

ÉCOCONCEPTION

Vers un robot en bois

THIERRY LAURENT, JEAN-LOUIS KERGUEME, OLIVIER ARNOULD, DAVID DUREISSEIX ^[1]

Dans le numéro précédent, nous vous présentions les critères de choix du matériau d'un bras de robot parallèle réalisé en bois massif en remplacement d'un bras carbone. Nous allons maintenant découvrir les phases clés du projet mené avec les étudiants pour la conception de ce bras.

L'organisation du projet

Après avoir présenté en première partie dans le numéro précédent le contexte détaillé, l'intérêt de l'utilisation du matériau bois et la démarche de conception sélectionnée ^[1], nous nous intéressons ici aux objectifs pédagogiques ainsi qu'à la mise en œuvre pratique de la démarche de conception dans le cadre d'un enseignement professionnalisant à l'université : le master Création industrielle en mécanique (CIM). Celui-ci vise à former des étudiants, qui, à niveau bac + 5, pourront intégrer des centres de R&D industriels en ingénierie mécanique, devenir responsables de bureaux d'études, ingénieurs technico-commerciaux, chargés d'affaire... L'offre de formation, sur deux ans, proposée par le département d'enseignement de mécanique ^[1], 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 –, ce qui est une source de motivation supplémentaire.

Ce projet est donc transversal sur le semestre, et s'organise sous forme de consultations régulières avec l'équipe enseignante, ainsi que de réunions avec le client, motivées par l'ensemble des étudiants. Afin de limiter le nombre d'étudiants en interaction, la promotion est répartie en groupes, de 5 ou 6 étudiants, travaillant de

Mots-clés

actionneur, écoconception, matériaux, postbac, projet

façon concurrentielle sur le même projet. Une consultation réunit un groupe d'étudiants, qui doivent être le moteur de la réunion, et une partie des membres de l'équipe pédagogique, qui se mettent à leur disposition comme consultants. On peut recourir à un système de jetons, en nombre limité, donnant droit à consultation ; à charge pour chaque groupe d'étudiants de gérer ce fonds. 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, de l'ordre de 300 € par groupe, permet l'achat de matériau, composants... selon une procédure 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 diagramme de Gantt succinct que les étudiants devront compléter lors de leur gestion de projet.

Les compétences à acquérir pour les étudiants

- 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)

[1] Département d'enseignement de mécanique, faculté des sciences, université Montpellier-II (34). Courriel : {Thierry.Laurent,Jean-Louis.Kergueme,Olivier.Arnould,David.Dureisseix}@univ-montp2.fr

[2] Les chiffres gris entre crochets renvoient à la bibliographie.

[3] Les chiffres en blanc sur fond rouge entre crochets renvoient à la webographie.

(seconde partie)



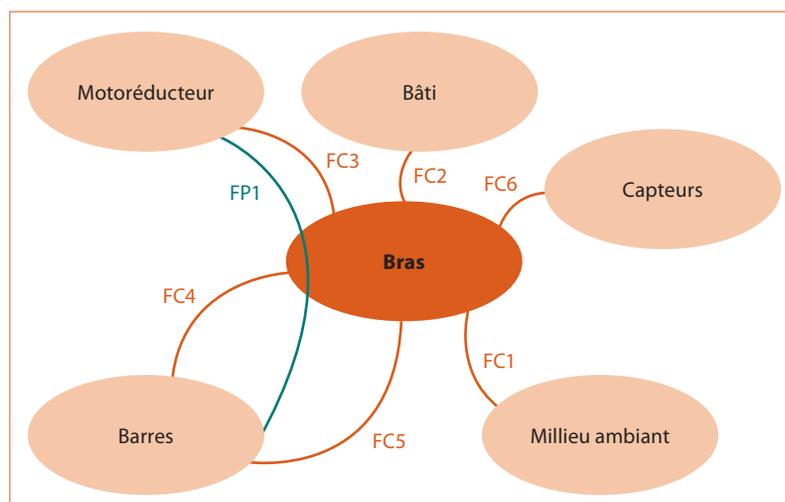
SOURCE : LIRMM

1 Le robot PAR4 et un bras d'origine

- La réalisation d'un dossier technique (ensemble des documents nécessaires à la fabrication des éléments, à l'achat de composants standard 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 la solution retenue, étape de fabrication menée par les étudiants eux-mêmes, 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

L'implication et les 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 une préétude 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 contrepartie, 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



