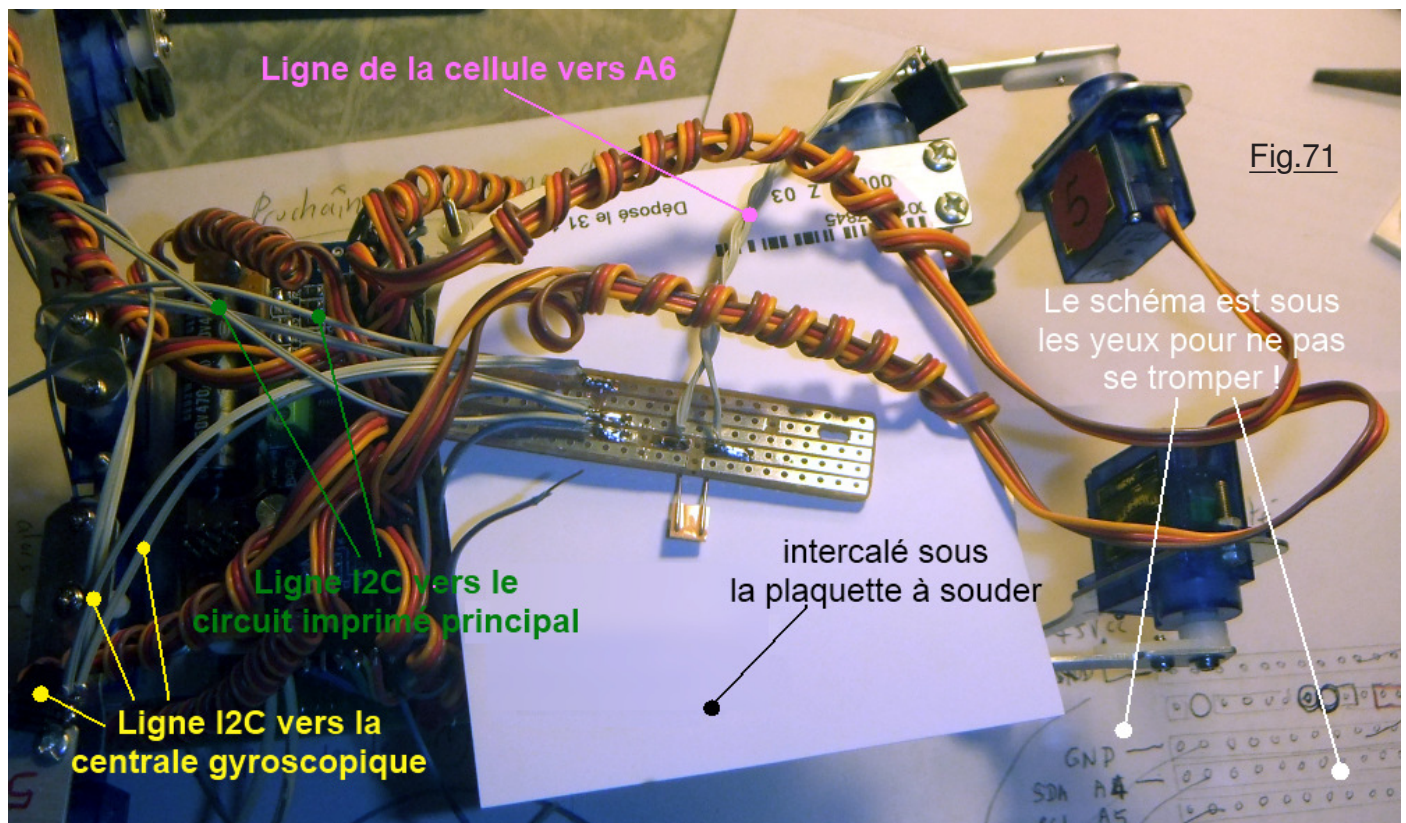


Fig.71

I2C du circuit imprimé principal ainsi que celui qui va à la centrale gyroscopique placée sur le dessus sont soudés coté pistes cuivrées. En ce qui vous concerne, il suffit de souder les petits conducteurs en nombre suffisant et en prévoyant une longueur généreuse. Puis, quand le module sera installé sur la sonde, vous torsaderez les fils d'un même faisceau, en ajusterez la

longueur et soudez le connecteur HE14 à l'extrémité. Prévoir une longueur suffisante, ce qui obligera à loger la réserve inutilisée vers l'intérieur de la petite machine, plus ou moins coincée sous les divers modules. Le surcroît de longueur facile "à cacher dans le petit robot" sera appréciable quand on voudra intervenir pour des raisons de maintenance ou de modifications. Pouvoir soulever, écarter, brancher ou débrancher sans jamais tendre les fils est un impératif.

