



Dossier Technique

Réalisation : Club Robotique Airbus
Date du concours : 03 Juin 2007



Table des matières

1	PRESENTATION	3
1.1	RAPPEL SUR LE CONCOURS DU DEFI SOLAIRE	3
1.2	RAPPEL SUR LE CAHIER DES CHARGES IMPOSE DANS LE REGLEMENT 2007.....	3
1.3	PRESENTATION DE L'EQUIPE	4
2	REALISATION ET CHOIX TECHNIQUES	5
2.1	ANALYSE GLOBALE DU PROBLEME.....	5
2.2	PARTIE MECANIQUE	6
2.2.1	<i>Les roues</i>	7
2.2.2	<i>La direction</i>	8
2.2.3	<i>Le châssis</i>	8
2.2.4	<i>Le moteur</i>	8
2.2.5	<i>La « carrosserie » et le support des cellules solaires</i>	10
2.3	PARTIE ELECTRIQUE / ELECTRONIQUE.....	10
2.3.1	<i>Les cellules solaires</i>	10
2.3.2	<i>Les batteries</i>	12
2.3.3	<i>Le contrôleur moteur</i>	12
2.3.4	<i>La gestion d'énergie</i>	13
3	LES ESSAIS ET MISE AU POINT	14
4	CONCLUSION	14
A.	DOCUMENTATIONS TECHNIQUES.....	16
B.	NOMENCLATURE.....	20
C.	SCHEMAS.....	21
D.	PHOTOGRAPHIES	22
E.	CALENDRIER DU DEVELOPPEMENT.....	26

1 Présentation

Le module solaire décrit dans ce document est un véhicule radiocommandé, dont la source d'énergie principale (ou unique si les batteries de secours sont retirées) est d'origine solaire.

Ce véhicule est prévu pour participer à des compétitions de modules radiocommandés solaires tel que le concours du « Défi solaire ».

A ce titre, il répond au cahier des charges fixé dans le règlement de ces concours et en l'occurrence il répond au cahier des charges présenté dans le règlement 2007 du « Défi Solaire ».

Le présent document présente les choix techniques, les schémas de réalisation ainsi que des photographies du véhicule et des différents composants (utilisés ou simplement testés)

1.1 Rappel sur le concours du défi solaire

Voici ce que l'on trouve comme présentation sur le site Internet de Planète Science Midi Pyrénées (<http://www.planete-sciences.org/midi-pyrenees/solaire>), organisateur du concours

- *Les jeunes ou les adultes conçoivent seuls ou soutenus par leurs encadrants (enseignants, animateurs,...), des mini véhicules électriques se déplaçant exclusivement avec l'énergie solaire.*
- *Une rencontre, appelée "les Défis Solaires", est organisée pour rassembler toutes ces personnes et leurs projets autour d'une ou plusieurs épreuves sous forme de courses.*
- *Un cahier des charges est disponible et doit être respecté pour participer à cette journée. Une séance de qualifications est organisée pour cela.*
- *Plusieurs catégories sont mises en place : Loisirs, Ecoles élémentaires, Collèges et Lycées.*
- *Les meilleurs du classement dans chaque catégorie recevront des prix offerts par les partenaires de l'opération.*

En particulier, concernant la catégorie « Loisirs », celle où concourt notre véhicule, voici ce qui est dit :

Les individuels ou les clubs ayant réalisé un véhicule solaire conforme au cahier des charges, sont invités à participer à la journée des Défis Solaires, catégorie "Loisirs" le dimanche 3 juin à la Cité de l'Espace. Cette activité doit être le domaine de l'ingéniosité et de la créativité pour communiquer sa passion et donner l'envie aux plus jeunes de se lancer dans les Défis. C'est également l'occasion de démontrer au grand public et aux institutions les possibilités réelles offertes par l'énergie solaire dans le domaine des transports.

1.2 Rappel sur le cahier des charges imposé dans le règlement 2007

Le cahier des charges auquel les véhicules doivent se conformer pour pouvoir participer est décrit dans le règlement 2007. Les points principaux sont les suivants:

- Dimensions maximales du véhicule, appendices compris: Longueur 80 cm, largeur 50 cm et hauteur 80 cm
- Poids minimal du véhicule, sans ses batteries: 1 kg
- Garde au sol au niveau du pare-chocs avant : 5 cm
- Energie principale: solaire

- Des batteries peuvent être incorporées au véhicule, mais doivent être vides au démarrage de l'épreuve.
- Le véhicule doit être capable de franchir une cote de 20% (soit incliné d'un angle de 11,3 degrés par rapport à l'horizontal) ainsi qu'une bande engazonnée

1.3 Présentation de l'équipe

Le véhicule a été conçu et réalisé par le club robotique d'Airbus Toulouse, et plus particulièrement par trois de ses membres. Cependant, la réalisation de ce projet étant annexe aux projets du club, il a bénéficié de peu de subvention de la part du club et aucune subvention externe.

Le rôle de ce club est de faire découvrir et partager la passion pour la robotique et le modélisme, de préférence robotisé (véhicule autonome, drone, etc...) au plus grand nombre, par l'achat ou la réalisation de robot destiné soit à concourir à des concours nationaux, soit à enrichir les connaissances du club.

Les membres ayant investi de nombreuses heures sur ce projet sont :

- Sébastien Di MERCURIO, 32 ans, Ingénieur informatique (sdimer32@yahoo.fr)
- Thierry BOUYSSOU, 33 ans, Ingénieur électronique (tbouyssou@yahoo.fr)
- Philippe TONNELLO, 38 ans, Technicien électronique (philetsysy@free.fr)

2 Réalisation et choix techniques

Ce chapitre décrit, poste par poste, les choix techniques qui ont été fait, mais aussi les pistes envisagées et non retenues et les problèmes rencontrés.

Les caractéristiques techniques du véhicule sont les suivantes (ces points sont décrit dans la suite du document, les références en point d'achat des pièces se trouvant en annexe C):

- Véhicule à trois roues, deux directrices à l'avant, une motrice à l'arrière.
- Moteur type brushless du commerce, non modifié, prévu pour avion 1/8ème
- Réducteur 3.33:1 sur la roue arrière, du commerce mais adapté à l'arbre moteur
- Roues gomme dure, 68 mm de diamètre.
- Servo-moteur standard pour assurer la direction
- Châssis principal en profilé d'aluminium
- Carrosserie en panneau de polystyrène extrudé, formé d'un panneau principal (20 mm épaisseur) fixé au châssis par des tiges aluminium gainée de tube silicone pour l'amortissement, ainsi qu'un panneau amovible comprenant les cellules solaires (20mm épaisseur).
- Panneau solaire formé de 14 cellules multicristallines 125x125, 15.5% de rendement max.
- Batteries de secours de 2 x 2 éléments Li-Po
- Poids de l'ensemble, hors batterie: 1250 grammes

La réalisation s'est étalée de mi-août 2006, avec la réalisation d'un premier prototype, l'achat de premières cellules et quelques essais durant fin septembre/octobre 2006, un arrêt notable durant la période hivernale (faute de soleil et froid) et la reprise de la conception vers mars 2007 avec la réalisation du prototype qui va aboutir au véhicule présenté ici. Durant cette deuxième phase, le contrôleur brushless et les cellules définitives ont été achetées.