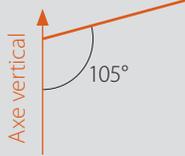
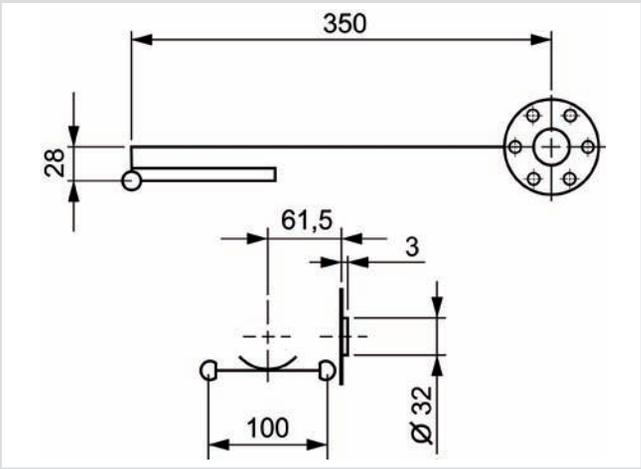
2 Le diagramme des interacteurs de la phase d'utilisation

prévoir une ou deux réunions pour répondre à des questions spécifiques émanant des étudiants (les réponses qui présentent un intérêt collectif sont transmises à l'ensemble de la promotion).

Le dossier d'orientation : le besoin, les fonctions

● Le 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).

Fonction	Critère	Niveau	F
FP1	Atteindre les positions extrêmes angulaires du bras	Rotation autour de l'axe du motoréducteur (O, x) (cf. 5) 	F0
	Résister aux efforts maximaux	Les valeurs maximales fournies par le client d'après une simulation dynamique sont données dans le tableau 6 (cf. 4)	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

3 La caractérisation de la fonction principale

● **Le diagramme des interacteurs**

Pour chaque phase du cycle de vie du produit, on recherche les interacteurs (ou milieux extérieurs), composantes en relation physique (ou sensitive) directe 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 2.

● **L'énoncé des fonctions**

- FP1 : assurer la liaison entre le motoréducteur 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 motoréducteur existant.
- FC4 : s'adapter aux barres.
- FC5 : éviter les collisions entre le bras et les barres.
- FC6 : prévoir les surfaces de contact des capteurs.

Les fonctions de service sont caractérisées qualitativement et quantitativement au travers de paramètres

permettant de juger de l'accomplissement de ces fonctions. On trouvera dans le tableau 3, pour la fonction principale, la liste des critères d'appréciation, les niveaux de ces critères, les flexibilités F de ces niveaux (« limites d'acceptation »).

Lors de cette étape, les étudiants mettent en place leur groupe de travail, s'approprient (prise en main) le sujet et nouent les premiers contacts avec le client. Cette immersion dans le sujet est importante pour la motivation des groupes de travail et la suite du projet. Enfin, elle permet d'appliquer les outils de l'analyse fonctionnelle sur un cas concret (visuel).

L'étude plus complète est accessible sur le site du département d'enseignement de mécanique 2.

Le dossier d'orientation : la recherche d'informations

Après l'analyse fonctionnelle et en particulier la caractérisation des fonctions 3, il est nécessaire d'évaluer certains niveaux d'acceptation de leurs critères : les différentes raideurs du bras existant (critère de FP1 : dépasser les rigidités du bras existant) et son moment

d'inertie par rapport à l'axe de rotation du motoréducteur (critère de FC3 : ne pas dépasser le moment d'inertie autour de l'axe de rotation du motoréducteur du bras existant).