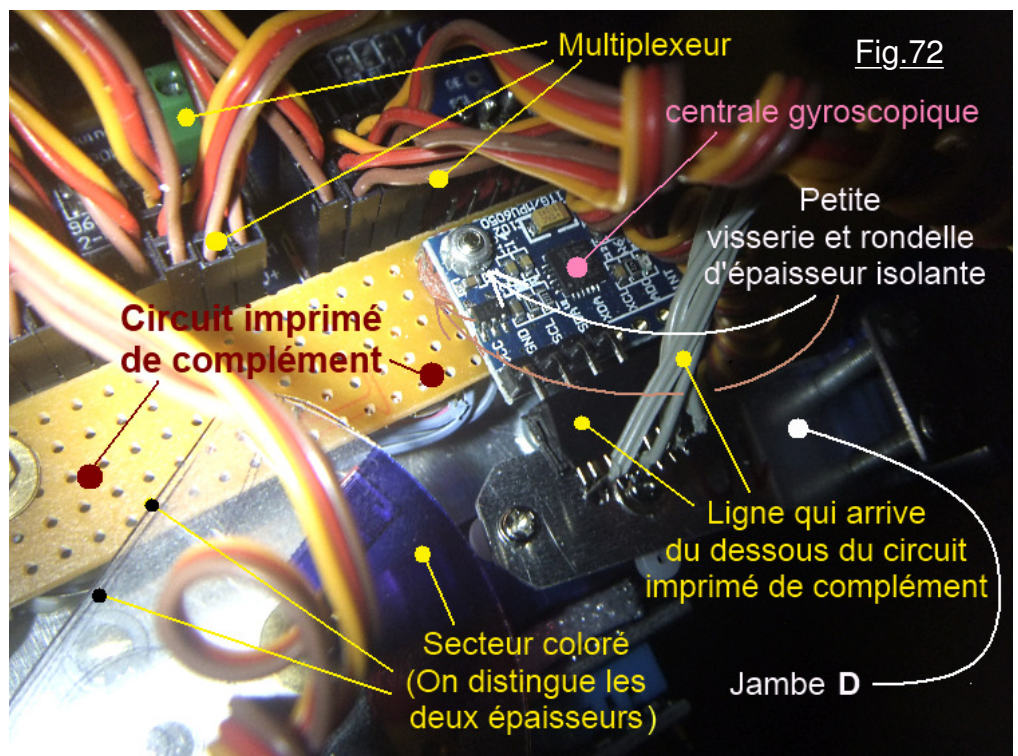
**H**istoriquement, pour souder les liaisons filaires le circuit imprimé était un peu prisonnier sur le prototype. Si à un moment donné vous vous trouvez dans une telle situation, comme montré sur la Fig.71 il suffit d'intercaler un carton rigide sous le module à souder. Ce dernier permet de stabiliser la plaquette à souder, mais surtout, on peut à tout moment laisser choir une goutte de soudure. Vous imaginez le problème si elle va se coller exactement où il ne faut pas, voir former une petite bille conductrice qui roulera pile entre deux lignes électriques qui seront en tension contradictoires. L'[Image 41.JPG](#) a été photographiés quand les soudures étaient terminées et que le carton de protection a été enlevé. Fausse "bonne idée", pour ne pas égarer la rondelle large qui se place sur le circuit imprimé, elle a été laissée sur la vis et posée sur l'entretoise isolante. Puis, pour procéder aux essais le circuit imprimé a été retourné et posé proprement sur les deux vis. Oubliée la rondelle en bronze. Le petit dessin ajouté en rouge sur l'image montre que cette rondelle en matériau conducteur réalise un court-circuit entre les deux pistes cuivrées situées de part et d'autre du trou oblong. Arduino étant en surcharge totale sur son régulateur est passé de vie à trépas ... dommage !

**P**rudence est mère de sûreté, un pépin est si rapidement arrivé. C'est la raison pour laquelle quand on développe un projet aussi "laborieux" que celui-ci, il est fortement conseillé d'approvisionner en double les circuits importants dont il dépend et qui sont commercialisés à des prix de vente qui frisent le dérisoire. Pour le prototype, quelques heures pour tout déposer, remplacer la petite carte Arduino et tout remonter et vogue la galère. Si une deuxième carte n'avait pas été disponible, c'est plusieurs jours qui auraient été rayés du planning ... et nous savons que la fenêtre de lancement n'attendra pas !

#### ➤ Installer la centrale gyroskopique.

**É**tant réunie au reste de l'électronique de bord au moyen d'un connecteur, lorsque le circuit imprimé de complément est achevé, ce n'est plus qu'une petite opération mécanique. Comme

pour tous ces modules du commerce dont les trous de fixation sont prévus pour de toutes petites vis, le problème consiste à réunir l'accastillage de visserie. À chacun de se débrouiller avec ses ressources locales. Pour ma part, au cours de ma vie de bricoleur, aucun appareil quel qu'il soit n'a été mis au rebut sans qu'au préalable je prélève des petits ressorts, de la visserie de toute petite dimension ou avec des filetages non métriques etc. Toute une boîte bien garnie contient ce genre de denrées, il suffit alors



de trier pour en extraire les composants si recherchés. Outre la Fig.72, je vous invite fortement à regarder à nouveau [Image 32.JPG](#), [Image 33.JPG](#) et [Image 37.JPG](#) sur lesquelles on voit assez bien la fixation du module gyroskopique sur le circuit imprimé. Il s'agit d'une petite visserie  $\phi$  M1,5 avec interposition de rondelle isolante assez épaisse pour que les queues des composant coté cuivre ne forcent pas sur le circuit imprimé prépercé. (Des rondelles ISOLANTES !)



## ➤ Installer le module LASER sur la Jambe A.

Contrairement à ce qui a été fait sur le prototype, le petit module LASER est le dernier à installer quand profitant de l'expérience acquise on peut travailler "linéairement". L'avantage réside dans le fait que jusqu'à la fin sa ligne souple de liaison électrique n'encombre pas inutilement l'espace. Coté branchement on donne dans de la brouille. Une petite ligne à deux fils torsadés, terminée à ses extrémités par deux petites fiches HE14 femelles à trois broches coté LASER et à deux lyres coté circuit imprimé principal. (Voir Image 1.JPG) et 9 sur la Fig.60) La longueur de cette petite ligne électrique sera suffisante pour qu'elle matérialise une boucle assez importante,

