HAL open science

Vers un robot en bois. Seconde partie

Thierry Laurent, Jean-Louis Kergueme, Olivier Arnould, David Dureisseix

To cite this version:

Thierry Laurent, Jean-Louis Kergueme, Olivier Arnould, David Dureisseix. Vers un robot en bois. Seconde partie. Technologie, 2010, 169, pp.24-35. hal-00537880

HAL Id: hal-00537880

https://hal.science/hal-00537880v1

Submitted on 8 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

Eco-conception d'un bras de robot grande vitesse en bois
2. Enseignement par projet en master
« Création Industrielle en Mécanique »

Thierry Laurent, Jean-Louis Kergueme, Olivier Arnould, David Dureisseix

Département d'enseignement de mécanique
Faculté des Sciences, Université Montpellier 2
CC055, Place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER CEDEX 5
{Thierry.Laurent,Jean-Louis.Kergueme,Olivier.Arnould,David.Dureisseix}@univ-montp2.fr

1. Objectifs de l'étude

Le projet support de l'étude présentée est la reconception d'un bras, pièce critique d'un robot parallèle à grande vitesse (voir première partie de l'article), menée en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM, unité mixte de recherche CNRS 5506, équipe DEXTER du département de robotique[1]) et la société Fatronik[2], représentés par Sébastien Krut. L'objectif imposé est l'utilisation majoritaire de matériaux à faible impact écologique, en l'occurrence ici : le bois. Le bras d'origine est un tube de composite carbone stratifié à ±45°, assemblé par collage à des embouts plastiques ou métalliques (figure 1).

Après avoir présenté dans une première partie de l'article le contexte détaillé, l'intérêt de l'utilisation du matériau bois, et la démarche de conception sélectionnée, on s'intéresse ici aux objectifs pédagogiques ainsi qu'à l'illustration de la mise en œuvre pratique de la démarche de conception choisie dans un cadre de formation.

Figure 1. Le robot PAR4 et un bras d'origine (d'après documents LIRMM).

Dans le cadre d'un enseignement professionnalisant à l'université, le master Création Industrielle en Mécanique (CIM) vise à former des étudiants, à niveau Bac+5, en vue d'intégrer des centres de R & D industriels en ingénierie mécanique, de devenir responsables de bureaux d'études, ingénieurs technico-commerciaux, chargés d'affaire…. L'offre de formation, sur 2 ans, supportée par le département d'enseignement de mécanique[3], est une refonte des anciens IUP GMP et DESS du même domaine.

Durant la première année de ce parcours de master, une unité d'enseignement (UE) totalisant 10 ECTS (*European Credit Transfer System*) sur 60 pour l'année complète, propose aux étudiants un projet industriel. L'objectif est double : d'une part, ce projet vise à mobiliser leurs compétences et connaissances pluridisciplinaires, acquises dans d'autres UE (simulation, dimensionnement, choix de composants, choix de matériaux, CMAO, gestion de projet, méthodes professionnelles et communication) au service d'une étude spécifique ; d'autre part, les étudiants sont directement mis en contact avec le client industriel qui a proposé le projet, différent chaque année, source de motivation supplémentaire.

Ce projet est donc transversal sur le semestre, et s'organise sous forme de consultations régulières avec l'équipe

1 http://www.lirmm.fr
2 http://www.fatronik.com
3 http://www.meca.univ-montp2.fr/

enseignante, ainsi que de réunions avec le client, motivées par l'ensemble des étudiants. Afin de limiter le nombre d'étudiants en interaction entre eux, la promotion est répartie sous forme de groupes de 5 à 6 étudiants, travaillant de façon concurrentielle sur le même projet. Une consultation comporte comme acteurs : un groupe d'étudiants qui doivent être les moteurs de la réunion, ainsi qu'une partie de l'équipe pédagogique qui se met à leur disposition comme consultants. Une autre organisation possible consiste à mettre en place un système de jetons, à charge à chaque groupe d'étudiants de gérer ce fond limité en l'échangeant contre les consultations des enseignants. Bien qu'augmentant l'implication des étudiants dans le déroulement du projet, cette approche est plus difficile à mettre en place et demande une flexibilité accrue. Nous ne l'avons pas retenue jusqu'à présent mais elle est appliquée avec succès sur des projets moins longs et moins lourds.

Les moyens affectés sont de plusieurs ordres : dans l'emploi du temps, de mi-septembre à décembre, une demi-journée par semaine est consacrée au projet, pendant laquelle se déroulent les consultations par groupe, à tour de rôle. Une autre demi-journée banalisée est réservée pour le projet dans la même période. Une salle équipée pour la CMAO est disponible dans ces mêmes créneaux, et divers outillages et instrumentations sont mis à disposition. De fin janvier à fin février, de nombreux créneaux sont prévus dans l'emploi du temps pour la phase de fabrication du prototype qui se déroule dans l'atelier de mécanique, équipé en moyens d'usinage conventionnels, ainsi qu'en prototypage rapide (CN). Le budget alloué est limité par groupe (de l'ordre de 300€) et permet l'achat de matériau, composants… selon une procédure d'achat prédéfinie dans le cahier de bord du projet. Les limitations imposées par les ressources disponibles font partie des contraintes du projet ; en particulier, plusieurs jalons sont imposés dans un GANTT succinct (figure 2) que les étudiants devront compléter lors de leur gestion de projet.

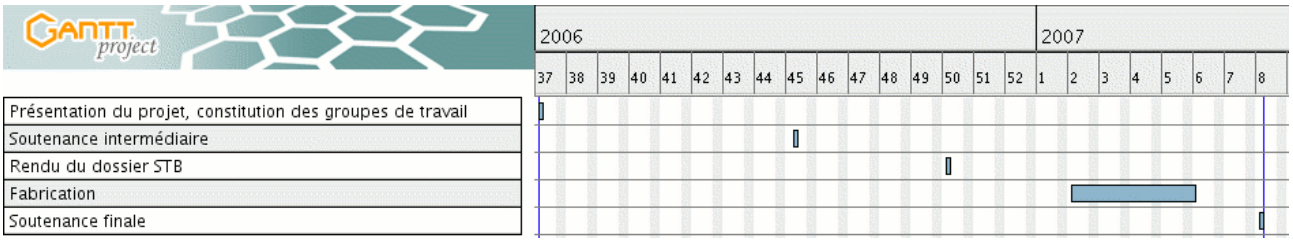


Figure 2. Jalons du projet (avec GANTT project[4]).

Quelles compétences à acquérir pour les étudiants ? Les attendus pour la formation sont :

- l'animation d'un groupe de travail et la planification des étapes du projet, encadrée par un consultant « conduite de projet » ;
- la recherche de l'état de l'art et éventuellement la réalisation d'une revue critique de plusieurs cahiers des charges fonctionnels (réalisés sur le même sujet par d'autres étudiants) en utilisant des outils d'analyse de la valeur, encadrée par un consultant spécialiste ;
- l'étude et l'évaluation de la ou des solutions techniques (réalisation d'une maquette numérique de la solution validée), encadrées par des consultants spécialistes de la conception et de la CMAO, ainsi que d'autres disciplines (selon la teneur du projet) ;
- la réalisation d'un dossier technique (ensemble des documents nécessaires à la fabrication des éléments, à l'achat de composants standards et au montage) ;
- la présentation de la revue critique et de leur propre cahier des charges fonctionnel, validé par le client, et du dossier technique (avec soutenance orale devant le client) ;
- la réalisation du prototype fonctionnel complet de leur solution retenue, étape de fabrication menée par les étudiants eux-mêmes et encadrés par un assistant-ingénieur prototypiste ;
- la réalisation des essais de mise au point du prototype et la validation des performances attendues par le client ;
- la présentation finale du projet devant le client et l'ensemble des consultants, avec retour sur le cahier des charges initial.

Quelles retombées pour le client ? En général sur la base d'une étude de conception ou de reconception, parfois avec clause de confidentialité, le projet permet d'aboutir à plusieurs prototypes fonctionnels issus de conceptions indépendantes, ce qui permet d'avoir une pré-étude assez large. Il n'est pas rare que l'industriel souhaite accueillir un ou plusieurs stagiaires au second semestre (stage de 19 semaines à partir du mois de mars) pour finaliser l'étude. En contre partie, il présente la problématique et ses contraintes aux étudiants en début de projet, participe à une réunion intermédiaire, aux soutenances et à l'évaluation, et accepte de prévoir une ou deux réunions pour répondre à des questions spécifiques émanant des étudiants (celles qui présentent un intérêt collectif sont retransmises à l'ensemble de la promotion).

[4] http://ganttproject.sourceforge.net/

2. Dossier d'orientation : analyse du besoin, caractérisation et hiérarchisation des fonctions

2.1 Introduction : processus de conception

La démarche suivie dans le cadre de la formation est une adaptation de la démarche de conception « CESAM » développée par Marouzé [1] et utilisé par le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Présentée dans la première partie de l'article, elle est illustrée dans la figure 3.