Les moyens mis en oeuvre sont ceux d'un bricoleur averti, à savoir scie à métaux, meuleuse, perceuse colonne et perceuse sans fil, lime, outillage de modélisme (type Dremel), clés et tournevis ainsi que fer à souder et multimètre. Le seul appareil non courant à été l'utilisation d'un tour pour l'usinage des moyeux de roue et du pignon du réducteur.

Un point important à noter est que le véhicule a été réalisé presque entièrement sur des fonds personnels. La dimension « coût de revient » est donc très importante. Les choix techniques mais aussi de composants fait ici sont souvent dictés par le prix. Ainsi, avec des moyens financiers plus importants, d'autres choix technologiques ou de matériaux auraient pu être fait, amenant peut-être à de meilleures performances.

La réalisation de ce véhicule a donc été énormément dirigé par le système « D ».

2.1 Analyse globale du problème

Avant de se lancer tête baissée dans la réalisation du véhicule il faut noter un point important : le règlement ne précise nullement que le mode de propulsion doit être électrique. En ce sens, la source d'énergie doit être solaire mais pas forcément photovoltaïque. Parti de ce constat, une séance de réflexion a été réalisée. Il se trouve au final que le choix de cellules photovoltaïques et d'un moteur électrique a été retenu, mais nous avons évalué d'autres modes de propulsion.

- Moteur Stirling
C'est un moteur qui se rapproche du moteur à piston, dans lequel un gaz (de l'air souvent) est chauffé et donc se dilate, repoussant le piston puis ensuite est refroidit, se

contracte et permet de ramener le piston en position initiale. Il faut donc une source chaude et une source froide. La source chaude est trouvée, c'est le soleil, la source froide, elle est plus dure à réaliser, sûrement à partir d'un radiateur placé sous le véhicule, à l'ombre.

On obtient plusieurs problèmes : d'une part, pour chauffer le moteur, dans des proportions raisonnables, il faut concentrer les rayons du soleil en un point du moteur. Il faut donc une loupe. Ensuite, ce moteur a le même défaut qu'un moteur à combustion à savoir qu'à l'arrêt du véhicule, le moteur, lui, tourne toujours, d'où la nécessité d'un embrayage. En plus, il n'est pas facile de faire varier le régime du moteur. Enfin, pour le récepteur radio il faut de l'électricité et le moteur Stirling, à moins de le coupler à une dynamo, n'en fournit pas. Bref, on oublie.

- Machine à vapeur

Ben oui, avec le soleil on fait chauffer de l'eau qui fait de la vapeur et ensuite fait tourner les roues... Ok, on a laissé tomber rapidement cette idée, surtout quand on a imaginé le poids de l'engin et le temps nécessaire pour faire chauffer l'eau. Et puis, toujours pas d'électricité pour le récepteur radio.

- Module Peltier

Un module Peltier permet de créer du froid (sur une face) et du chaud (sur l'autre face) en faisant passer du courant. Ce qu'on oublie souvent c'est que ça marche dans l'autre sens aussi. En créant une différence de température entre les faces du module Peltier, il se crée du courant. Le problème concerne le rendement de ce genre de module (besoin de grande différence de température) et le prix. Mais l'idée reste élégante et méritera d'y réfléchir plus en profondeur pour une prochaine année.

- Le vent solaire

Ça, ça fait partie des idées folles qui surgissent durant un « brainstorming ». Non réalisable sur Terre et avec la surface de panneau imposée !

- Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques (qui ne sont ni plus ni moins que des photodiodes utilisées en direct, donc dans leur régime photovoltaïque offrent des rendements allant de 5 à 40% (en laboratoire), sont légères mais très fragiles et relativement chères. Elles produisent du courant lorsqu'elles sont mises au soleil (courant proportionnel à la surface de la cellule, de l'ordre de quelques centaines de milliampères pour de petites cellules à plusieurs ampères pour les plus grandes) sous une tension généralement de 0.5 à 0.7 volts par cellule. Telles des piles ou des batteries, il faut donc en mettre plusieurs en série pour obtenir des tensions de l'ordre de 5 à 10 volts capables d'alimenter le récepteur, le moteur et le contrôleur. Ça tombe bien, ça nous amène à une superficie d'environ 0,22 dm², taille limite imposée par le règlement. Comme le monde est bien fait !

A part la difficulté pour s'en procurer et le prix, pas de réel problème ici. Il faudra penser à faire un panneau bien résistant. C'est cette solution que l'on retient.

Au final, on va utiliser le couple « cellules solaires + moteur électrique) pour réaliser le véhicule, choix préconisé par le règlement.

2.2 Partie mécanique

La partie mécanique a été la plus longue à mettre en œuvre, vu que nous ne partions d'aucun existant.

Il a fallu réfléchir, dès le début, aux différents éléments formant le véhicule (roues, châssis, moteur, ...). Voici détaillé, pour chacun de ces éléments, les essais et choix qui ont été fait.

2.2.1 Les roues

Une voiture, ça a des roues. Oui mais combien en met-on ? 2, 3, 4, 6, 8 ? Le choix s'est fait, assez classiquement, entre 3 et 4 roues.

4 roues, c'est plus stable, ça prend mieux les virages mais il faut un différentiel sur le train des roues motrices pour qu'en virage les roues ne dérapent pas. C'est donc plus complexe mécaniquement. Ou alors on met le moteur sur une roue (par exemple l'arrière droit), mais du coup, ça crée un couple transversal par rapport au centre du véhicule, couple qu'il va falloir contrer avec la direction, donc, des frottements, donc une perte de rendement et de l'usure. Dernière possibilité : un moteur par roue motrice et pas d'axe les reliant. Ça oblige à mettre deux moteurs donc des consommations électriques plus importantes.

Sinon, on met 3 roues. 2 motrices et une directrice ? Non, on aurait le même problème qu'avec nos 4 roues.

Ou alors deux directrices et une motrice. Si la roue motrice est bien centrée par rapport aux deux roues directrices, pas de couple transversal à craindre. En plus on limite les frottements puisque l'on a une roue en moins, et mécaniquement c'est plus simple et plus léger. C'est retenu.