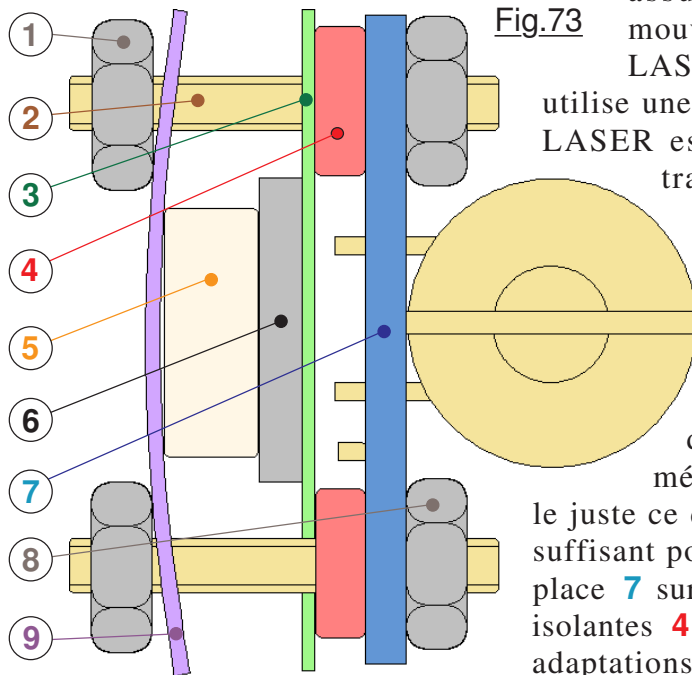
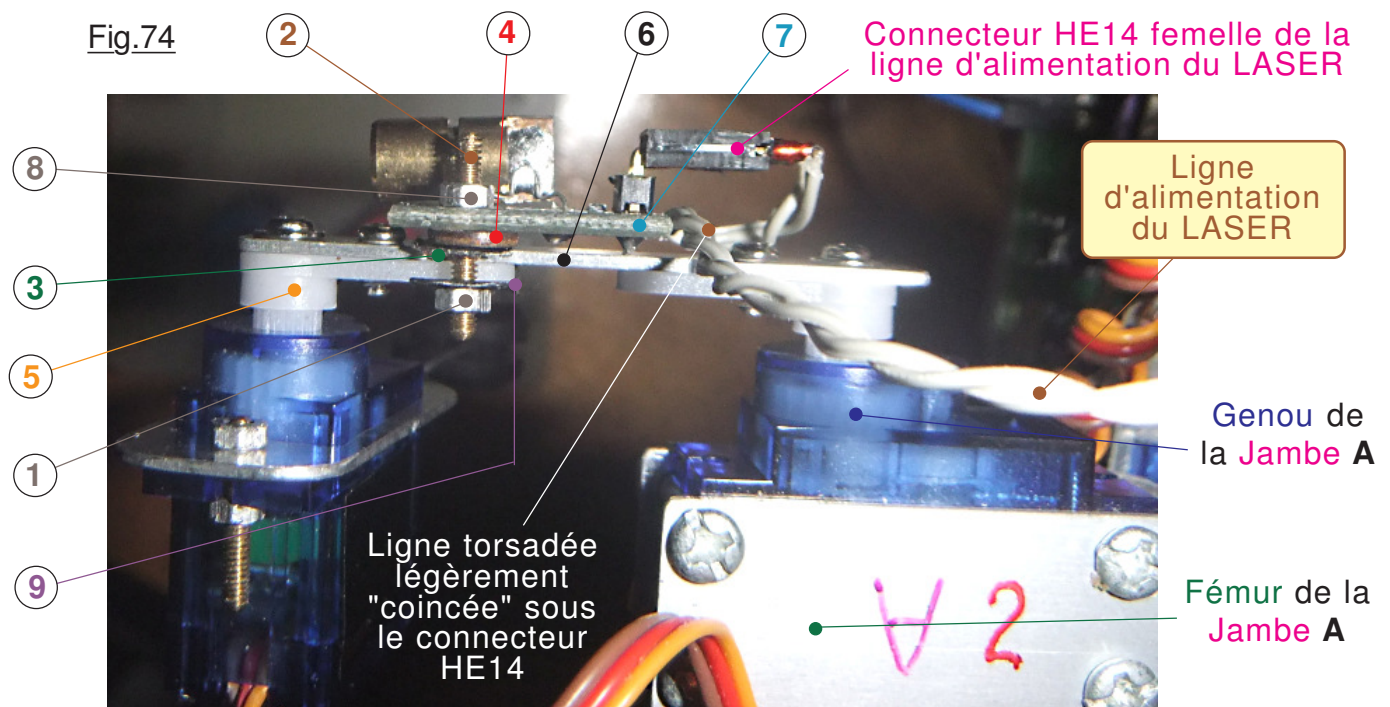


Fig.73

assurant une souplesse indispensable lors des mouvements brusques de la **Jambe** ou lors du pointage LASER. Pour sa fixation sur le **Tibia** de la **Jambe A** on utilise une petite bride double. Sur le dessin de la Fig.73 le LASER est vu de derrière. En 6 nous avons la section transversale du **Tibia** avec en 5 le palonnier de l'articulation du **Pied**. Le petit circuit imprimé du LASER 7 repose sur deux rondelles isolantes 4 assez épaisses pour ne pas que les tiges des composants qui dépassent ne touchent la première bride d'appui 3. On met en place les deux petites tiges filetées 2 et l'on enfle la deuxième bride 9. Au départ cette petite pièce métallique est plane. On serre les deux écrous 1 et 8 le juste ce qu'il faut pour que 9 cinte très légèrement. C'est suffisant pour engendrer une adhérence qui maintien bien en place 7 sur 6. Pour ceux qui n'auraient pas des rondelles isolantes 4 d'épaisseur suffisante, vous pouvez réaliser des adaptations en cartons rigide découpé à la demande.

L'Image 1.JPG montre clairement la zone du LASER vue coté module. Sur la Fig.74 la photographie a été prise en orientation plongeante le **Tibia** 6 étant vu par la tranche. Pour pouvoir comparer avec la Fig.73 elle reprend les mêmes repères. Cette photographie est réalisée sur la sonde entièrement terminée. Le module LASER est branché, sa ligne est légèrement immobilisée sous le connecteur pour ne pas que les mouvements de la **Jambe** ne soient directement propagés au ras des soudures du connecteur HE14. Observez bien Image 42.JPG qui présente une foule de détails.