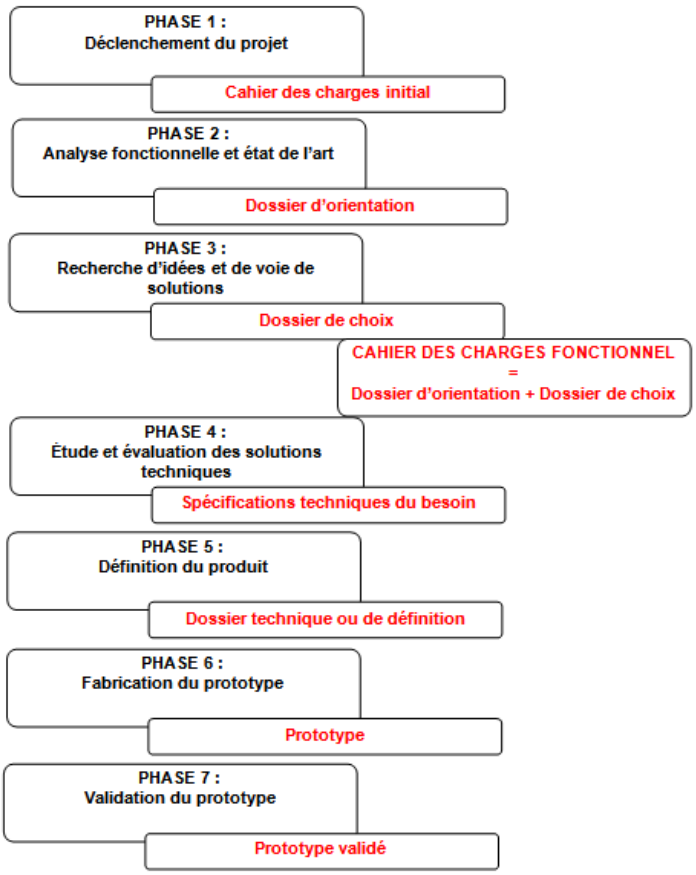


Figure 3. Processus de conception adopté (CESAM), en rouge le rendu correspondant à chaque phase.

2.2 Analyse et validation du besoin

Avant de répondre au besoin du client, il est important de prendre le temps de définir clairement et de valider le besoin fondamental. Pour ce faire, nous utilisons l'outil « bêtes à cornes ». Il s'agit ici d'exprimer synthétiquement ce que souhaite le client en répondant à trois questions :

- à qui ce produit rend-t-il service ?
- sur quoi agit-il ?
- dans quel but ?

La figure 4 donne une représentation de cet outil et conduit à l'expression du besoin sous la forme « utiliser des matériaux dont la fabrication et le recyclage soient les plus écologiques possible et servir ainsi de vitrine technologique. »

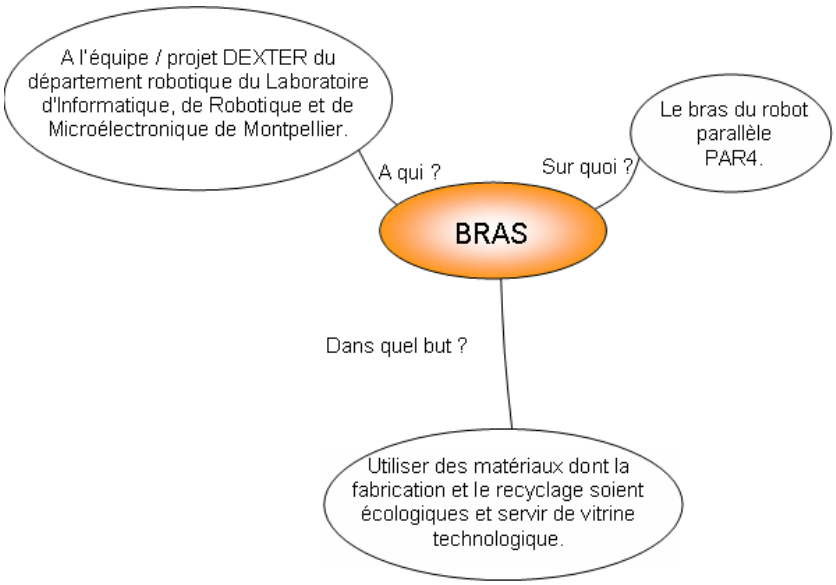


Figure 4. « Bête à cornes » du bras de robot à reconcevoir

Là encore, pour la validation du besoin on répond à trois questions pour prendre conscience et contrôler les risques encourus dans le développement de ce projet :

- Pourquoi le produit existe-t-il ? Pour répondre à une demande forte de conception de produits avec des matériaux à faible impact écologique (en termes de bilan énergétique lié à l'extraction, la transformation du matériau, la fabrication, la maintenance et le recyclage du produit). On a montré, dans le premier article, que l'optimal serait d'utiliser du bois massif de provenance locale.
- Qu'est ce qui pourrait faire disparaître le besoin ?
    - une évolution du prototype PAR4 qui n'utiliserait plus de bras ;
    - la découverte d'un matériau plus facilement recyclable et ayant des propriétés mécaniques supérieures au bois ;
    - la diminution des réserves de bois ;
    - l'ajout de contraintes technologiques que l'utilisation du bois ne pourrait pas satisfaire ;
    - la disparition de la politique écologique ;
- Quel est le risque de la disparition ? Actuellement compte tenu de nos connaissances sur l'élan écologique mondial, la probabilité de disparition du besoin est faible.

Une fois le besoin validé, l'étude se poursuit par la recherche et la caractérisation des fonctions de service, en appliquant l'outil diagramme « Pieuvre » ou diagramme des interacteurs. Classiquement, ce type d'outil est établi en définissant au préalable la phase ou la séquence dans laquelle le système rendra service à d'autres milieux extérieurs ou sera contraints par eux. L'identification de ces phases se fait en établissant le cycle de vie du produit.

Cycle de vie du produit : nous ne développerons pas le cycle de vie complet. Nous allons nous attacher principalement aux phases couvertes par les objectifs opérationnels du projet correspondant au montage du nouveau bras sur le robot PAR4 et à son utilisation (tests du prototype).

Diagramme des interacteurs : pour chaque phase du cycle de vie du produit, on recherche les interacteurs (ou milieux extérieurs), composantes en relation physiques (ou sensitives) directes avec le produit. On identifie les fonctions de service par les relations existant entre les interacteurs et le produit. Nous choisissons ici de ne développer que le diagramme des interacteurs de la phase utilisation (ou test) du nouveau produit dans la figure 5.

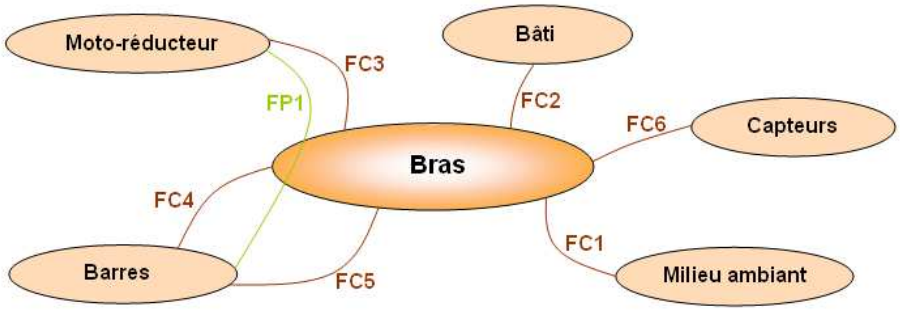


Figure 5. Diagramme des interacteurs de la phase utilisation

Enoncé des fonctions.

FP1 : assurer la liaison entre le moto-réducteur et les barres, par l'intermédiaire de pièces en matériaux à faible impact écologique.
FC1 : résister au milieu ambiant.
FC2 : éviter les collisions entre le bras et le bâti.
FC3 : s'adapter au moto-réducteur existant.
FC4 : s'adapter aux barres.
FC5 : éviter les collisions entre le bras et les barres.
FC6 : prévoir les surfaces de contact des capteurs.

Il est important de définir ou de caractériser, à ce stade de l'étude, les interacteurs (tableau 1).

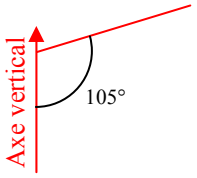
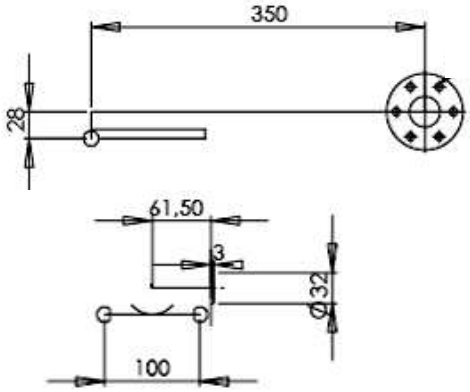
Interacteur	Caractéristiques	
	Critères	Niveau
Moto-réducteur	- couple maximal - vitesse de rotation maximale - mise en position - maintien en position - matériau	10,8 N.m 11 000 tr/min $\varnothing_{centrage}$ = 32 mm, $L_{centrage}$ = 3 mm 6 vis M8 sur Ø60 Alliage d'aluminium
Barres et ressort	- matériau - rotules - entraxe rotules - effort de précharge des ressorts - efforts maxi	 Polymère $\varnothing_{rotule}$ = 16 mm L_{rotule} = 100 mm Environ 60 N Voir la figure 6 et le tableau 3
Bâti	Encombrement maximal : - longueur - largeur - hauteur	 370 mm 126 mm 80 mm
Milieu ambiant	Domaine d'utilisation en intérieur : - température - humidité relative	 5 °C < T < 35 °C HR < 70 %
Capteurs	Position du contact : - décalage angulaire / axe du bras (O, z) - capteur 1 - capteur 2 - capteur 3 - distance suivant x / appui plan réducteur : - capteur 1 et 2	 15° 90° 0°

	- capteur 3 - distance capteurs / axe du réducteur (O, x)	31 mm 89 mm 40 mm

Tableau 1. Caractérisation des interacteurs.