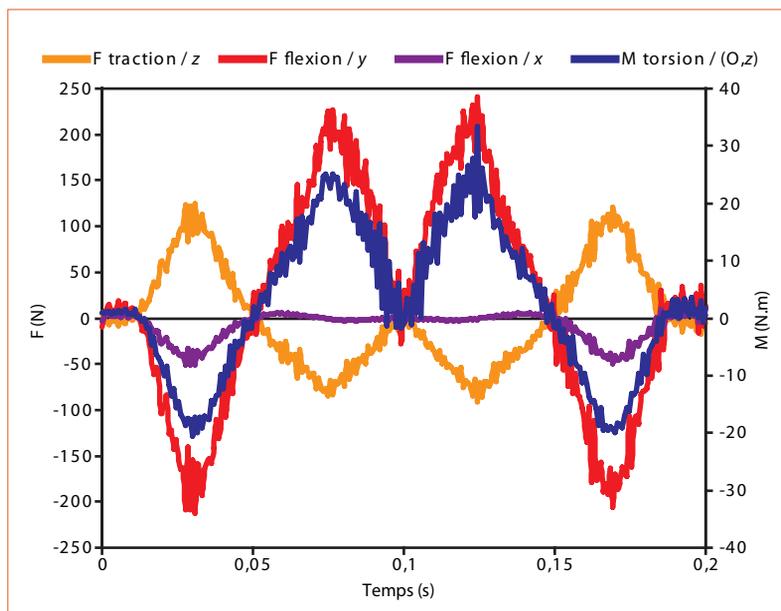
L'objectif est ici de mettre en place un protocole expérimental sur le bras original en carbone permettant de mesurer ces différentes caractéristiques, dans des conditions le plus proches de celles de chargements réels en reproduisant les liaisons du bras avec les autres pièces du robot afin de respecter au mieux le CdCI. De plus, pour assurer une bonne cohérence expérimentale, ce même protocole doit également servir à vérifier, à valider les performances techniques des différents prototypes et à les comparer de celles du bras existant.

La mesure des rigidités

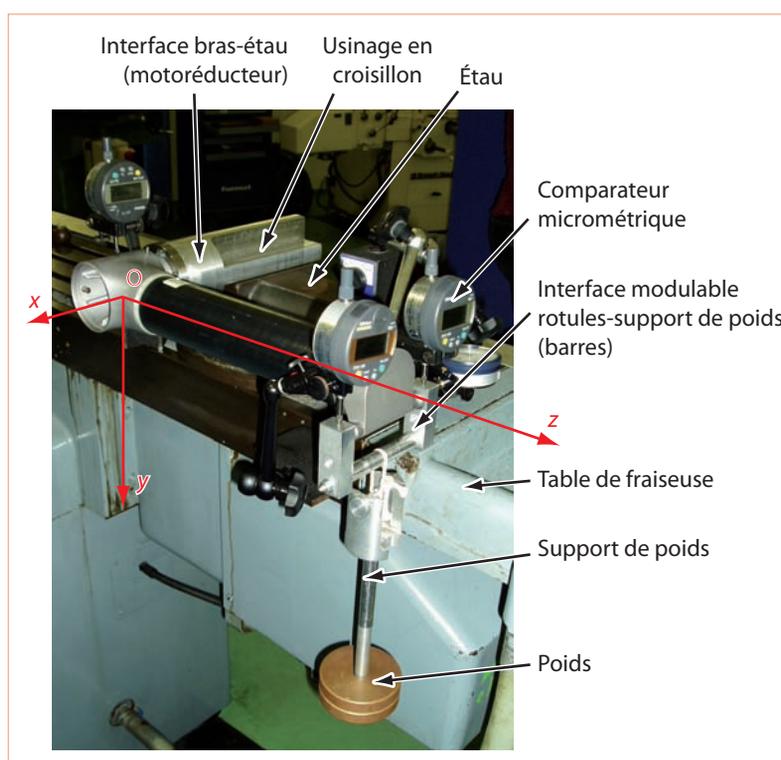
Il s'agit de mettre en place un système simple de mise en chargement du bras en traction (nous supposons le comportement symétrique en traction et compression), flexion et torsion et de mesurer les déflexions induites pour en déduire les rigidités. Le bras doit être maintenu avec les mêmes mise et maintien en position que sur le motoréducteur (FC3) et chargé au niveau des rotules (FC4) par des efforts similaires aux efforts maximaux supportés par le bras sur un cycle (FP1). 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 maximaux calculés 4. En effet, il est important ici de rester dans les mêmes ordres de grandeur d'effort, car des non-linéarités sont suspectées (contact au niveau des rotules, par exemple). Une balance (d'une précision de 0,1 g) est mise à disposition pour les mesurer. Pour minimaliser le nombre de pièces à réaliser, nous utilisons l'étau d'une table de fraiseuse comme support.