Au niveau des pneus, plusieurs possibilités s'offrent à nous. Déjà, la matière : mousse ou gomme ? Les pneus mousse ont une super adhérence, sont légers mais s'usent vite. Les pneus gomme sont un peu plus lourds, adhèrent un peu moins mais se dégradent moins vite. Comme on fait de l'endurance, on a donc choisi des pneus gomme. Mais on a quand même fait quelques essais de roue à pneu mousse pour la direction (voir galerie photo en annexe B). Mention spéciale pour les roues de roller. C'est facile à trouver, pas très cher (15 euros les 4 roues) mais c'est super lourd ! Plus de 150 grammes avec les roulements à billes. En plus leur gomme est souvent assez peu adhérentes (il ne faut pas oublier que c'est prévu pour porter le poids d'un homme et du coup, avec 50 kilos sur le dos, une roue de roller, ça adhère bien ! Mais pas avec 500 grammes ...)

Ensuite, le diamètre des roues va de moins de 60 mm à plus de 100 mm. Pour les roues avant, peu importe, le seul critère est la garde au sol. Des roues de 60 mm permettent une garde au sol d'un peu moins de 3 cm, c'est peu mais suffisant. Par contre, le diamètre de la roue arrière conditionne le couple moteur, donc la capacité à accélérer, mais aussi la vitesse maximum. Plus la roue est petite, plus le couple est élevé (bonnes accélérations) mais plus la vitesse de pointe est faible. A l'inverse, plus la roue est grande, plus le couple est faible (accélération molle) mais plus la vitesse de pointe est élevée.

On a opté au final pour des roues de 68 mm destinées au train d'atterrissage de modèles réduits d'avion.

Reste un dernier point à régler. Comment fixe-t-on la roue sur son axe ? Le plus simple est de mettre un axe correspondant au diamètre intérieur de la roue, et de serrer (pas trop fort !!) avec un écrou. Ça marche mais on a un problème. L'axe est souvent en métal, probablement fileté et le moyeu de la roue est souvent en plastique. Notre axe va jouer le rôle d'une lime contre le moyeu de la roue, l'usant et au final va agrandir le trou. La roue n'est plus bien maintenue, bouge et peut même se détacher et aller vivre sa vie ailleurs. Quand on sait que l'on a une épreuve d'endurance à faire...

L'autre solution est de mettre un roulement à bille. Plus de problème de frottement ni d'usure mais ... ça n'existe pas des roues avec roulement à bille dans le moyeu. Bref, c'est le système D ! Il suffit d'aller voir la galerie photo pour comprendre qu'il y a eu pas mal de raté.

L'idée est de percer une roue avec un foret à bois de 22 mm de diamètre pour y insérer ensuite un roulement à bille de roller et coller l'ensemble avec une colle puissante type Araldite. Facile à dire, beaucoup plus dur à faire même avec une perceuse colonne ! En effet, le centrage et le parallélisme du roulement avec la roue doit être parfait sinon la roue ondule et vibre quand elle tourne. Et encore, on passe sur le centrage et la fixation de l'engrenage sur la roue arrière. Que du bonheur !

Néanmoins, c'est ce que l'on a retenu. Au final, les roues avant font 48 grammes, roulement compris et la roue arrière, avec l'engrenage en Delrin fait 65 grammes. C'est peu mais c'est beaucoup plus lourd qu'une roue à pneu mousse de 70 mm de diamètre du commerce qui pèse 16 grammes.

Après la campagne d'essai, il a été décidé de reprendre la direction avant pour utiliser des fusées avec roulement à bille intégrée. Ceci nous permet du coup d'utiliser des roues standards, sans avoir à intégrer des roulements à bille dedans. La même logique fera que l'on optera pour un réducteur du commerce pour la roue arrière.

2.2.2 La direction

Ce point là a été rapidement étudié. En gros, vu que l'on utilise deux roues directrices, il n'existe pas 1000 façons pour faire une direction. Il faut des fusées au niveau des axes de roue, un servomoteur pour actionner la direction, des rotules et des tringles de direction.

La direction se faisant sur le train avant il faut privilégier la robustesse à la légèreté. C'est ce train qui encaissera les chocs !

Nous avons donc utilisé un mécanisme complet récupéré sur un modèle réduit de voiture qui a déjà fait ses preuves. Nous y avons couplé un servomoteur standard avec un bout de polycarbonate. Ce n'est pas vraiment léger mais ça devrait tenir le coup ! n'oublions pas que l'épreuve dure longtemps et que nous n'avons aucune pratique de pilotage...

2.2.3 Le châssis

Le premier prototype réalisé était constitué d'un cadre formé en corniche d'aluminium, avec un train avant directionnel formé par deux lames d'aluminium, et un bras oscillant pour le moteur arrière, avec une roue motrice. Un amortisseur était prévu sur le bras oscillant arrière. Le schéma est présenté en annexe A, sous le nom de prototype 1.

Ce prototype a été abandonné à cause de son poids trop important (près d'un kilo, sans le récepteur, les batteries et le contrôleur moteur), mais aussi à cause de la complexité de sa mécanique et d'un risque de « casse » sur le long terme.

Par la suite, le châssis a été revu pour aboutir au prototype 2, celui retenu pour la course.

Ce châssis reprend le train avant du précédent modèle, mais supprime le cadre pour un profilé aluminium en U. Le train moteur est fixé sur le cadre par deux entretoises pour permettre de mettre la roue arrière dans l'axe. Le système n'est plus amorti (sauf à l'avant avec des petits ressorts mis sur les axes des fusées de roue et par la souplesse des lames en aluminium) et l'ensemble de l'équipement est fixé sur le profilé en pratiquant des petites gorges pour fixer les composants. Le poids devient plus raisonnable (environ 650 grammes, avec le moteur, les roues, le récepteur, le contrôleur moteur et les batteries).

Un point nous a fait frémir à moins d'un mois de la course. Est-ce que notre châssis avec ses roues de 68 mm et son empattement de 42 cm peut passer le sommet de la côte de 20% ? Quelques rappels de trigonométrie et une calculatrice nous ont permis de nous rassurer (voir annexe A). Oui, ça passe avec moins d'un centimètre de marge. Suffisant mais pas énorme.

2.2.4 Le moteur

Le moteur c'est le cœur du véhicule. Les contraintes à respecter pour le moteur sont assez incompatibles. Il faut qu'il soit léger, avec un grand couple, une vitesse de rotation maximum élevée mais sans trop consommer de courant. Quand on sait que le couple d'un moteur augmente avec sa consommation électrique et que la vitesse d'un moteur augmente avec sa tension d'alimentation, on comprend que trouver la perle rare va être dur.