Fig.74



### Implantation du LASER sur la **Jambe A**.

## 26) Enfiler les "chaussettes".

**T** rompeuses au possible, ces "chaussettes" donnent vraiment à JEKERT l'apparence d'un mobile se déplaçant sur des roues. Nous savons qu'il n'en est strictement rien, que ces éléments ont pour but d'augmenter l'adhérence entre les **Griffes** et le sol. On peut leur donner une forme et une apparence quelconque, leur mission sera correctement remplie si le matériau utilisé est souple et que son coefficient d'adhérence avec des

supports ordinaires est élevé. Si pour l'automobile on adopte du caoutchouc, ce n'est pas du tout le hasard. Aussi, c'est ce qu'il faut utiliser pour la petite sonde. Peu importe

l'adaptation locale qui sera improvisée pour cette opération. Faisant un bilan de ce qui était à ma disposition, la sélection s'est portée sur des "**passes fils**" en caoutchouc dont j'avais un grand choix dans mes "récupérations". C'est le magasin que je visite le plus ! Sur les dessins proposés dans ce chapitre, le **pass**

**fils** est colorié en jaune, bien que la couleur naturelle du caoutchouc soit noire. Vous connaissez tous ces composants qui permettent à un conducteur électrique de traverser une cloison sans risque de voir l'isolant détérioré. Si la paroi est peu épaisse et métallique, souvent les orifices sont obtenus par poinçonnage. Les arêtes du trou sont tranchantes mettant en danger le conducteur. On interpose un **pass**

**fils** et le problème est résolu. Pour immobiliser de tels dispositifs particulièrement faciles à se procurer dans les enseignes d'électronique, il suffit de percer radialement le noyau intérieur, et comme montré sur la Fig.76 d'introduire à force la griffe **G**. Cette solution fort simple n'est pas suffisante. En effet, quand l'exploratrice martienne se déplace les frottements **F** (Voir la Fig.77) de glissement engendrent des efforts de basculement **B** et l'élément caoutchouté se met en biais.

Pour remédier à cette petite difficulté il suffit d'emplir le noyau, zone coloriée en rose sur la Fig.76, de colle Araldite ce qui oblige à déposer les quatre **Griffes**. Sur la Fig.78 le moulage est préparé. Les quatre membres ont été entièrement démontés et sont posés à plat. On va couler la colle Araldite qui avant de polymériser est relativement "liquide". Le dessous des patins en caoutchouc est bouché par du ruban adhésif **R**. On mélange les deux composants et on remplit **à refus** le trou central. Avec un cure dents on "titille" la colle pour évacuer les bulles d'air. Quand on démoule, la colle mélangée étant avant durcissement relativement visqueuse, le noyau n'est pas entièrement rempli. En **C** c'est presque parfait, en **A** pas terrible et en **B** franchement mauvais. Il suffit de refaire un peu de colle et de boucher les orifices. Quand l'ensemble est bien solidifié, on coupe la colle qui dépasse, on teinte en noir le milieu et il ne reste plus qu'à remonter les **Griffe**. (Sur les éléments utilisés le noyau est dentelé. C'est rare, en général l'orifice central est cylindrique. Ce détail de forme est strictement sans importance.)