Les fonctions de service sont ensuite caractérisées qualitativement et quantitativement au travers de paramètres permettant de juger de l'accomplissement de ces fonctions. On trouvera dans le tableau 2, pour chaque fonction :

- la liste des critères d'appréciation,
- le niveau de ces critères,
- la flexibilité F de ces niveaux (« limites d'acceptation »).

Fonctions	Critères	Niveau	F*
FP1	Atteindre les positions extrêmes angulaires du bras	Rotation autour de l'axe du moto-réducteur (O, x) 	F0
	Résister aux efforts maximum	Voir la figure 6 et le tableau 3	F0
	Respecter la position relative des surfaces fonctionnelles		F0
	Dépasser les rigidités du bras existant	- raideur en traction - raideur en flexion - raideur en torsion	F0
	Utiliser un maximum de bois	100 %	F1
FC1	Résister aux variations de température	5 à 35 °C	F1
	Résister aux variations d'humidité relative	20 à 70 %	F2

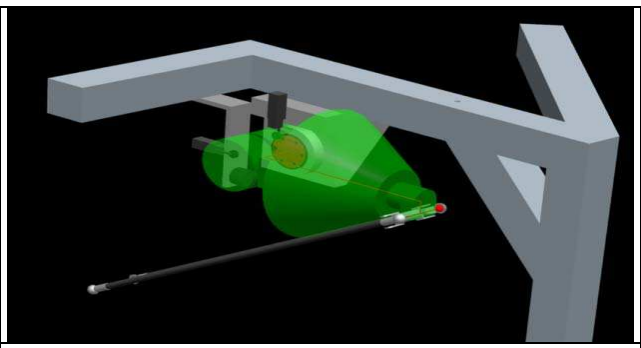
FC2	S'inscrire dans un volume limite (en vert)		F0
FC3	Compatibilité des matériaux	Optimum	F0
	Ne pas dépasser le moment d'inertie autour de l'axe de rotation du moto-réducteur du bras existant	Moment d'inertie / axe rotation (0, x)	F0
	S'adapter au maintien en position existant	6 vis M8 sur Ø 60 (voir FP1)	F0
	S'adapter à la mise en position existante	Appui plan + centrage court ($\varnothing_{centrage}$ = 32 mm, $L_{centrage}$ = 3 mm)	F0
FC4	S'adapter aux matériaux des barres	Usure et frottement (non précisé par le client, existant = téflon/aluminium)	F0
	S'adapter à la mise en position	2 surfaces sphériques Ø 16 mm, d'entraxe 100 mm (voir FP1)	F0
FC5	S'inscrire dans un volume limite	Voir FC2	F0
FC6	Prévoir les surfaces de contact des capteurs.	- capteur d'initialisation actionné à 15°/ horizontale. - sécurités électriques décalée l'une par rapport à l'autre de 90°. Position haute actionnée 15°/ horizontale	F1

Tableau 2. Caractérisation des fonctions.

Il est important de remarquer que les critères de résistance aux variations hygrothermiques de la fonction FC1 ne sont pas liés au comportement ou à la précision du robot puisque les manipulations, précédées systématiquement d'une phase d'initialisation machine, sont rapides par rapport aux variations de l'environnement. Le problème porte surtout sur des risques d'éclatement d'assemblage de pièces en bois dus aux différences de coefficients de dilatation hygrothermique entre les directions longitudinale et transverses.

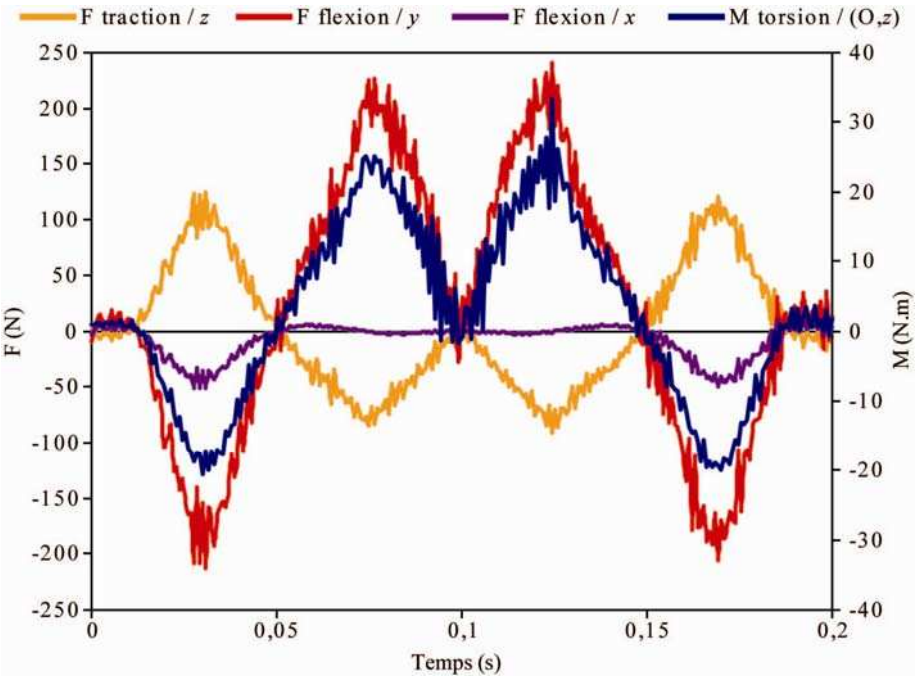


Figure 6. Evolution temporelle des efforts F et du moment M appliqués par les rotules sur le bras au cours d'un cycle (données LIRMM obtenues par simulation en dynamique multicorps).

Hiérarchisation des fonctions.

La figure 7 donne le tableau dit « tri-croisé » permettant de dresser l'importance relative des différentes fonctions d'interaction de la figure 5. Le rang final de chacune des fonctions montre que la fonction principale FP1 est celle sur laquelle il faudra attribuer le plus d'importance, ce qui est logique car elle transcrit l'objet même de l'étude. Par ordre de moindre importance, les fonctions qui suivent sont FC3 et FC4. Ceci est cohérent avec le fait qu'elles sont indispensables au bon fonctionnement général du robot car elles permettent de pouvoir monter le bras sur celui-ci. Viennent ensuite FC2 et FC5 qui contrôlent l'absence de collision du bras avec son environnement. Là aussi, ces fonctions sont indispensables pour un bon fonctionnement mais en second plan par rapport à FC3 et FC4. FC1 se retrouve à un niveau inférieur car cette fonction est moins importante dans le cas d'un prototype. Enfin, FC6 se retrouve à 0 ce qui est cohérent avec le fait qu'il est possible, et relativement aisé, de modifier la position des capteurs de position (voir dans le tableau 2 la flexibilité importante de cette fonction)

FP_1	**FC_1**	**FC_2**	**FC_3**	**FC_4**	**FC_5**	**FC_6**	**Total**	**%**	**Rang**
FP_1	FP_1=2	FP_1=1	FP_1=1	FP_1=1	FP_1=1	FP_1=1	7	28	1
	FC_1	FC_2=2	FC_3=2	FC_4=2	FC_5=2	FC_1=2	2	8	6
		FC_2	FC_3=1	FC_4=1	0	FC_2=1	3	12	4
			FC_3	0	FC_3=1	FC_3=1	5	20	2
				FC_4	FC_4=1	FC_4=1	5	20	2
					FC_5	FC_5=1	3	12	4
						FC_6	0	0	7
							25	100	

Figure 7. Tableau de tri croisé.

Pour les étudiants cette étape du projet leur permet de mettre en place leur groupe de travail, de s'approprier (prise en main) le sujet et de prendre les premiers contacts avec le client. Cette immersion dans le sujet est une étape importante pour la motivation des groupes de travail pour la suite du projet. Elle permet enfin d'appliquer les outils de l'analyse fonctionnelle sur un cas concret (visuel).

3. Dossier d'orientation : recherche d'informations

Suite à l'analyse fonctionnelle et en particulier à la caractérisation des fonctions (tableau 2), il est nécessaire d'évaluer certains niveaux d'acceptation de leurs critères : les différentes raideurs du bras existant (FP1 – critère : dépasser les rigidités du bras existant) et son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation du moto-réducteur (FC3 – critère : ne pas dépasser le moment d'inertie autour de l'axe de rotation du moto-réducteur du bras existant). L'objectif a été ici de mettre en place un protocole expérimental sur le bras original en carbone permettant de mesurer ces différentes caractéristiques, dans des conditions les plus proches des chargements réels en reproduisant les liaisons du bras avec les autres pièces du robot afin de respecter au mieux le CdCi. De plus, pour assurer une bonne cohérence expérimentale, ce même protocole doit également servir à vérifier, à valider et à comparer les performances techniques des différents prototypes par rapport au bras existant.