Vu que la batterie et le panneau solaire fournissent du courant continu, on va s'orienter vers les moteurs à courant continu. Il en existe 2 types :

- Classique ou « brushed » : C'est le moteur électrique de base, avec un collecteur pour le faire tourner. Le rotor est composé de bobine, dont les phases sont commutées en fonction de la position du moteur grâce au collecteur. Le stator est composé d'aimants permanents. Les rendements peuvent être assez médiocres (moins de 65 %) à très bons pour des moteurs de précision à bobinage en cage à hamster dont les performances atteignent et dépassent parfois les 80 %.
- Brushless : Dans ce cas, le moteur est monté en inverse par rapport au brushed, les aimants permanents formant le rotor, les bobines se trouvant sur le stator. Ici, plus de collecteur, les trois fils des différentes phases sont accessibles. À charge pour un circuit externe de se substituer au collecteur et veiller à commuter correctement les phases pour faire tourner le moteur. Comme il n'y a pas de frottement, les rendements sont tout de suite assez bons, même pour des moteurs de faible qualité, allant en général de 75 % à plus de 80 % pour de très bon moteurs.

Partis de cette analyse, nous avons essayé les moteurs suivants :

- Un moteur « brushless » pour micro avion : très léger (moins de 40 grammes), pas de bruit, consommation à vide très réduite (moins de 30 milliampères), mais un couple ridicule.
- Un moteur « brushless » pour avion type 1/8ème : un peu plus lourd (80 grammes), une consommation à vide plus importante (environ 400 milliampères) et une consommation de l'ordre de 3 ampères en accélération et 1.5 ampères en charge (régime stabilisé). Beaucoup de couple.
- Un moteur « brushed » Speed 400. Assez lourd (120 grammes) et une consommation hallucinante à vide de plus d'un ampère avec des pointe à près de 3 ampères en charge (régime stabilisé). Un rendement inférieur à 68 %. Par contre, beaucoup de couple.
- Un moteur « brushed » Faulhaber : léger (86 grammes), très facile à fixer, aucun bruit, bon rendement de l'ordre de 80 % (presque équivalent à un brushless de bonne qualité), des consommations raisonnables (moins de 50 milliampères à vide, environ 1 ampère en charge et 2 ampères en accélération). Mais le couple reste faible et pour pouvoir rivaliser avec le brushless, il va falloir en mettre deux (ce qui au final doit donner un couple un peu supérieur, mais un poids supérieur aussi, par contre, les consommations sont équivalentes au brushless).
- Un moteur « brushed » Namiki : un modèle de remplacement pour le Faulhaber, mêmes dimensions, mêmes points de fixation, un peu plus de couple mais un poids 1.5 fois plus élevé que le Faulhaber (136 grammes).

Le choix s'est porté au final sur le second moteur brushless. Plusieurs essais de fixation ont été réalisés, avec différentes réductions faites à partir de différents engrenages, en mesurant à chaque fois le courant consommé en accélération et à régime de croisière (au passage, il est assez folklorique de lire un multimètre fixé sur le véhicule quand celui-ci roule, tout en courant à côté de lui). Au final, le choix s'est porté sur une réduction de 2.5:1. C'est cette réduction qui nous a paru la plus efficace (bonnes accélérations et consommation électrique modérée).

Le problème c'est que la fixation du moteur et de l'engrenage sur la roue n'était pas solide et en plus mettaient la roue arrière de biais.

Pour des raisons de robustesse, on a choisi un réducteur planétaire (réduction 3.33:1) du commerce, plus robuste.

2.2.5 La « carrosserie » et le support des cellules solaires

Un panneau solaire, provisoire, a d'abord été réalisé avec des cellules Lemo-Solar. Le panneau était formé par un panneau de 50 cm par 80 cm en polystyrène extrudé de 20 mm d'épaisseur. Des essais ont été alors réalisés avec ce panneau et le châssis du prototype 1 pour tester différents types de moteurs et de réducteurs. La carrosserie n'était alors qu'une planche de polystyrène.

La carrosserie a ensuite été reprise, toujours en polystyrène extrudé de 20 mm d'épaisseur. Là, on a réalisé une coque avec pare-chocs avant en matériau souple (bande de protection pour mur de garage) et becquet arrière pour plaquer la roue motrice au sol. Cette coque est percée de plusieurs trous, pour l'alléger et est fixée au châssis par des tiges aluminium de 4 mm de diamètre autour desquelles sont glissées du tube silicone pour jouer le rôle d'amortisseur. (voir schéma en annexe A)

Les cellules solaires sont fixées sur un autre panneau de 20mm d'épaisseur, en polystyrène extrudé, panneau qui vient se loger ensuite dans la carrosserie et est maintenu en place par des bandes velcro (voir schéma en annexe A).

A nouveau, à moins d'un mois de la compétition, une question nous fait frémir : est-ce que le pare-choc avant va passer sans racler lorsque l'on va attaquer ou terminer la cote de 20%. La, pas de calculatrice, ni de trigonométrie, mais une planche en bois et des cales nous ont permis de vérifier la chose, ça passe, mais pas de beaucoup.

2.3 Partie électrique / électronique

La partie électrique d'un véhicule solaire photovoltaïque se résume au câblage des cellules, au choix des batteries, au choix du contrôleur de moteur et au système de gestion d'énergie (charge de la batterie / gestion de l'énergie en course). Détaillons ces différents points.

2.3.1 Les cellules solaires

Côté cellules solaires, on a la possibilité entre plusieurs technologies:

- Les cellules amorphes: De couleur noire ou bleue très foncée, légèrement rugueuses au touché, ces cellules offrent des rendements assez moyens, de l'ordre de 7 à 10 %. Par contre, leur rendement s'écroule moins vite sous faible luminosité que d'autres technologies.
- Les cellules polycristallines: Ici, le silicium se trouve sous une forme cristalline (par opposition aux cellules amorphes), mais en refroidissant, plusieurs cristaux ont été générés. Elles sont de couleur bleu marine, avec des effets de plaque de nuance de bleu légèrement différents. La surface est lisse au touché. Les rendements vont ici de 12% à presque 16 %. Ce sont les cellules qui présentent le meilleur rapport rendement/prix.
- Les cellules monocristallines: Même procédé que pour les polycristallines, sauf qu'ici, le refroidissement du silicium, plus lent et contrôlé, permet d'éviter que plusieurs cristaux ne se forment. Un seul est généré. La couleur est bleu marine, uniforme et la surface est lisse au touché. Les rendements sont un peu supérieurs aux polycristallines et peuvent du coup atteindre les 18 %, 20% pour des cellules très ciblés. Sensiblement plus chères que des cellules polycristallines.
- Les cellules Tandem: Elles correspondent à l'empilement d'une cellule monocristalline avec une cellule amorphe. Elles ont un meilleur rendement théorique dans la plage de fréquence donnée, mais coûtent plus cher.
- Les cellules en plastique: Comme leur nom l'indique, ces cellules ne sont pas faites à base de silicium mais de matériau organique. Leur rendement est de l'ordre de 4 à 5 %,

sont 2 fois plus chères que des cellules polycristallines et sensibles à l'oxygène et à l'humidité. Elles permettent de réaliser des panneaux souples.