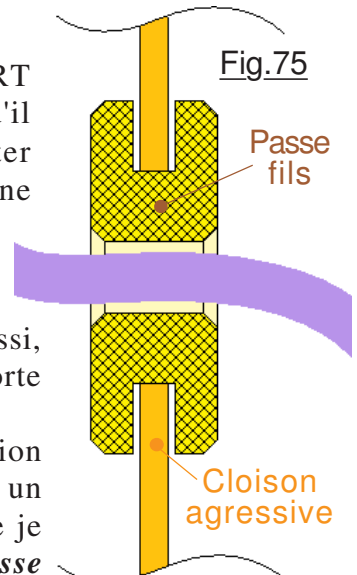


Fig.75

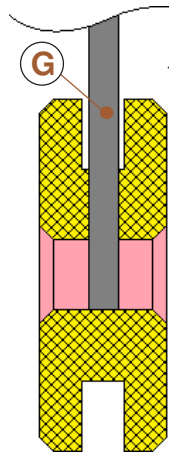


Fig.76

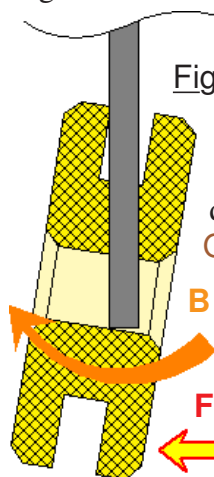


Fig.77

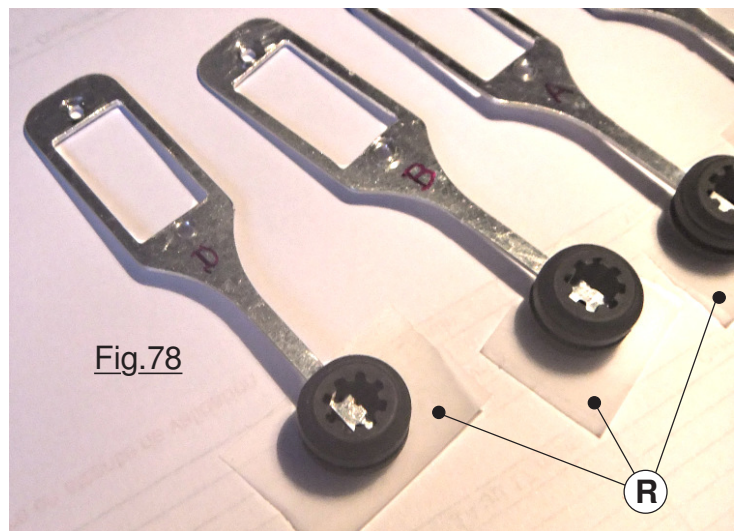


Fig.78

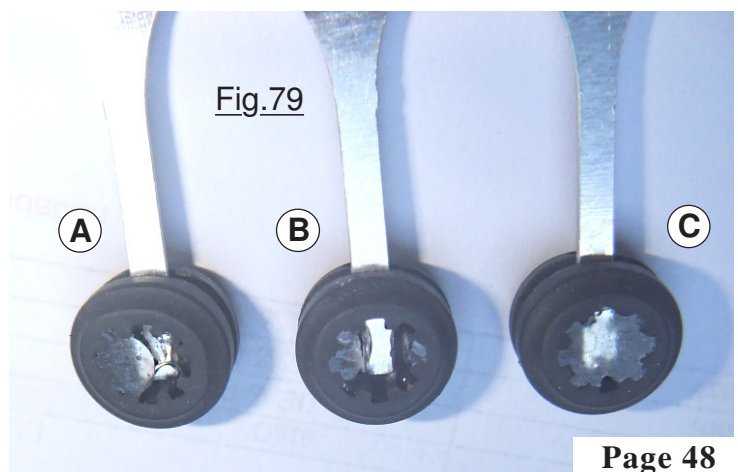


Fig.79



## 27) Réalisation du cordon ombilical.

**J**EKERT est entièrement assemblée, et l'intégralité des systèmes, y compris la motorisation a été vérifiée. Dans ce but, muni de la [Fiche n°18](#) on a testé toutes les commandes, et en particulier celles des programmes de déplacements. Les diverses postures caractéristiques ont également été passées en revue. Dans ce but nous avons naturellement réalisé l'alimentation de puissance à partir d'un dispositif idoine. Ces vérifications vous permettent au passage de vous familiariser avec les protocoles donnés dans la [Fiche n°16](#) et la [Fiche n°17](#). **NOTE IMPORTANTE : La commande "\*" seule réitère la dernière commande, ce qui n'est pas indiqué sur les diverses fiches.**

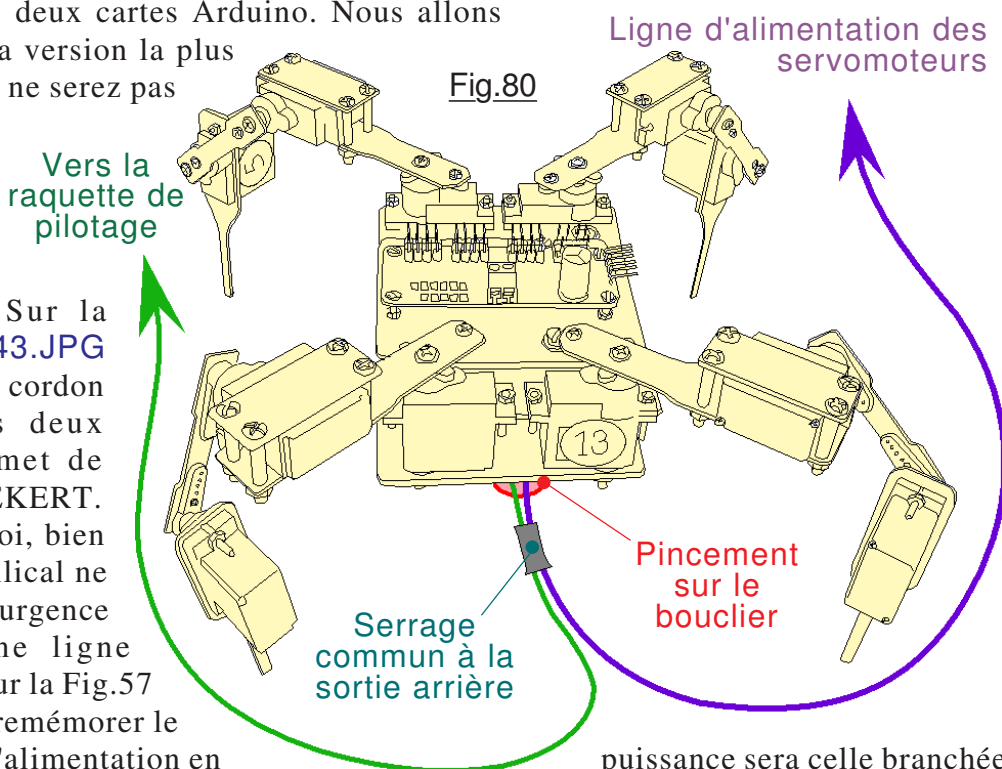
### ➤ Le cordon ombilical.

**V**ersion autonome avec Raquette de commande, ou version simplifiée pilotée directement par le moniteur de l'IDE via la ligne série USB, dans les deux cas vu de la sonde il y a deux lignes indépendantes. La première utilisant deux fils conducteurs de section idoine apporte le +5Vcc qui alimente en énergie les servomoteurs. Le branchement se fait sur le dessus de la machine à côté du multiplexeur. Si vous optez pour la version de base, la sonde étant pilotée par le P.C, la deuxième ligne est constituée d'un simple cordon USB qui se branche sur la carte Arduino NANO et qui alimente cette dernière. Il réalise le dialogue avec le P.C. si on fait appel au moniteur de l'IDE ou il permet de reprogrammer l'ATmega328. Les protocoles sont listés sur la [Fiche n°16](#) pour l'exploitation générale de l'explorateur, et dans la [Fiche n°15](#) relative aux expériences embarquées. Si vous optez pour la version "étendue" avec pilotage autonome, la ligne USB ne sera pas branchée. (Sauf pour reprogrammer naturellement.) Un deuxième cordon ombilical qui comporte deux fils assez petits pour le +5Vcc et GND du calculateur de bord, (De section suffisante pour conduire 100mA.) et deux fils de faible section pour les deux lignes de dialogue série TX et RX iront au microcontrôleur gérant la raquette. Si ce projet arrive à terme, c'est l'accumulateur contenu dans la raquette qui alimentera les deux cartes Arduino. Nous allons