3.1 Mesure des rigidités

L'objectif est de mettre en place un système simple de mise en chargement du bras en traction (nous supposons le comportement symétrique en traction/compression), flexion et torsion et de mesurer les déflexions induites pour en déduire les rigidités. Le bras doit être maintenu avec les mêmes mise et maintien en position que sur le moto-réducteur (FC3) et chargé au niveau des rotules (FC4) par des efforts similaires aux efforts maximum supportés par le bras sur un cycle (FP1 et figure 6). Pour simplifier la mise en charge, des poids calibrés de 0,5 kg et 1 kg sont utilisés. Pour des raisons de sécurité la masse totale ne dépasse pas 5 kg mais reste du même ordre de grandeur que les efforts maximum calculés (cf. figure 6). En effet, il est important ici de rester dans les mêmes ordres de grandeurs d'effort car des non-linéarités sont suspectées (*e.g.,* contact au niveau des rotules). Une balance (précision 0,1 g) est mise à disposition pour les mesurer. Pour minimiser le nombre de pièces à réaliser, nous utilisons l'étau d'une table de fraiseuse comme support.

A partir de ce cahier des charges succinct pour le banc d'essai, chaque groupe d'étudiants a mis au point un protocole expérimental avec définition des pièces nécessaires à leur réalisation. Après présentation et comparaison des différents protocoles, une seule solution (protocole et pièces) a été retenue. Une vue du système de mise en charge, de mise et maintien en position et de mesure est présentée sur la figure 8 dans le cas d'un chargement de flexion suivant y. L'interface entre les rotules et le support de poids est modulable et permet de réaliser les chargements suivants : flexion suivant y (figure 8), traction (déviée) en mettant le bras à la verticale grâce à la forme en croix de l'interface bras/étau (figure 8) et la combinaison d'un couple de torsion suivant (O, z) avec un effort de flexion suivant y à l'aide d'un bras

de levier d'environ 200 mm. Plusieurs comparateurs micrométriques sont répartis sur le banc d'essai afin de : vérifier la présence éventuelle de déplacement au niveau de l'encastrement dans l'étau, mesurer la déflexion suivant la direction de chargement et détecter un éventuel déplacement transverse au chargement suite à des effets de couplage du fait d'un chargement en dehors des axes principaux du matériau constitutif du bras.

Le choix des capteurs de déplacement s'est basé sur l'estimation des déflexions d'un tube de fibres de carbone/résine époxy provenant du fabricant STRUCTIL[5] de diamètre extérieur 60 mm, d'épaisseur 4 mm et de longueur 350 mm fait d'un composite stratifié ±45°. Les propriétés élastiques utilisées sont estimées à partir de la base de données du logiciel CES-Selector[6] pour un composite stratifié similaire avec environ 60% de fibres : module d'élasticité longitudinal 11 GPa et de cisaillement 3 GPa. Le tableau 3, présentant les raideurs calculées dans ces conditions, montre qu'il est impératif d'utiliser des comparateurs micrométriques pour mesurer les flèches en torsion et en flexion ainsi qu'un amplificateur mécanique pour la traction. Cet amplificateur se base sur le principe du bras de levier et permet d'avoir une amplification de l'ordre de 10.

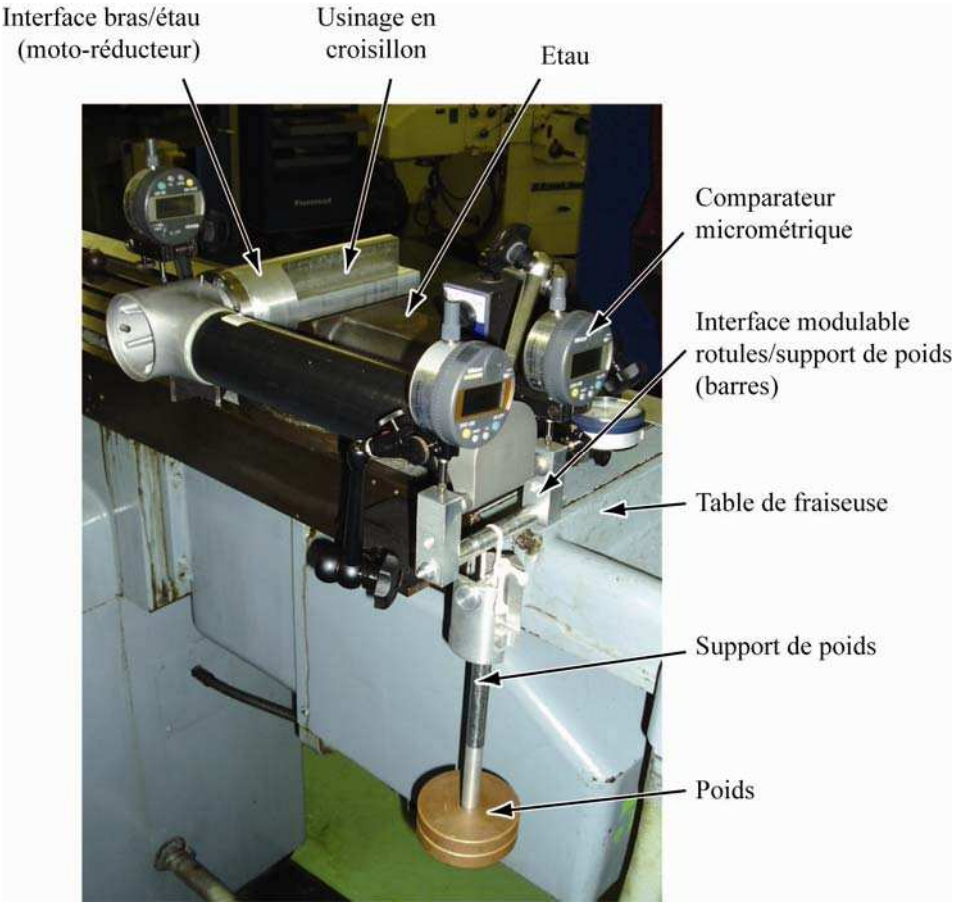


Figure 8. Banc d'essai de mesure de raideur dans le cas de la flexion suivant y du bras en carbone.

Chargement	*Effort maximal au cours d'un cycle*	*Effort appliqué pour l'essai*	*Raideur du tube théorique*	*Flèche théorique sous le point de charge*
Flexion / y	240 N	49 N (5 kg)	235 kN/m	0,2 mm
Torsion	30 N.m	9,8 N.m	2600 N.m	0,2 mm (0,2°)
Traction	120 N	49 N (5 kg)	6200 kN/m	8 µm

Tableau 3. Estimation des rigidités du bras en carbone et de l'ordre de grandeur des déplacements mesurés.

Le tableau 4 donne les valeurs moyennes obtenues expérimentalement et les écarts sur les mesures entre les groupes. Les écarts élevés en flexion et en torsion sont imputables au manque de répétitivité entre étudiants. On constate aussi une différence entre les valeurs théoriques pour le tube seul et les résultats expérimentaux sur le bras complet en

[5] http://www.structil.fr/fr/produits/avant_profiles.html
[6] http://www.grantadesign.com/products/ces/

particulier pour les raideurs en torsion et en traction. Dans ces deux cas, la rigidité théorique du tube est importante et on suppose que la déformation provient principalement des joints de colle entre le tube et les interfaces en aluminium. Cette constatation joue en faveur d'un bras en bois massif qui ne comporterait pas d'interface collée.

Chargement	*Flèche moyenne mesurée sous le point de charge*	*Raideur moyenne mesurée*	*Ecart sur les mesures*
Flexion / y	0,15 mm	320 kN/m	38 %
Torsion	2,1 mm (1,19°)	470 N.m	39 %
Traction	0,095 mm	390 kN/m	27 %

Tableau 4. Flèches et rigidités moyennes mesurées sur le bras en carbone.

3.2 Mesure du moment d'inertie

Le moment d'inertie du bras par rapport à l'axe de rotation du moto-réducteur a été mesuré de deux façons. Comme il était impossible d'utiliser directement le moto-réducteur comme liaison, une méthode simple et indirecte a été développée par les étudiants. La période d'oscillation du bras, pour des petits angles, est mesurée en le faisant simplement osciller autour des rotules entre deux supports. Ceci permet, connaissant la masse du bras et la distance de cet axe au centre de gravité, de déterminer le moment d'inertie du bras par rapport à l'axe passant par le centre des deux rotules (rayon des sphères négligé). Il faut donc déterminer la position du centre de gravité dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Pour ce faire le bras est suspendu dans deux positions différentes (par l'un des perçages de l'interface bras/moto-réducteur et par les rotules) et des photographies sont prises dans le plan (y, z) comme l'illustre la figure 9. Un fil à plomb (de faible masse) est suspendu devant le bras afin de déterminer la verticale entre le point d'accrochage et le centre de gravité. La position de ce dernier est déterminée par recoupement à l'aide des deux photographies. Le moment d'inertie autour de l'axe de rotation du moto-réducteur est ensuite déterminé en appliquant le théorème de Huyghens.