- Les cellules multi-jonctions: Cellules très coûteuses (de l'ordre de 40\$/cm²), chaque jonction est sensible à une gamme de fréquence donnée (par exemple bleu, vert et rouge pour un triple jonctions). Le rendement se trouve donc optimisé par rapport à une cellule classique et peut atteindre presque 40 %. Hors de portée de notre budget.

A noter enfin que les cellules "classiques" (c-a-d amorphe, mono et polycristallines) sont majoritairement sensibles aux fréquences lumineuses dans le rouge et proche infrarouge. L'éclairage d'un panneau sous une lumière fluorescente est donc assez décevant en terme d'énergie récupérée.

Deux types de cellules solaires ont été achetés. Courant été 2006, un premier jeu de 30 cellules 100x100 mm ont été achetés chez Lemo-Solar. Sur le site, les cellules avaient un très bon rendement, mais ceci est du au mode de calcul de la puissance d'une cellule utilisé dans l'industrie. En effet on présente la puissance d'une cellule par le produit de sa tension a vide et de son courant en court-circuit ($P_{max} = U_{co} \times I_{cc}$). Ceci est évidemment faux vu qu'une cellule ne peut pas être à la fois en court-circuit et en circuit ouvert. En fait, la courbe donnant le courant en fonction de la tension en sortie d'une cellule est généralement la suivant. La tension reste d'abord quasiment stable, passant de 0.6 volts à vide à 0.5 volts en charge, avec le courant passant de 0 à 70 % de I_{cc} . Ce point (0.5V / 70% I_{cc}) correspond au point de rendement maximum (Maximum Power Point ou MPP en anglais). Par la suite, si la charge augmente, le courant augmente peu mais la tension chute dramatiquement pour atteindre au final un courant I_{cc} pour une tension de 0 Volts. A noter que ces cellules étaient en fait des cellules amorphes.

En annexe C, on peut voir la courbe de caractérisation faite avec le premier panneau réalisé (22 cellules 100x100mm Lemo-Solar).

Le problème de ces cellules c'est que sous 7 volts, elles ne fournissent que 2 ampères. Suffisant en régime stabilisé, mais pas assez pour les pics de courant lors d'accélération. Du coup, on passe trop de temps à consommer du courant sur la batterie.

D'autres cellules ont donc été achetées directement auprès de Sunways. Leurs cellules ont un bien meilleur rendement et comble du raffinement, il existe un datasheet, avec courbe de réponse et caractérisation. Par contre, ce n'est pas un revendeur et pour acheter 20 cellules directement chez eux, c'est nettement plus sportif. Sans surprise, les cellules solaires forment le premier poste budgétaire.

Le montage des cellules est un processus assez délicat. Il faut nettoyer la surface où l'on va souder les connecteur, chauffer ensuite ces points à 250-300 degrés et y souder des connecteurs (des bandes d'aluminium étamées ou de la tresse à dessouder étamée). On forme alors des bande de cellules (4 cellules par bande dans notre cas + une bande de 2 cellules) pour atteindre 0.22 dm². Les extrémités des bandes de cellules sont soudées à des fils de section suffisante pour passer 5 ampères. Les bandes sont ensuite rassemblées et fixées sur le panneau avec des points de colle Néoprène. Préalablement, les cellules ont été renforcées par un croisillon en balsa 4x4 mm et la fixation de la cellule sur le panneau se fait au niveau du croisillon. L'espace sous cellule permet l'aération et donc le refroidissement des cellules (car les performances d'une cellule solaire décroissent lorsque sa température augmente). Les fils aux extrémités des bandes sont passés à travers le panneau et raccordés entre eux de façon à former une chaîne de 14 cellules en série. Les fils restant (le + et le - du panneau) sont prolongés et soudés à un connecteur de façon à être raccordé au véhicule facilement.

A noter, que le premier panneau réalisé n'a pas été perdu. En effet, même si le rendement n'est pas exceptionnel, c'est quand même une source d'énergie propre et gratuite.

N'oublions pas que ce module solaire est radiocommandé ! Or la radio ne fonctionne pas à l'eau...

Il faut de l'électricité fournie par des batteries. C'est parfait, il suffit de réguler la tension issue du panneau et de le connecter à la radio. Même si l'épreuve devait durer indéfiniment, nous avons l'énergie pour recharger les batteries au soleil !

Bien sûr, le panneau est un peu encombrant mais avec un peu de bricolage et d'imagination on peut joindre l'utile à l'agréable en transformant ce panneau en parasol ! (voir photo en annexe)

2.3.2 Les batteries

Vu que notre panneau fournit, à vide, environ 8 volts, il faut mettre suffisamment de batteries pour être en accord avec cette tension. Cela revient à mettre 6 éléments NI-MH en série (1.2 volts par éléments x 6 élément = 7.2 volts) ou alors 2 éléments Li-Po (3.7 volts par éléments x 2 élément = 7.4 volts).

La charge d'une batterie NI-MH est assez simple : c'est une charge à courant constant jusqu'à ce que le courant atteigne 0 et de toute façon, ces batteries sont assez robustes pour résister à des charges sauvages et des surcharges. Mais elles sont lourdes (6 éléments + le coupleur = 360 grammes).

La charge d'une batterie Li-Po est beaucoup plus subtile. C'est d'abord du courant constant jusqu'à 4.2 volts et ensuite à tension constante jusqu'à un courant nul (en fait inférieur à 0.05 C). En plus elles sont sensibles aux surcharges et peuvent prendre feu. Mais leur poids est moitié moindre que les NI-MH.

Notre choix s'est donc porté sur des cellules ATL de 2300 mAh (voir le datasheet en annexe A). Pour anecdote, ces batteries étaient vendues en grande surface dans une braderie. Les éléments équipaient la base batterie d'un obscur lecteur DVD portable et cette base était vendue 1 euro ! Celle-ci contenait deux éléments Li-Po. Autant dire que les batteries constituent le poste financier le moins onéreux de ce projet et que ceci a largement contribué à sélectionner ces batteries.

2.3.3 Le contrôleur moteur

Un moteur « brushed », c'est à dire classique, est très facile à commander. Quand le courant passe dans un sens le moteur tourne dans un sens, quand le courant passe dans l'autre sens, le moteur tourne dans l'autre sens. C'est simple et ça marche. Pour piloter un moteur dans les deux sens, il faut un pont en H (de préférence avec des transistors MOS) et un petit microcontrôleur pour décoder les signaux venant de la radio et convertir ça en commande PWM pour doser la vitesse du moteur. Le contrôleur peut s'acheter tout fait ou alors se fabriquer pour moins de 15 euros.

Un moteur « brushless », c'est beaucoup plus subtil à commander. En effet, on n'a pas deux mais trois fils, un par phase (c'est donc un moteur triphasé, mais à courant continu) et surtout, il n'y a pas de collecteur, donc pour faire tourner le moteur, il faut commuter les phases dans un ordre bien précis, en analysant la position du moteur. Bref, là aussi, il faut un microcontrôleur pour décoder les signaux de la radio et commander le moteur, mais l'algorithme à mettre en œuvre dans le microcontrôleur est largement plus évolué. Basiquement, la difficulté réside dans la détermination de la position du moteur (son angle instantané) de façon à déterminer quand commuter les phases (remplacer le collecteur d'un moteur « brushed » en somme). Là deux écoles s'affrontent.