dans ce chapitre détailler la version la plus complète, sachant que vous ne serez pas obligés d'assembler les

deux cordons. Si vous choisissez la version simplifiée, seul le cordon de puissance sera intégré sur la petite machine. Sur la photographie de l'[Image 43.JPG](#) on distingue parfaitement le cordon USB branché entre les deux moteurs arrière qui permet de reprogrammer librement JEKERT. On comprend aussi pourquoi, bien que les fils du cordon ombilical ne soient pas nombreux, il y a urgence à les rassembler en une ligne compacte. Un petit retour sur la Fig.57 en page 38 permet de nous remémorer le

fait que pour le prototype, l'alimentation en puissance sera celle branchée sur le secteur, décrite dans le fichier [Alimentation secteur pour la Motorisation.pdf](#). En la reliant par une ligne suffisamment longue, on laisse à la sonde une liberté suffisante. Toutefois, *d'expérimentale la ligne devient un câble d'exploitation*. La nuance réside dans le fait qu'en usage on sera logiquement amené à la brancher ou la débrancher relativement souvent. Le risque de connecter à l'envers augmente, car en "démonstration ludique" on perd l'étiquette d'électronicien, on oublie les contraintes et la rigueur. Je n'ai pas fait le test d'une inversion de tension, mais je présume que *le risque de détruire du matériel est important*. Aussi, pour parer définitivement un tel incident, il importe d'insérer une diode en série dans le +Alimentation par exemple. Prendre un composant qui peut "tenir" 5A nominal bien que le courant moyen restera



très sobre. La diode génère une chute de tension quand elle est conductrice. Il faudra par conséquent ajuster le bloc alimentation pour obtenir 5Vcc sur le multiplexeur en aval de la diode et en bout de ligne où les pertes sont maximales. La ligne est coincée entre le bouclier et le circuit imprimé principal. Sur la Fig.80 on notera qu'elle sort à l'arrière. Proche de la sonde une gaine thermorétractable relie les deux faisceaux, mais immédiatement ils se séparent pour des raisons de commodité. À l'usage, l'alimentation secteur pourra en effet se trouver en une position différente de la raquette de commande. Les deux lignes sont donc indépendantes.

Si vous regardez attentivement l'[Image 44.JPG](#) qui présente le

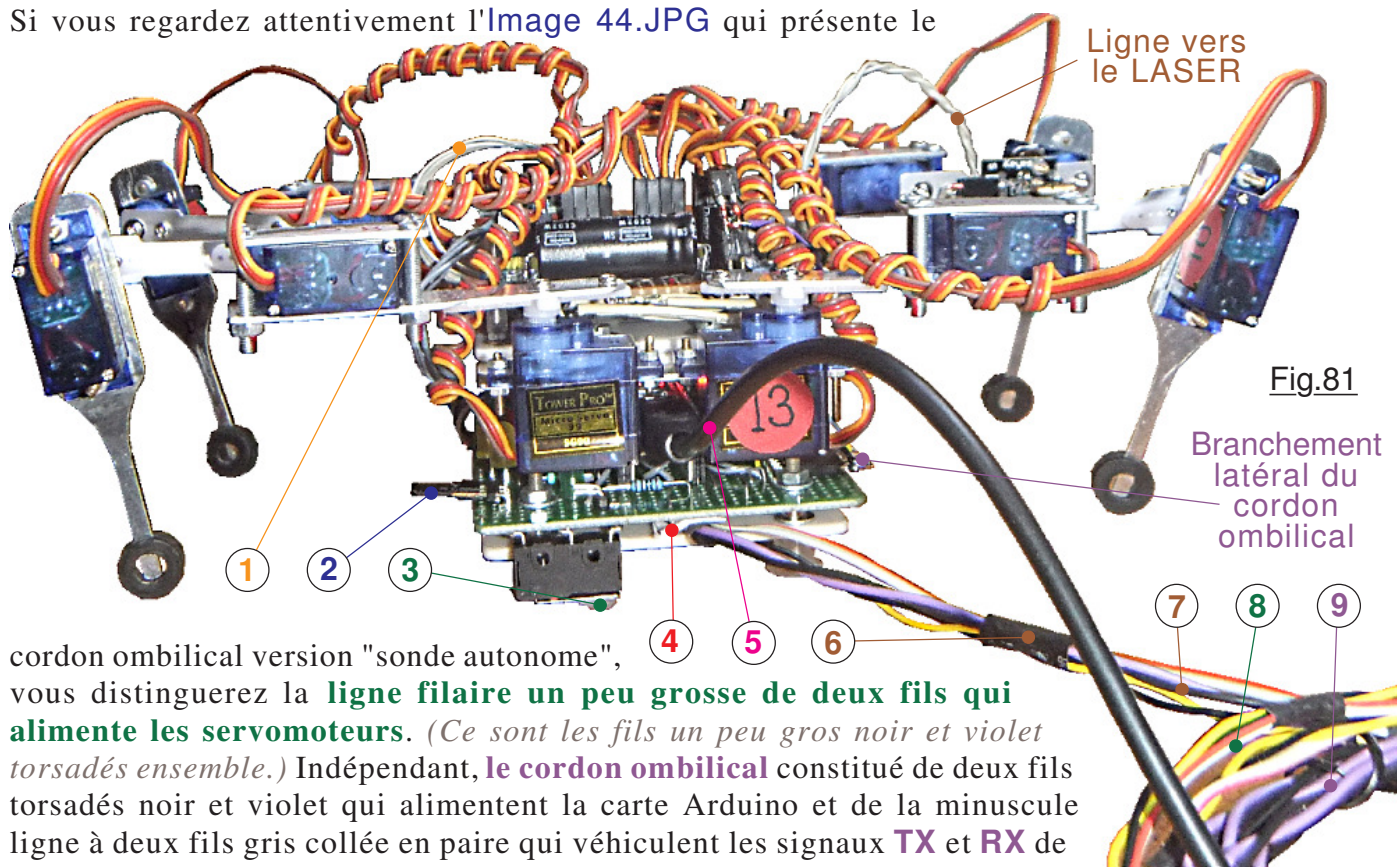


Fig.81

cordon ombilical version "sonde autonome", vous distinguerez la **ligne filaire un peu grosse de deux fils qui alimente les servomoteurs**. (Ce sont les fils un peu gros noir et violet torsadés ensemble.) Indépendant, le **cordon ombilical** constitué de deux fils torsadés noir et violet qui alimentent la carte Arduino et de la minuscule ligne à deux fils gris collée en paire qui véhiculent les signaux **TX** et **RX** de dialogue avec l'hypothétique pupitre de commande.