Figure 9. Exemple d'une photo prise pour déterminer la position du centre de gravité dans le plan (y, z). Une autre photo est prise en suspendant le bras par les rotules.

La période d'oscillation est déterminée à l'aide d'un chronomètre sur une dizaine d'oscillations pour diminuer l'incertitude de mesure. Les résultats donnent une valeur moyenne de 0,029 kg.m² avec une erreur relative de mesure de l'ordre de 6%. La plus grosse source d'erreur provient de la méthode de détermination de la position du centre de gravité. Une vérification est faite par l'équipe enseignante par la suite en réalisant directement sur le bras une liaison pivot au niveau de l'axe de rotation du moto-réducteur. La technique utilisée repose aussi sur la mesure de la période d'oscillations qui donne un moment d'inertie de l'ordre de 0,034 kg.m² avec une erreur relative de mesure de 4%.

Cette phase du projet a permis aux étudiants de mettre en place une première démarche (simplifiée) de conception et de réaliser un montage d'essai avec mise au point d'un protocole expérimental à partir d'un cahier des charges. Après confrontation de chacune des solutions proposées, au cours d'une présentation orale avec argumentation de la solution, un protocole commun à tous les groupes a été retenu. Chaque groupe a ensuite réalisé, exploité et critiqué le résultat des

essais. Cette démarche expérimentale leur a aussi permis d'appliquer le cours de dynamique des solides et de résistance des matériaux.

A ce stade du projet les fonctions sont entièrement caractérisées, ce qui permet de poursuivre par la recherche et l'évaluation des principes de solution.

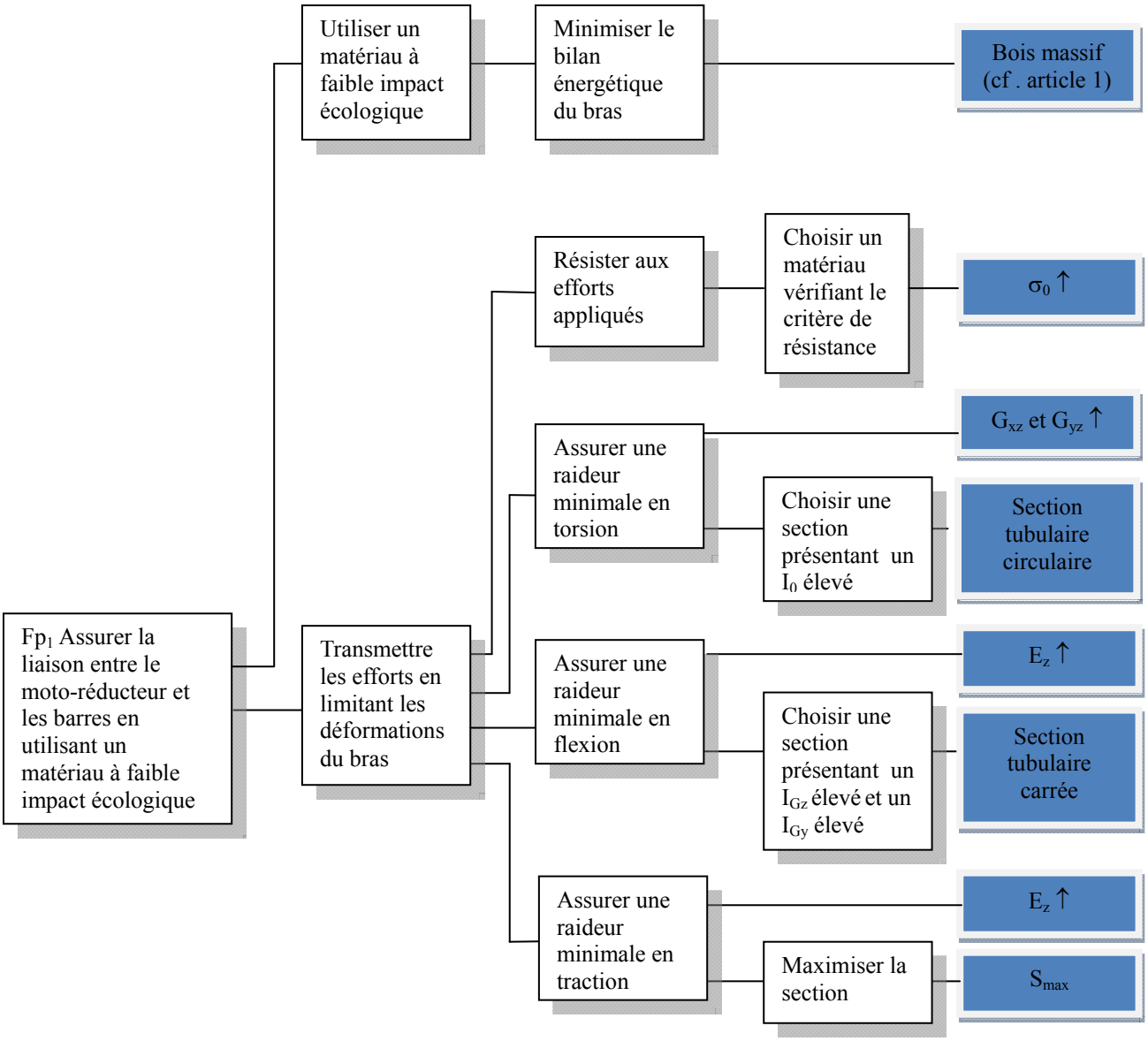
4. Recherche et évaluation de principes de solution

Nous décidons ici de ne présenter qu'une partie du FAST relatif à la fonction principale (figure 10). Le choix de la présentation de ce FAST partiel a pour but :

- de montrer le détail de cet outil permettant à partir des fonctions de service de développer les fonctions techniques et les solutions qui en découlent ;
- de dégager des voies d'études futures.

On aboutit globalement à l'issue de cette étape à un ensemble de solutions (on trouve parfois le terme de « sous-solutions » [2]), chacune répondant à une partie du besoin fondamental. Il appartient ensuite au concepteur de faire des combinaisons cohérentes et compatibles de ces solutions partielles pour construire des propositions de solutions d'ensemble répondant globalement au besoin.

Ces différentes solutions d'ensemble sont évaluées au moyen d'une matrice d'évaluation des solutions qui permet de vérifier l'adéquation technique de la solution avec le besoin. La figure 11 montre en éclaté l'assemblage des sous-solutions et leur intégration dans une solution d'ensemble.



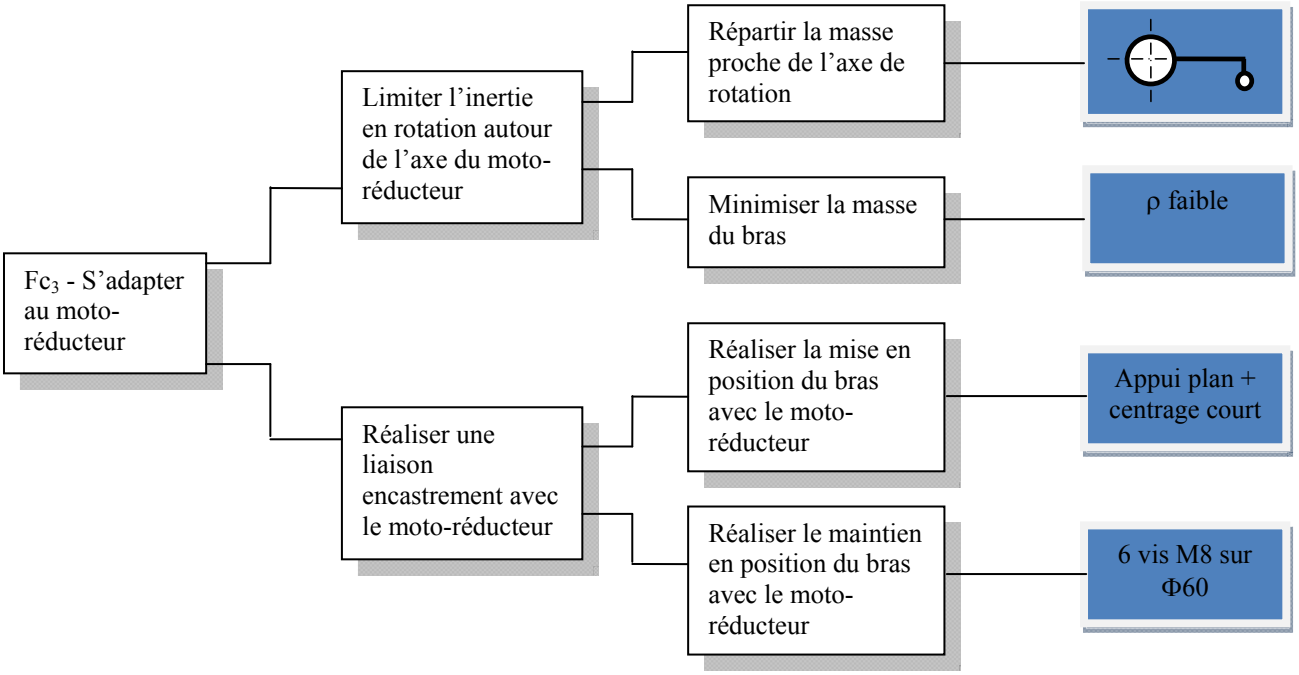


Figure 10. FAST partiel de Fp_1 et de Fc_3.