D'abord la méthode avec capteur (« sensed » en anglais). On ajoute un capteur (Hall en général) sur l'axe du moteur, capteur qui une fois soigneusement positionné permet de savoir très facilement la position courante du moteur et donc de déterminer quand la commutation de phase doit avoir lieu. Très utilisé dans le monde industriel et les équipements électroniques grand public, jamais en modélisme.

Ensuite la méthode sans capteur (« sensorless » en anglais). Dans ce cas, on ne dispose pas de capteur pour déterminer la position du moteur. On fait appel à la force contre électromotrice du

moteur (Back ElectroMotive Force en anglais ou BEMF) en analysant le signal présent sur la phase non connecté. En fonction de son passage à 0 ou V_{Moteur} , on en déduit quand la commutation de phase doit avoir lieu. Le problème, c'est que la force contre électromotrice d'un moteur est fonction de sa vitesse. Plus il tourne vite, plus la force est grande et facile à analyser. De plus, l'analyse, pour être précise, se fait par échantillonnage du signal présent sur la phase libre et, de ce fait, l'échantillonnage doit être rapide pour permettre l'analyse.

Cette méthode est beaucoup moins précise que celle avec capteur et n'est donc pas utilisée dans le domaine industriel. Par contre, le coût est bien moindre, un capteur à effet Hall, de précision, étant assez cher.

De plus, comme la méthode est peu précise à bas régime, elle se retrouve généralement dans des applications où le couple résistif sur le moteur, à bas régime, est nul ou presque : les hélices et autres ventilateurs. C'est pourquoi on retrouve ce système dans le modélisme avion où le brushless fait une percée fulgurante mais aussi dans les ventilateurs d'ordinateur.

Étant donné que le véhicule solaire est un véhicule léger, donc offrant assez peu de couple résistif à bas régime, le fait d'utiliser un moteur brushless sans capteur n'est pas un mauvais choix. D'autant plus que le véhicule évoluera relativement rarement à bas régime (espérons le !). Le risque est d'obtenir parfois des « faux départs », le contrôleur perdant les pédales et étant incapable de lancer le moteur.

A partir de là, il reste deux possibilités: soit on achète un contrôleur de modélisme, soit on se le fabrique. Vu qu'on est un club de robotique, forcément, on a décidé de se le fabriquer.

Deux circuits d'essai et quelques transistors MOS grillés plus tard, il a fallu se rendre à l'évidence: c'est beaucoup plus compliqué qu'il n'y paraît, même en se documentant et en récupérant toutes les notes d'applications des différents fabricants de microcontrôleurs. Le contrôle d'un moteur faisant appel à l'électronique de puissance, une erreur est souvent sanctionnée par la casse d'un composant.

Le contrôleur qui nous servait à faire nos essais de moteur jusqu'ici était un contrôleur acheté rapidement sur Ebay sans s'apercevoir que c'était un modèle pour avion. Ce détail est important car un avion n'a pas besoin de marche arrière ! Impossible de l'utiliser en course.

On a finalement opté pour un modèle de chez Sky & Technologies, un Quark Pro Race 22 largement sur-dimensionné pour notre véhicule. Mais comme c'était prévisible, le contrôleur a parfois des difficultés à lancer le moteur lorsque le couple est trop important (en côte, par exemple) et dans ce cas, le véhicule hoquette. Tant pis, il faudra faire avec.

2.3.4 La gestion d'énergie

Normalement ici, on devrait discuter de « Maximum Power Point Tracking, ou MPPT » soit en d'autre terme, l'optimisation du rendement du panneau en fonction de la charge mais ... on n'a pas eu le temps de s'occuper de ça.

Concernant la charge des batteries, nous avons fait le raisonnement suivant :

Le panneau peut fournir une tension max de $14 \times 0.626V = 8.764V$ (à vide).

En le connectant à la batterie par le biais d'une diode (il faut trouver une diode à faible chute de tension capable de supporter 5 A) on va chuter d'environ 0.4V --> soit une tension max panneau de 8.3V.

Cela signifie que même si les batteries étaient complètement chargées ($2 \times 4.2V = 8.4V$) la tension du panneau ne dépassera jamais la limite dangereuse des accus Lipo de 4.2V par élément.

Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'ajouter un quelconque régulateur !

Au final, le panneau alimente l'ensemble des éléments du véhicule à travers une simple diode montée en série (pour éviter que la batterie ne se décharge dans le panneau).

On fera mieux la prochaine fois !

3 Les essais et mise au point

La coque et le panneau solaire ont été les derniers éléments réalisés. Les essais ont donc essentiellement eu lieu avec le châssis nu, lesté d'un poids équivalent à celui du panneau solaire.

La campagne d'essai s'est déroulée tout au long du projet, de façon à tester les différents châssis, moteurs ou pneus. Ces essais ont été déjà décrits dans le chapitre 2, en partie, et on peut voir des photos des différents prototypes réalisés au cours de cette campagne de test en annexe, ainsi que le calendrier du développement en annexe E.

On va plutôt développer ici la phase de mise au point une fois le véhicule réalisé. Les essais ont ainsi révélé plusieurs petits soucis.

Tout d'abord, le véhicule n'avance pas droit, chasse de l'arrière à l'accélération et a un comportement très « survireur ». Le problème vient du fait que la roue arrière est légèrement de biais par rapport à l'axe du véhicule (voir photo), vu que la roue a été couplée un peu trop en force avec le moteur.

Le problème sera résolu en utilisant un réducteur planétaire du commerce. Après modifications et une correction sur le trim du servomoteur de direction, le véhicule accélère droit. Par contre, on continue à avoir un comportement fortement survireur vu qu'une grande partie du poids se trouve à l'arrière et qu'en plus on se trouve en présence d'un véhicule à propulsion. Sur ce dernier point, pas de miracle, sans calculateur d'assistance à la trajectoire, il va falloir être de bons pilotes !

Ensuite, l'autre point relevé concerne le poids : près de 1450 grammes, sans la batterie. Il va falloir faire la chasse au poids superflu, pour se rapprocher des 1000 grammes minimums imposés dans le règlement.

Les outils nécessaires pour un régime sont essentiellement une perceuse avec différents forets et une scie à métaux. Un cutter aussi pour la coque.

On va percer le châssis, la coque et le panneau vont être percés de multiples trous, les rebords non nécessaires vont être réduits ou supprimés. Après cette première campagne de réduction de poids, on atteint les 1300 grammes. 150 grammes récupérés sur l'ensemble.