À partir de ce cahier des charges succinct pour le banc d'essai, chaque groupe d'étudiants met au point un protocole expérimental avec définition des pièces nécessaires à sa réalisation. Après présentation et comparaison des différents protocoles, une seule solution (protocole et pièces) est retenue. Une vue du système de mise en charge, de mise et maintien en position et de mesure est présentée en 5 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 , traction (déviée) en mettant le bras à la verticale grâce à la forme en croix de l'interface bras-étau 5 et 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 détecter un éventuel déplacement au niveau de l'encastrement dans l'étau, de mesurer la déflexion suivant la direction de charge-



4 L'évolution des efforts F et du moment M des rotules sur le bras au cours d'un cycle (données du LIRMM obtenues par simulation en dynamique multicorps)



5 Le banc d'essai de mesure de raideur dans le cas de la flexion suivant y du bras en carbone

ment, et de détecter un éventuel déplacement transverse au chargement à la suite d'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'effectue à partir de l'estimation des déflexions d'un tube de fibres de carbone - résine époxy provenant du fabricant Structil [3], de diamètre extérieur 60 mm, d'épaisseur 4 mm et de longueur 350 mm, fait d'un

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	2 600 N·m	0,2 mm (0,2°)
Traction	120 N	49 N (5 kg)	6 200 kN/m	8 μm

6 L'estimation des rigidités du bras en carbone et de l'ordre de grandeur des déplacements mesurés

Chargement	Flèche moyenne mesurée sous le point de charge	Raideur moyenne mesurée	Écart 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 %

7 Les flèches et rigidités moyennes mesurées sur le bras en carbone

composite stratifié à $\pm 45^\circ$. Les propriétés élastiques utilisées sont estimées à partir de la base de données du logiciel CES-Selector [4] pour un composite stratifié similaire avec environ 60 % de fibres : modules d'élasticité longitudinale de 11 GPa et de cisaillement 3 GPa. Les raideurs calculées dans ces conditions 6 montrent 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.

Le tableau 7 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 répétabilité entre étudiants. On constate aussi une différence entre les valeurs théoriques pour le tube seul et les résultats expérimentaux sur le bras complet, en particulier pour les raideurs en torsion et en traction. Dans ces deux cas, la rigidité théorique du tube est négligeable, 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.

La mesure du moment d'inertie

Le moment d'inertie du bras par rapport à l'axe de rotation du motoréducteur est mesuré de deux façons. Comme il était impossible d'utiliser directement le