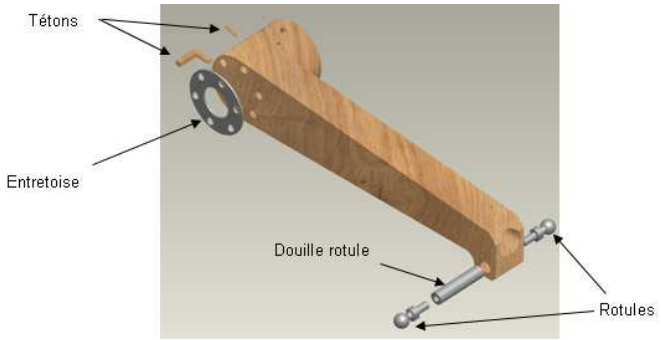


Figure 11. Eclaté de la solution d'ensemble retenue par un groupe d'étudiants.

Cette partie est le cœur du projet avec, pour les étudiants, la mise en place d'une réelle démarche complète de conception et d'innovation s'appuyant sur l'utilisation des outils de conception vus en cours avec recours à des critères de choix de solutions. Suite à ces travaux, les étudiants ont réalisé une présentation et une argumentation orale devant l'industriel et l'équipe enseignante afin de valider un choix de solution propre à chacun des groupes.

Après la validation des principes de solutions, l'étape suivante consiste à préciser les spécifications techniques.

5. Spécifications techniques du besoin

Les FAST des fonctions (figure 10) montrent qu'il est nécessaire de choisir un matériau à forts modules d'élasticité et à faible densité. Le dimensionnement de la solution retenue passe par l'optimisation du choix de matériau.

5.1 Pré-dimensionnement et choix du matériau bois

Pour utiliser une démarche de choix de matériau [3, 4] dans le cadre d'un prédimensionnement, quelques simplifications vont être nécessaires ; la première consiste à modéliser le bras comme une poutre de section variable et de longueur imposée. L'objectif pris en compte ici est de minimiser l'inertie en rotation autour de l'axe du moto-réducteur. La contrainte de conception est la tenue mécanique ; pour le bois, un critère de Tsaï est bien adapté [5]. Avec l'hypothèse de poutre envisagée, dans chaque section, on ne prend en compte qu'une contrainte normale σ (dans la direction longitudinale du bois, qui est alignée avec l'axe du bras dans le cas d'utilisation de bois massif) et une contrainte de cisaillement τ. Dans ce cas, le critère s'écrit, en chaque point de chaque section : $(\sigma/\sigma_0)^2 + (\tau/\tau_0)^2 \leq 1$

Pour simplifier l'analyse, on considère que pour tous les bois considérés, $\tau_0 = \alpha\,\sigma_0$ où α est un paramètre constant

($\alpha \approx 0{,}2$ [6, 7]). Il ne reste alors qu'un seul coefficient matériau qualifiant sa résistance mécanique σ_0. Dans ce cas, le critère précédent s'écrit $\sigma_{eq} \leq \sigma_0$ où la contrainte équivalente est $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + (\tau/\alpha)^2}$

Pour ne disposer que d'un seul paramètre géométrique libre d_0, pour une forme de section donnée, on considère que la dimension de cette dernière est de la forme $d(x) = d_0\, p(x)$ où $p(x)$ est la forme du profil obtenue par saturation de la contrainte de résistance dans chaque section : $\sigma_{eq}(x) = \sigma_0$. En remarquant que le chargement est proportionnel (figure 6), on ne conserve que l'effort de traction N comme paramètre. On obtient pour le profil $p(x) = \left(\frac{a\,x}{L} + b\right)^{1/3}$ avec a et b des constantes dépendant des rapports de charge et de la forme de la section et pour le critère de résistance $\sigma_{eq} = NLd_0^{-3} \leq \sigma_0$. Dans notre cas et une section circulaire pleine, a et b prennent les valeurs suivantes : a = 26,5 et b = 21,9. Le profil étant ainsi fixé, la fonction objectif à minimiser est alors de la forme $I = \rho d_0^2 I_0$ (où I_0 peut se calculer à partir du profil et de la forme de la section). La démarche standard [3, 4] consiste alors à éliminer la variable libre avec l'objectif : $d_0 = \sqrt{I/(\rho I_0)}$, et de réécrire le critère de résistance en conséquence : $I \geq I_0 N^{2/3} \rho \sigma_0^{-2/3}$. D'où l'indice de performance du matériau $M = \sigma_0^{2/3}/\rho$ à maximiser.

On choisit le matériau à partir de la carte de sélection de la figure 12 dans laquelle trois droites d'équi-performance ont été représentées. On constate que les bois utilisés dans le sens L (parallèles aux fibres) sont plus performants que les aciers et équivalents aux meilleurs alliages d'aluminium et de titane. Les composites carbone/époxy sont plus performants dans la direction des fibres (si on ne tient pas compte des interfaces collées). Le composite utilisé pour le bras a un indice de performance *a priori* équivalent aux bois retenus. Plusieurs essences de bois ont des performances équivalentes. De plus, les critères de rigidités minimales conduiraient à d'autres indices de performance : par exemple, pour le cas de la rigidité minimale en traction on obtient un indice de performance $E\sigma_0^{-2/3} \geq$ 1350 SI, où E est le module d'Young longitudinal du matériau. Pour affiner la sélection du matériau, il faut rajouter d'autres contraintes liées à notre étude : d'une part, le caractère écologique qui préconise l'utilisation d'essences locales (voir la première partie de l'article) et, d'autre part, les limites d'encombrement du bras pour éviter les collisions (FC2). Cette dernière contrainte élimine les bois à faible densité comme le balsa.

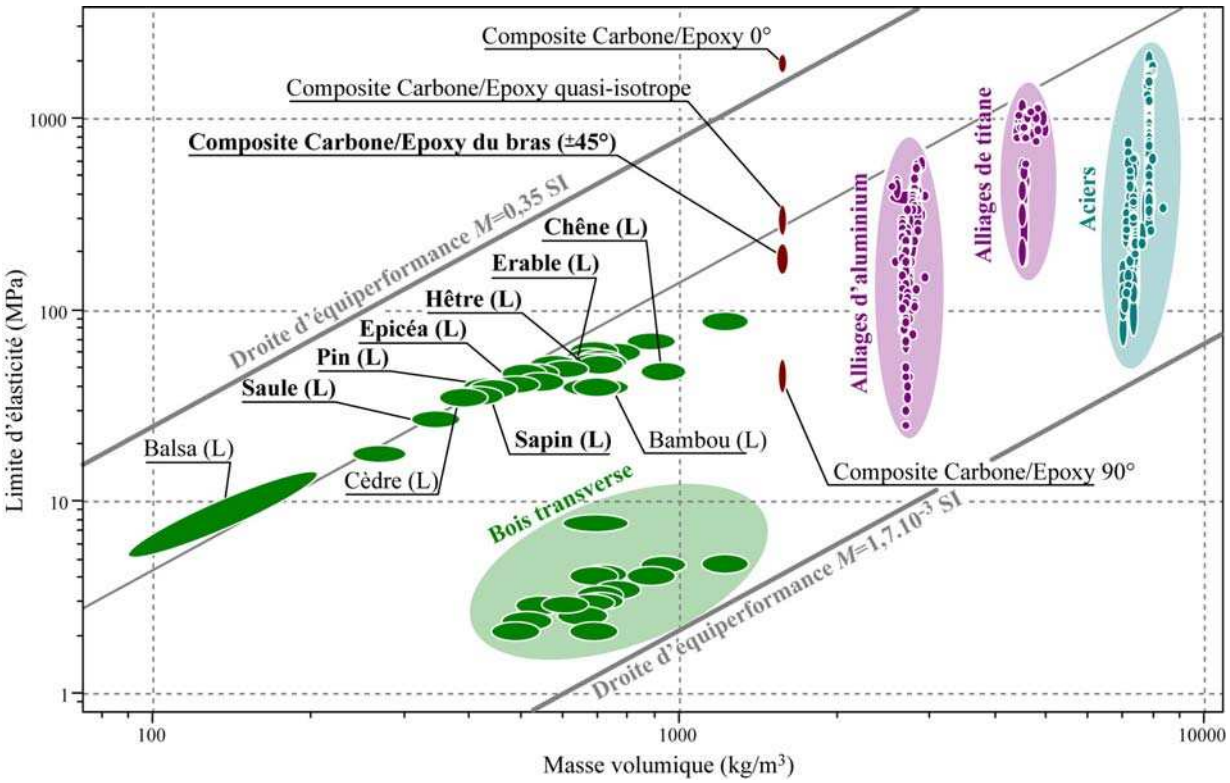


Figure 12. Carte de sélection des matériaux[7] établie en tenant compte des critères sur l'encombrement maximale et la rigidité minimale. En gras les essences de bois locales et le composite utilisé dans le bras initial.