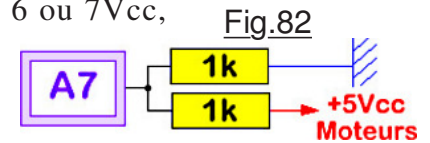
L'expérience montre que torsader plusieurs fils n'est pas une solution suffisante pour réaliser une ligne qui au cours du temps reste compacte, surtout si pour la ranger on la love en boucle comme sur la Fig.81 montrant le prototype. Aussi, tout le long des deux lignes on reserre les divers conducteurs par des petites bagues régulièrement espacées constituées de gaine thermorétractable. Ces éléments de liaison sont de couleur noire sur la photographie. Sur [Image 44.JPG](#) la douille rouge de la fiche banane du +5Vcc a été enlevée car nous sommes sur le démonstrateur en cours d'élaboration. Pour pouvoir la revisser sur la fiche il faut la raccourcir, ce qui n'était pas encore fait.

Considérons la Fig.81 sur laquelle le filtre coloré n'est pas encore réalisé. On voit en **1** la ligne qui va à la centrale gyroscopique et en **2** la languette qui permet d'éteindre la LED verte clignotante. (LED qui témoigne de l'activité de la boucle de base dans le programme résident.) En **3** se trouve le microcontacteur qui détecte "la présence du sol". En **5** la ligne USB va au P.C. pour une éventuelle reprogrammation, ou pour le pilotage dans la version simplifiée avec le moniteur de l'IDE. En **4** on peut observer le morceau de carton (Carton ou matière synthétique souple.) qui bloque la ligne électrique à la sortie vers l'arrière du bouclier. En **6** se trouve, bien visible, le morceau de gaine thermorétractable qui serre les deux lignes avant qu'elles ne se séparent en **7**, chacune partant dans la direction imposée par l'utilisation de la sonde et la proximité d'une prise secteur pour brancher l'alimentation des servomoteurs. Enfin en **8** on repère le cordon ombilical de dialogue avec le pupitre de commande hypothétique, et en **9** la ligne de puissance. En **8** et **9** les deux lignes sont lovées en boucle et maintenues ensemble par un petit fil rigide noir pour ne pas trop encombrer le bureau de l'ordinateur au cours du développement. Il n'est pas difficile de se rendre compte sur [Image 44.JPG](#) à quel point l'entropie peut dégénérer si les deux longues lignes ne sont pas correctement enroulées quand on procède aux essais et que le bureau est encombré d'appareils de mesures et de divers plaques à essais occupées par des électroniques ébouriffées ...



## 28) Ultime ajustements des programmes embarqués.

**A**vouons qu'il serait tout à fait acceptable d'oublier ce chapitre. Ce n'est que dans le cadre d'un pinaillage justifié par une approche la plus rigoureuse possible que l'on peut raisonnablement présenter ce thème. D'un point de vue opérationnel, chercher à obtenir la valeur de la tension disponible sur les servomoteurs avec trois chiffres significatifs n'est pas très logique, vu que nous savons que durant les appels de courant cette tension peut facilement chuter de 2V. Toutefois, si un jour vous désirez réaliser une mesure précise avec Arduino, la démarche proposée ici vous sera certainement bien utile. Cet ajustement logiciel effectué sur le programme qui anime JEKERT confine à un luxe de précision qui franchement n'est pas indispensable. Pour mémoire, montré sur la Fig.82, comme la tension d'alimentation des servomoteurs peut aller jusqu'à 6 ou 7Vcc, on a réalisé un diviseur de tension par deux. (Car le CAN ne peut convertir que des tensions allant jusqu'à +5Vcc.) Si les résistances de 1kΩ sont de médiocre précision, la valeur retournée par le programme sera imprécise dans des proportions équivalentes. Hors il est ultra facile d'ajuster leur calibrage finement par logiciel. Allez consulter le listage de **P30\_Programme\_COMPLET\_T5.ino** et recherchez les lignes contenant des remarques caractéristiques du genre :



//@@.

Comme déjà signalé dans le didacticiel, ce sont des constantes qui dans le programme sont faciles à repérer et à personnaliser. Tout particulièrement pour le cas analysé nous avons :

```
//----- Constantes du programme -----
#define Calibre_U_moteurs 6.67 // Calibrage du diviseur potentiométrique d'entrée.
```

Comme pour le calibrage de n'importe quel instrument de mesure, il faut disposer d'un étalon fiable. En ce qui nous concerne un multimètre de qualité sera indispensable. Soit vous en possédez un, soit un ami vous en prêtera avec plaisir. (Si vous ne pouvez utiliser un tel appareil de mesure, contentez-vous d'utiliser deux résistances à 5% c'est largement suffisant, et l'affaire sera entendue.)

La constante **Calibre\_U\_moteurs** est spécifiquement créée pour réaliser un ajustage précis.

Voici comment procéder :

Vous utilisez une alimentation à tension variable et en ajustez sa tension de sortie à la plus forte valeur autorisée sur le multiplexeur, soit 6,5V mesurée avec précision.

Vous frappez "i\*" dans le moniteur de l'IDE et vous prenez en compte la valeur qui est retournée par le programme d'exploitation de JEKERT.