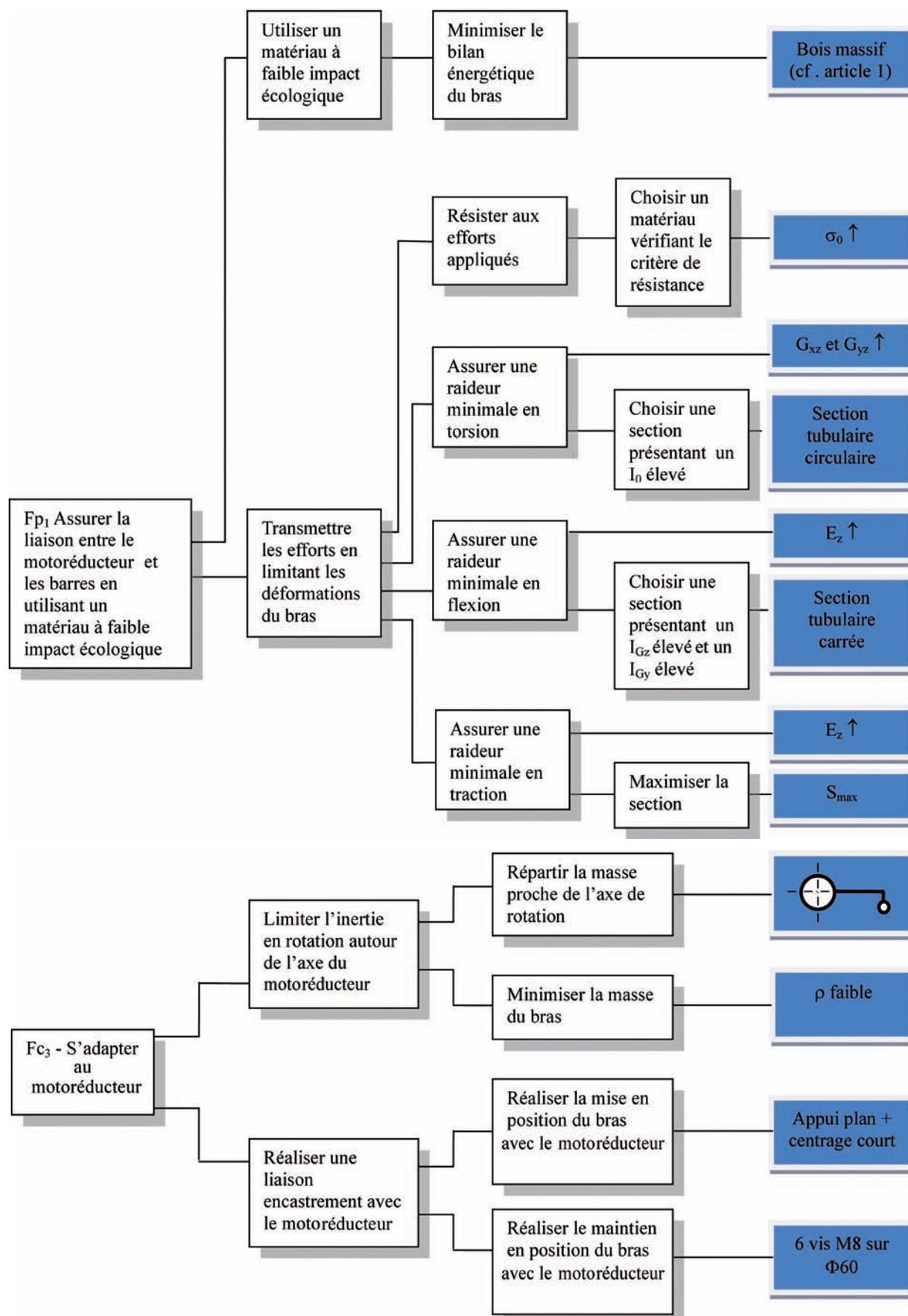


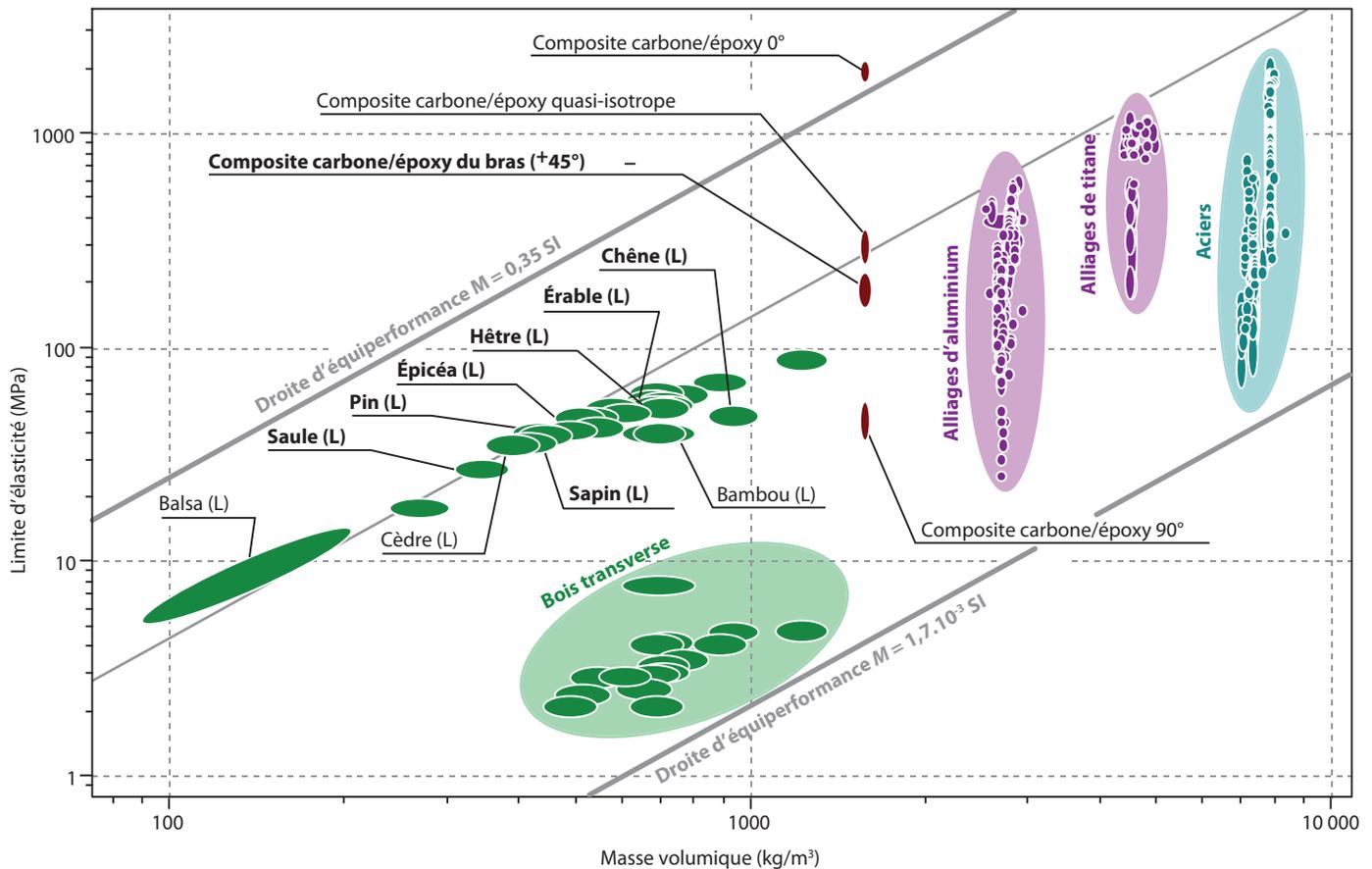
8 Le processus de détermination de la position du centre de gravité dans le plan (y, z)