[7] Source CES Selector : http://www.grantadesign.com/products/ces/

Les hypothèses simplificatrices et conservatives utilisées pour le prédimensionnement font, qu'après le choix de la forme de section et du matériau, une optimisation de la solution peut être réalisée. C'est l'objet de la section suivante.

5.3 Simulation des performances

L'utilisation d'un modèle virtuel pour la conception permet de réduire les coûts et/ou les délais par rapport au recours systématique aux prototypes et aux essais (exemple du *virtual testing* en aéronautique), en particulier lorsque le modèle est paramétré. L'optimisation consiste alors à déterminer les paramètres conduisant aux meilleures performances du produit. L'art de l'ingénieur consiste alors à sélectionner le (les) modèle(s) ayant le meilleur rapport qualité/prix, ainsi que les critères de dimensionnements pertinents (rigidité, résistance, stabilité, durée de vie, fabricabilité, recyclabilité, coût…). Les outils à sa disposition permettent de simuler le comportement du modèle de l'objet ou du système à concevoir.

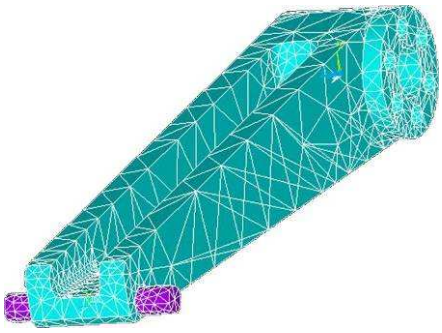


Figure 13. Modèle discrétisé par éléments finis dans Ansys[8].

Dans le projet présenté ici, la simulation prédictive des performances vise à assurer au prototype de passer les critères de rigidité du cahier des charges (qui seront vérifiés par essais non destructifs suivant le protocole de caractérisation du bras en carbone), ainsi que de résistance (voir essai final sur le robot). Ce calcul fait l'objet d'un projet dans le cadre d'un autre module d'enseignement en M1 portant sur la simulation par éléments finis en mécanique. Ce projet sert d'évaluation aux travaux pratiques par la mise en œuvre des compétences acquises au cours de ceux-ci. Le déroulement est similaire au projet industriel avec des consultations en groupe avec l'équipe enseignante. Le logiciel de calcul aux éléments finis retenus est le même que celui des TP à savoir Ansys[8]. Le bras est tout d'abord modélisé dans un logiciel de CAO (ProEngineer[9]) qui permet de déterminer son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation du moto-réducteur (voir le tableau 5). Le modèle géométrique est ensuite transféré dans le code E.F. Les étudiants sont sensibilisés dans le cadre de ce projet aux comportements élastique orthotrope en repère cylindrique (cernes) du bois et aux conditions aux limites à imposer pour se rapprocher le plus possible de la réalité. De fait, il a été par exemple nécessaire de modéliser l'insert métallique permettant de faire la liaison entre les rotules et le bras et de déterminer la position du cœur de l'arbre par rapport au bras usiné. Enfin, une optimisation du maillage sur un critère de convergence de la déflexion du bras pour un chargement donné, et avec raffinement de celui-ci dans les zones de concentration des contraintes, a été menée par les étudiants. Un exemple de modélisation est donné sur la figure 13 et les raideurs calculées pour ce bras dans le tableau 5.

	Simulation sur modèle E.F.	*Essai sur prototype*	*Essai sur bras en carbone*
Raideur globale en flexion (kN/m)	140	135	320
Raideur globale en torsion (N.m)	140	95	470
Raideur globale en traction-compression (kN/m)	3400	2400	490
Moment d'inertie sur l'axe de motorisation (kg.m²)	0,023	0,025	0,034
Masse (g)	1018	1044	1240

Tableau 5. Caractéristiques du produit, prédites par le modèle et mesurées sur le prototype de la figure 13.

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel de CAO pour la masse et le moment d'inertie sont très satisfaisants et ceux obtenus pour les raideurs par simulation E.F. aussi vu les simplifications liées à la modélisation. Les différences observées sont tout à fait acceptables vu que le calcul ne tient pas compte de la rigidité non infinie des liaisons bras/banc d'essai, de la déformation de contact au niveau des rotules, que la finesse de la discrétisation est limitée par le

[8] http://www.ansys.com
[9] http://www.ptc.com/products/proengineer/

temps de calcul (ainsi que les possibilités limitées de la version éducation du code Ansys) et que les propriétés élastiques orthotropes du bois ont été estimées à partir du modèle empirique dit de Guitard [8] tenant compte uniquement de la densité. On peut voir, sur le tableau 5 et pour le prototype en question, que les performances sont au moins égales à celles du bras en carbone en ce qui concerne la raideur en traction-compression, le moment d'inertie et la masse globale. Par contre les raideurs en flexion et en torsion ne sont pas aussi bonnes. Il est à noter que ce bras n'est pas celui qui donnait les meilleurs résultats mais en moyenne, sur tous les prototypes, les mêmes critiques peuvent être faites. On peut constater qu'il reste encore des marges de manœuvre suffisantes sur la rigidité en traction-compression, sur la masse et le moment d'inertie pour pouvoir gagner en rigidité de flexion et de torsion et espérer atteindre les performances du bras initial en particulier avec une géométrie plus optimisée comme celle du 2e et du 5e prototype de la figure 15.

Dans cette partie, les étudiants ont pu appliquer la démarche de choix des matériaux vu en cours et rechercher les informations manquantes sur le matériau bois. Ils ont aussi réalisé une simulation numérique par éléments finis qui leur a permis de confronter les résultats obtenus par essais et par simulation et ainsi de mieux appréhender les difficultés et les limites.

6. Fabrication et validation des prototypes

L'ensemble des groupes d'étudiants dispose d'une période de 4 semaines durant laquelle ils doivent fabriquer leur prototype (figure 14) et le tester mécaniquement (figure 15) avec le même protocole que le bras originel en carbone pour mesurer la masse, le moment d'inertie par rapport à l'axe du moto-réducteur ainsi que les différentes raideurs (figure 16 et tableau 5). Ceci permet de faire un retour sur le cahier des charges initial pour voir s'il est rempli ou non. Ce retour est fait par les étudiants en renseignant la fiche d'évaluation de leur solution. Cette fiche a été élaborée pratiquement dès le début du projet par le chef de projet qui la soumet à l'ensemble des acteurs (consultants, groupe d'étudiants). Ceux-ci ont en charge de la vérifier et de demander des modifications soit par l'ajout d'un critère manquant soit par la révision de la pondération de certains critères. A l'issue des différentes itérations, cette fiche est alors validée et sert en fin de projet à l'évaluation des solutions. Nous donnons en exemple la fiche d'évaluation des solutions du bras en bois (figure 17) qui mentionnent les critères et leur pondération avec les champs renseignés par le groupe, par les consultants le jour de la soutenance ou encore par le client le jour du test sur le robot PAR4. En effet, après la vérification expérimentale du prototype du bras en bois (critères statiques), il faut encore vérifier qu'ils respectent bien l'espace de non collision avec les éléments environnants du robot et qu'ils résistent aux efforts dynamiques correspondant aux accélérations en phase de fonctionnement. C'est pourquoi la dernière phase de validation s'est faite *in situ* (figure 18) en démontant un bras en carbone pour le remplacer par le prototype de bras en bois et en utilisant le robot dans ses conditions extrêmes (masse de 2 kg sur la platine, accélération de 17 g). Une vidéo est disponible sur le site internet[10] du département d'enseignement de mécanique de l'Université Montpellier 2 et montre les conditions de travail du robot avec la présence des prototypes de bras en bois réalisés par les étudiants.

Figure 14. Fabrication du prototype sur machine conventionnelle.

[10] http://www.meca.univ-montp2.fr/realisations/projet-industriel-m1

Figure 15. Photo du bras initial et de tous les prototypes réalisés (de gauche à droite) en carbone, chêne, hêtre, hêtre, pin, chêne, chêne.

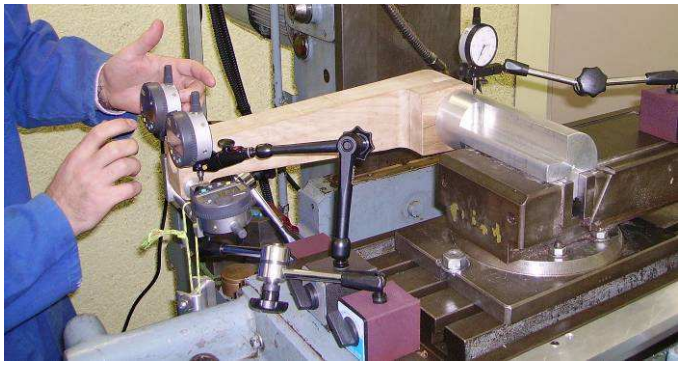


Figure 16. Test de raideur en flexion du prototype avec le même protocole que le bras en carbone.