Les 300 grammes restant seront plus durs à trouver. Remplacement de certaines vis acier par des vis nylon quand les contraintes permettent de le faire, réduction de l'épaisseur de la coque aux endroits non critiques, etc....

Au final, le module, sans batterie, pèse quand même 1250 grammes. 250 grammes de plus que les meilleurs concurrents. Mais du coup, en cas de vent, notre module aura une meilleure stabilité.

Le module complet, avec batterie, pèse 1400 grammes, les batteries pesant 150 grammes en tout. Il faut aussi rajouter les 25 grammes du transpondeur.

4 Conclusion

Voilà, le véhicule est réalisé, on s'est (très peu...) entraînés à le piloter, on est prêt à concourir. Est-ce que l'on va gagner ? Probablement pas mais en fait ce n'est pas l'objectif prioritaire.

Principalement, vu que c'est notre première participation, l'objectif est de participer, et tant qu'à faire, de réaliser des performances honorables. Mais surtout, de tenir la distance et tenir les 4 heures de l'épreuve, sans casse !

De plus, au cours de ce développement, un certain nombre de points à améliorer et d'équipements à rajouter ont été identifiés et seront développés lors des prochains concours :

AIRLIOS : Dossier technique

- Une gestion soignée de l'énergie solaire (MPPT)
- Une gestion intelligente de la charge/décharge de la batterie
- Une aide au pilotage, pouvant prendre plusieurs forme : meilleur contrôle du véhicule, anticipation de la trajectoire du véhicule.
- Un système de télémétrie embarquée, vu que c'est désormais autorisé, de façon à analyser les paramètres du véhicule en course

Mais pour l'instant, l'objectif est de se qualifier, de concourir et surtout, de se faire plaisir.

Rendez-vous le 3 juin 2007 !

-O-O-O-O-

A. Documentations Techniques

Les documents rassemblés dans cette annexe correspondent aux documents techniques des différents composants utilisés sur le véhicule ou simplement testés.

AIRLIOS : Dossier technique

- Extrait de la spécification technique de la batterie ATL 385085

XX5085 series have a combination of high energy density, super light and ultra thin. It's a perfect power source solution for PDAs, Web pad and other handheld device.

Nominal voltage	3.7V	Cut-off voltage	3.0V
Standard charge method	Charging the cell initially with constant current at 0.5C and then with constant voltage at 4.2V till charge current < 0.05C		
Max. charge current	1C	Max. discharge current	1.5C
Standard charge	0.5C × 5hrs	Rapid charge	1C × 2.5hrs
Operating temperature	Charging	0°C ~ 45°C	32°F ~ 113°F
	Discharging	-20°C ~ 60°C	-4°F ~ 140°F
	Storage	-20°C ~ 45°C	-4°F ~ 113°F
Cell dimension	Length	85.0 ± 0.5	3.15 ± 0.02
	Width	50.0 ± 0.5	1.97 ± 0.02
Cycle Life	>= 500 Cycles (@0.5C discharge, 23°C)		
Self-discharge	Residual capacity > 90% (@25°C±2°C, 30 days)		

Model	mm	inch	Minimum	Typical	Impedance *2	Gram	Ounce
	305085	3.20	0.126	1250		1320	45
385085	3.90	0.153	1500	1580	40	33.5	1.18
435085	4.50	0.177	1750	1850	35	37.5	1.32

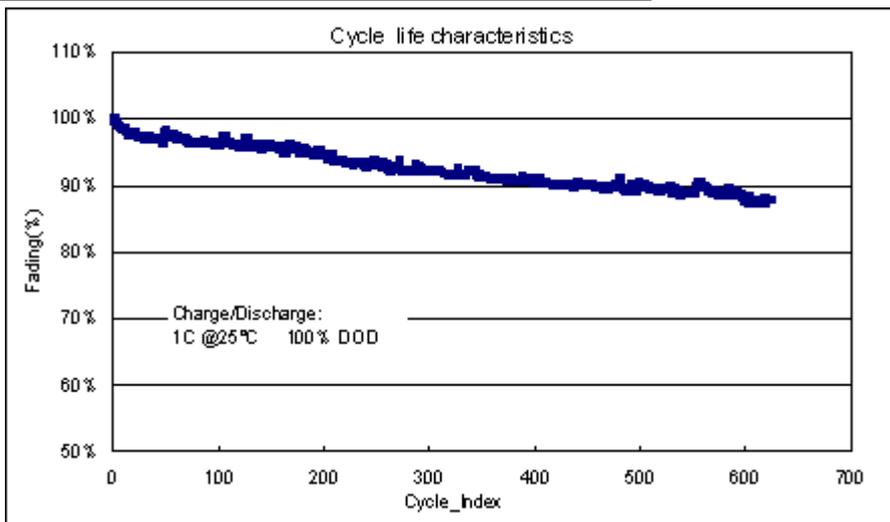
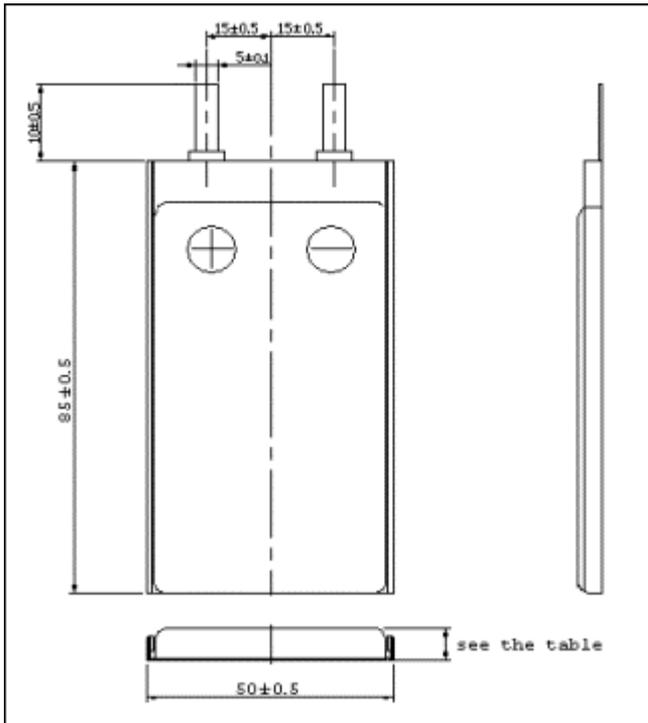
Remark:

*1 @ 0.2C discharge, 23°C

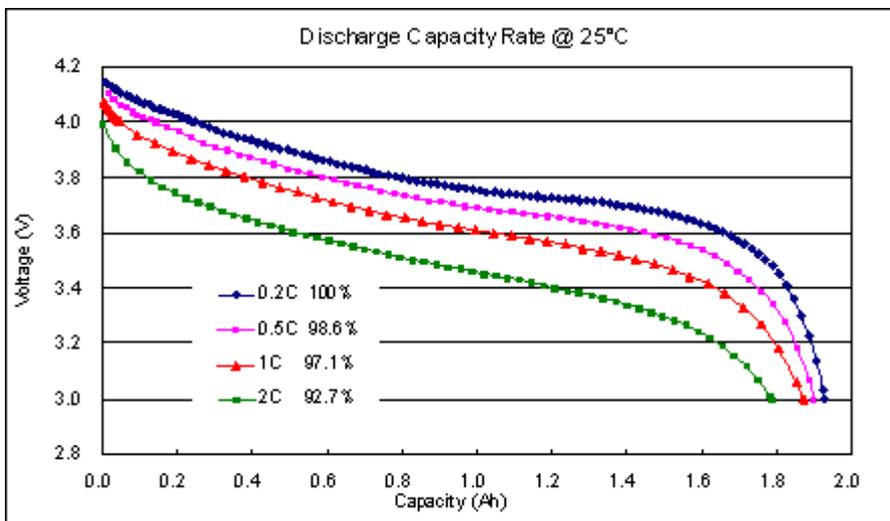
*2 Impedance is measured at AC 1KHz after Standard Charge.

*3 Cell weight is the approximate value for reference.

Cell Dimension Drawing (unit: mm)



Model: 505085



AIRLIOS : Dossier technique

Autres datasheets à rajouter ici.

B. Nomenclature

Liste des pièces constituant le véhicule avec leur point de vente et prix.

Nom du produit	Quantité	Lieu d'achat	Prix de l'ensemble
Polystyrène extrudé (Panneau d'isolation)	2	Magasin de bricolage	10 Euros
Moteur brushless LRK-22/15 Outrunner	1	Ebay, rubrique modélisme	30 Euros + Frais de port
Contrôleur brushless Quark Pro 22A	1	Magasin de modélisme en ligne (Killer Hobbies pour notre cas)	70 Euros, frais de port inclus
Radiocommande Futaba 6EX-HP + Récepteur 6ERP + 4 Servos	1	Pyrénées Modèles ou magasin de modélisme en ligne FRANCAIS	199 Euros
Cellules solaires SunWays CH804800	14 + 6 Supp	Service commercial Sunways AG	280 Euros, frais de port inclus
Batteries LiPo ATL 385085	4 Elements	Déstockage Carrefour	2 Euros *
Roues 68 mm gomme	3 + 1 Supp	Pyrénées Modèles	30 Euros
Réducteur Robbe R4484	1	Pyrénées Modèles	35 Euros
Structure aluminium pour châssis	1 profil en U 1 corniche	Magasin de bricolage	7 Euros
Visserie	Vis M3/M4, acier et nylon + écrous correspondant	STAM	15 Euros
Balsa (renfort de cellules)	6 baguettes	Castorama	3 Euros
Divers	Connecteur, câble, pièces détachées pour la direction, colles	Divers	30 Euros

Total : environ 720 euros. Bien entendu, de nombreuses pièces sont utilisables pour d'autres modèles réduits ou réalisations, mais la somme reste non négligeable. Il est possible de réduire le coût en réalisant un module beaucoup plus basique, mais les composants coûteux (cellules solaires, radio, moteur) sont indispensables.

Remarque 1) : Les batteries faisant partie d'un ensemble déstocké à 1 euro chez Carrefour, leur tarif est anormalement bas et fausse le coût de réalisation du module solaire. Il faut donc prendre en compte le coût réel d'un pack 2 éléments Li-po lors de la réalisation du module.

C. Schémas

Schémas des différents prototypes à rajouter ici.

D. Photographies



Moteur brushless
LRK-22/15 Outrunner

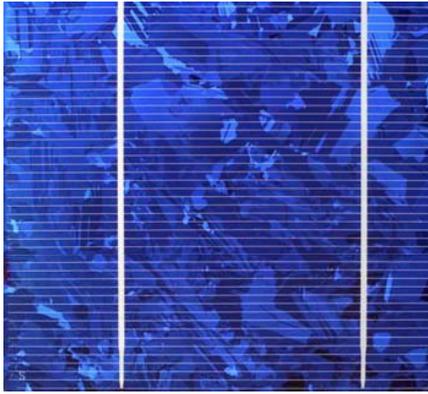
Contrôleur de moteur
brushless Quark Pro 22A



Réducteur Robbe R4484

Servo Futaba S3001





Cellule solaire SunWays
CH804800

Batterie LiPo ATL 385085



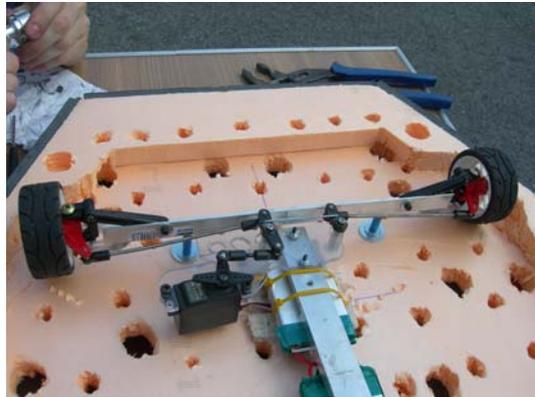
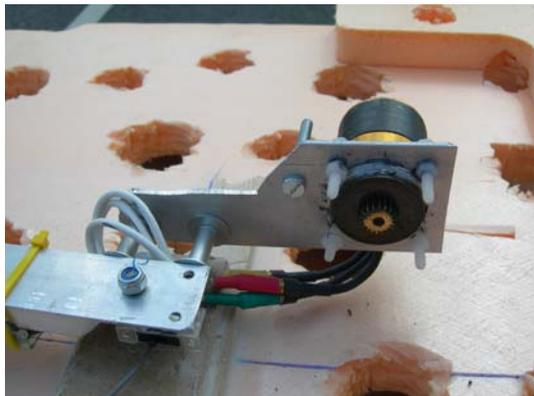
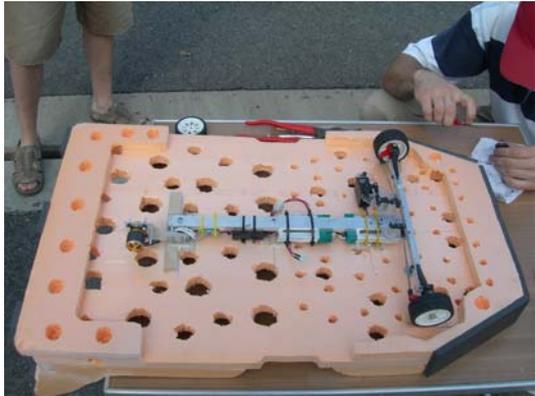
Radiocommande
Futaba 6EX-HP

Récepteur 6ERP



Convertisseur DC/DC
fait maison

AIRLIOS : Dossier technique



AIRLIOS : Dossier technique