Vous recalculerez la valeur de calibrage avec la formule :

$$\text{Coef corrigé} = \frac{\text{Coef actuel} \times U \text{ Affichée}}{U \text{ réelle}}$$

Prenons un exemple : Avec le multimètre vous avez ajusté précisément la tension à +6,5Vcc. La valeur retournée par le programme est de 6,34V. La nouvelle valeur à indiquer dans la ligne de calibration pour la constante est donc de :

**Calibre\_U\_moteurs** = 6,67 x 6,5 / 6,34 = 6,84.

L'avantage d'une telle méthode réside dans la faculté de réaliser des mesures d'une grande précision tout en utilisant pour l'électronique des composants très ordinaires. Si vraiment vous cherchez le "fin du fin", recommencez deux fois ou trois fois la procédure, vous gagnerez un petit fifrelin de précision. Pour vous donner une idée de la fiabilité obtenue, le tableau présenté ci-dessus résume les excellents résultats obtenus sur le prototype.

U Réel	U Affiché
6,5	6,51
6	6,01
5,5	5,51
5	4,99
4	3,97
3	2,95
2	1,95
1	0,96

### ➤ Ajustements précis des postures.

**C**réer des objets matériels n'a rien à voir avec des mathématiques pour lesquelles les entités virtuelle sont absolues. Dès que l'on se trouve dans le réel, absolument tout ce que l'on rencontre est victime d'une certaine imprécision. Bien que coté en absolu sur le plan de l'architecte, la maison réelle présentera des dimensions qui s'écarteront des valeurs indiquées. De bons maçons peuvent respecter à un centimètre environ, et encore, faut-il que la bâtisse ne soit pas trop grande. Les servomoteurs qui sont réalisés avec beaucoup de soin en très grande série présenteront pour leur compte des caractéristiques inégales. Les plages de positionnement en fonction des

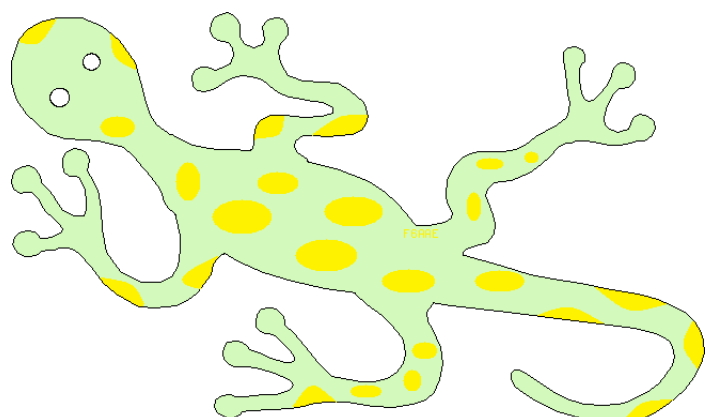
consignes reçues seront légèrement différentes d'un élément à un autre, et de celles présentées par les servomoteurs du prototype. Du coup certaines postures ne seront pas parfaites. Par exemple vous constaterez qu'en *Stable Transversal* l'une des *Jambe* ne semble pas totalement posée et exerce une pression limite sur le sol. Il ne sera pas très compliqué en manuel d'équilibrer géométriquement les quatre membres, puis de corriger la table en EEPROM. Nous allons aborder un exemple concret. Ajouter le petit module LASER sur le Tibia de la *Jambe A* augmente légèrement l'encombrement de ce membre. Quand on passe en *Posture de décollage*, les deux *Jambes A* et *B* viennent en légère collision. Plus insidieux, toujours dans cette configuration la *Griffe* de la *Jambe C* vient en contact avec la languette du "strap" de la LED verte clignotante. Les moteurs ne sont pas réellement forcés, mais on entend nettement le bruit de "grenailage" des servomoteurs qui tentent de se caler avec précision. Il importe donc d'augmenter le jeu entre ces divers éléments en conflits. La *Fiche n°19* détaille avec précision la procédure pour corriger la table de la *Posture de décollage*. Notez au passage que la *Fiche n°2* est prévue pour y faire figurer les caractéristiques particulières à vos servomoteurs. Ces informations peuvent s'avérer également utiles pour calibrer les postures.

**J** EKERT est terminée, tout au moins la description relative à sa réalisation. Branchée sur la prise USB de l'ordinateur, on peut se faire plaisir et en rester là. Toutefois, au bout d'un moment, se voir obligé d'aller sur le bureau où se trouve le P.C. pour faire une petite démonstration à des amis se révélera relativement contraignant. La tentation sera grande, de désirer une version totalement autonome, tant du point de vue énergétique que celui du pilotage. Alors, pour les chanceux qui disposent d'assez de temps de libre pour "remettre le couvert", je vous invite à réaliser le pupitre qui, il ne faut pas le cacher, va exiger pratiquement autant de temps de réalisation que pour la sonde proprement dite. Rien ne presse, il n'y a pas d'urgence. Faites une pause, détendez-vous à regarder JEKERT qui se trémousse. Puis, dans quelques temps, quand l'envie de bricoler va vous titiller les méninges, alors ... rendez-vous dans le dossier *<Réalisation du pupitre>*.

*Chère lectrice, cher lecteur, si ce didacticiel vous procure un peu de plaisir, et surtout l'envie de "robotiser vos loisirs", alors son objectif majeur sera atteint. Je vous dis "au revoir", car si l'avenir vous y autorise et ne nous barre pas la route, un petit pupitre de pilotage autonome sera le bienvenu pour associer à JEKERT un petit coffret de commande entièrement autonome.*

*Je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui d'une façon ou d'une autre m'ont mis sur les rails, sans oublier les passionnés qui trainent sur les forums pour partager leur enthousiasme ...*

Ben Môamôa, sans vouloir polémiquer ou me mettre en avant, je suis entièrement autonome, j'ai pas du tout besoin d'un pupitre pour me commander !



*Chaleureusement : Nulentout.*