CRITERES	Poids	Groupe	Valeur cible
RESPECT DU CDCI (SOLUTION REALISEE)			
Valeur de la masse du prototype (g)		**1018**	**1240 max**
Critère de masse	**10**	**10**	
Valeur du moment d'inertie autour de l'axe du moto-réducteur (kg.m²)		**0,025**	**0,034**
Critère de moment d'inertie sur l'axe du moto-réducteur	**10**	**10**	
Valeur de la raideur en flexion (kN/m)		**135**	**320**
critère de raideur en flexion	**10**	**5**	
Valeur de la raideur en torsion (N.m)		**95**	**470**
critère de raideur en torsion	**10**	**2**	
Valeur de la raideur en traction (kN/m)		**2400**	**490**
critère de raideur en traction	**10**	**10**	
Caractère écologique (matériau bois…)	**10**	**10**	
CONTRAINTES (VERIFICATION SUR LE ROBOT : TEST IN SITU)			
Surface limite de collision du bras avec ressort des tirants	**5**	**5**	
Surface limite de collision du bras avec le bâti	**5**	**5**	
Cotation (350; 28; R8; 100; 61,5; 32; 3, 45°; 6xM8D60)	**10**	**6**	
USAGE			
Facilité de montage et de démontage du bras-bois sur robot PAR4	**4**	**4**	
RENDUS			
Poster	**10**	**5**	
CONCEPTION			
Résultat du dimensionnement en résistance de la pièce	**8**	**8**	
Modélisation en vue du dimensionnement en résistance de la pièce	**7**	**3**	
Modélisation en vue du dimensionnement des liaisons	**7**	**3**	
Réglage de la cote de 100 (appui sur surface métallique)	**8**	**8**	
Simplicité de la solution	**4**	**2,5**	

Durée de vie de la solution (bonus)	**5**		
REALISATION			
Coût du prototype		**320 □**	**400 □**
Critère de coût	**7**	**5**	
Qualité de la réalisation	**10**	**10**	
PENALITES			
Retard sur le rendu de documents (dossier technique, Rapport, …) par jour et doc.	**-5**	**0**	
TOTAL	**150**	**111,5**	

Figure 17. Fiche d'évaluation du prototype du bras de robot de la figure 13.

Figure 18. Test final des prototypes sur le robot pour plusieurs cycles avec une plateforme de masse 2 kg et des accélérations croissantes jusqu'à 17 g.

Dans cette dernière phase, les étudiants ont dû gérer les commandes avec le budget qui était alloué par groupe et respecter les contraintes temporelles en s'organisant au niveau de l'atelier entre groupes afin de respecter les délais. La réalisation de leur prototype repose sur une application directe du cours de fabrication et en particulier de la formation en travaux pratiques. Au final, l'évaluation des performances de leur prototype leur permet d'avoir un regard critique par rapport à leurs différentes modélisations et à leurs choix technologiques. L'essai final sur le robot permet de donner un caractère achevé au projet et gratifiant pour les étudiants.

7. Evaluation des étudiants

Dernière partie mais non des moindres : l'évaluation des étudiants qui entre dans la validation (ou non) de cette UE de projet industriel, avec pour principale difficulté l'évaluation individuelle d'un travail collectif. Le contrôle des connaissances se fait à partir de productions communes comme le rendu du rapport terminal ou d'un poster A3, et sur des communications partiellement individuelles comme lors des consultations ou la présentation orale terminale devant le client en fin de projet.

L'équipe pédagogique a donc mis en place une évaluation des étudiants qui soit la plus représentative du travail et de l'implication de chaque étudiant pour conduire à la réussite d'ensemble du projet. Bien évidemment les rendus de projet (productions communes) comme le rapport par exemple ne peuvent être évalués que par une note d'ensemble. Aussi pour individualiser cette note nous avons décidé de lui appliquer un facteur correctif individuel construit par la compilation de 2 notes :

- une « note externe au groupe » N^{λ}_{e}, attribuée par les consultants du projet à l'étudiant λ, en fonction de la qualité de la communication de cet étudiant, lors des séances de travail et de validation. Les consultants distribuent une enveloppe de points fixée (par exemple attribution de 50 points pour un groupe de 5 étudiants) ;
- une « note interne au groupe » N^{λ}_{i}, fixée par les membres du groupe au cours de la dernière réunion de travail. A huis clos, les étudiants du groupe s'attribuent ou se distribuent des points sur la base d'une enveloppe de points fixée identique à celle des consultants, de façon à restituer le travail effectivement réalisé par chacun des individus au cours du projet. Dans ces conditions, un groupe homogène attribuera 10 points à chacun de ses membres, un groupe hétérogène de 5 étudiants peut par exemple se répartir ces points de la façon suivante : 8, 8, 7, 14, 13.

Le coefficient correcteur c^{λ} de l'étudiant λ, est obtenu à partir des deux notes précédentes (par exemple, pour un groupe de 5 étudiants, le coefficient correcteur de l'étudiant λ sera $c^{\lambda} = (N^{\lambda}_{e} + N^{\lambda}_{i})/20$) et va affecter toutes les notes communes de façon directe. Par exemple pour la note commune de rapport écrit N_r, la note effective de rapport pour l'étudiant λ sera $N^{\lambda}_{r} = c^{\lambda}\ N_r$. Enfin, le responsable du projet industriel procède à une restitution individuelle de la note finale en insistant sur le comportement de l'étudiant durant le projet (de même niveau qu'une évaluation en entreprise). Cette restitution est importante car elle permet à l'étudiant de mieux connaître ses faiblesses et ses points forts et d'en tenir compte pour la suite de ses études et pour son insertion professionnelle.

8. Conclusions

D'un point de vue technique, la réponse apportée à la demande de l'industriel est positive. L'investigation menée par les équipes de projet du département de mécanique a permis de montrer qu'il est possible de remplacer des éléments de robot en carbone par du bois. Cette possibilité provient des propriétés mécaniques spécifiques compétitives du bois et de la faiblesse des assemblages collés utilisé dans le bras initial. Les résultats prometteurs de ces études ont permis la poursuite de ce travail en recherche dans le cadre d'un Projet Exploratoire Pluridisciplinaires (PEPS Robois entre l'équipe DEXTER du LIRMM, l'équipe MAB du LMGC et Symétrie[11] un fabricant de robots parallèles) avec la réalisation du bras en tubes de bois déroulé, assemblés en plis croisés (avec des colles naturelles) pour améliorer la rigidité en torsion du bois.

D'un point de vue pédagogique, ce type de projet industriel mené, de bout en bout, a permis aux étudiants d'une part de s'investir dans une action à caractère professionnalisant (en utilisant des outils de l'entreprise et en travaillant en relation avec le monde de l'entreprise) et d'autre part de pouvoir cristalliser sur un même sujet, un ensemble de connaissances considérables (application de cours émanant d'UE transversales sur un sujet industriel qui va de la spécification technique du besoin à la réalisation et la validation d'un prototype). Ce type d'enseignement met l'étudiant au cœur même du dispositif de formation en le rendant acteur dans l'approfondissement des connaissances et en lui permettant d'être conscient de ses propres compétences professionnelles qu'il pourra retranscrire dans la rédaction de son CV ou au cours d'un entretien de stage ou d'embauche .

Le mode d'évaluation original renforce le caractère professionnalisant de cet enseignement en se rapprochant pour une partie du mode d'évaluation en entreprise. Enfin, il est à souligner que les notes internes au groupe, attribuées donc par les étudiants eux-mêmes, sont souvent bien plus sévères que celles que nous pourrions leur attribuer si nous devions nous passer de cette auto-évaluation de groupe. Ce type d'évaluation a montré ses premiers résultats. Dès son application, elle a conduit à la non validation de l'UE pour des étudiants ayant survolé le projet et n'ayant manifesté aucune implication dans le projet. Elle a par contre valorisé les étudiants moteurs dans la conduite et la bonne marche du projet. Dans un cas comme dans l'autre, à ce jour, il n'y a eu aucune « réclamation de note » de la part d'un étudiant.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier pour leur aide les collègues du LIRMM qui ont participé à ce projet, à savoir : Sébastien Krut, Olivier Company et François Pierrot.

Références bibliographiques

[1] Claude Marouzé, Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du sud, Thèse de Doctorat, ENSAM, Paris, 352 p., 1999.

[2] Bernard Yannou, Conception d'un mousqueton d'escalade innovant par une démarche d'analyse de la valeur, *Technologies & Formations*, vol. 134 (novembre-décembre), pp. 13-27, 2007.

[3] Michael Ashby, Hugh Shercliff and David Cebon, *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, 2007.

[4] Luc Salvo, Yves Bréchet et Michael Ashby, *Sélection des matériaux et des procédés de mise en uvre*, Traité des Matériaux, Tome 20, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001.

[5] Jean Lemaître et Jean-Louis Chaboche, *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, 1996.

[6] Karin Hofstetter, Christian Hellmich et Josef Eberhardsteiner, Continuum micromechanics estimation of wood strength, *PAMM - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 6, pp. 75-78, 2006.

[7] Marie-Thérèse Gautherin, *Critère de contrainte limite du bois massif*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 126 p., 1980.

[11] http://www.symetrie.fr

[8] Daniel Guitard, Mécanique du matériau bois et composites, Cépaduès, 2000.