motoréducteur comme liaison, une méthode simple et indirecte est 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. Cela 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 (le rayon des sphères est 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-motoréducteur 8 et par les rotules), et deux photographies sont prises dans le plan (y, z). 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 motoréducteur est ensuite déterminé en appliquant le théorème de Huygens.

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 $0,029 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 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 sera faite par l'équipe enseignante par la suite en réalisant directement sur le bras une liaison pivot





10 La carte de sélection des matériaux (source CES Selector). En gras, les essences de bois locales et le composite utilisé dans le bras initial

au niveau de l'axe de rotation du motoréducteur. La technique utilisée repose aussi sur la mesure de la période d'oscillation, qui donne un moment d'inertie de l'ordre de $0,034 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ avec une erreur relative de mesure de 4 %.

Lors de cette phase du projet, les étudiants ont pu mettre en place une première démarche (simplifiée) de conception et 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 est retenu. Chaque groupe procède ensuite à des essais, exploite et critique les résultats. Cette démarche expérimentale permet également aux étudiants d'appliquer le cours de dynamique des solides et de résistance des matériaux.

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

La recherche et l'évaluation de principes de solution

Nous ne présenterons ici qu'une partie du Fast relatif à la fonction principale 9, afin de montrer le détail de cet outil permettant, à partir des fonctions de ser-

vice, de développer les fonctions techniques et les solutions qui en découlent, et de dégager des voies d'étude futures.

On aboutit globalement à l'issue de cette étape à un ensemble de solutions (on trouve parfois le terme de *sous-solutions* [1]), 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 solution 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.

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 solution. À la suite de 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 solution, l'étape suivante consiste à préciser les spécifications techniques.

Les spécifications techniques du besoin

Le Fast des fonctions **9** montre 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.

Le prédimensionnement et le choix du matériau bois

Pour utiliser une démarche de choix de matériau [2] [3] 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 minimaliser l'inertie en rotation autour de l'axe du motoréducteur. La contrainte de conception est la tenue mécanique ; pour le bois, un critère de Tsai est bien adapté [4]. 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 ($\alpha \approx 0,2$ [5] [6]). 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 :

$$\sigma_{eq}(x) = \sigma_0$$

Des calculs ont démontré que le chargement est proportionnel **4**, on ne conserve donc que l'effort de traction N comme paramètre. On obtient pour le profil

$$p(x) = [(ax / L) + b]^{1/3}$$

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, avec une section circulaire pleine, a et b prennent les valeurs suivantes :

$$a = 26,5 \quad \text{et} \quad b = 21,9$$

Le profil étant ainsi fixé, la fonction objectif à minimaliser 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 [2] [3] 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 à maximiser :

$$M = \sigma_0^{2/3} / \rho$$

On choisit le matériau à partir de la carte de sélection **10** dans laquelle trois droites d'équipformance ont été représentées. Cette carte est établie en tenant compte des critères sur l'encombrement maximal et la rigidité minimale avec en gras les essences de bois locales et le composite utilisé dans le bras initial.

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

$$E \sigma_0^{-2/3} \geq 1 \text{ 350 SI}$$

où E est le module d'Young longitudinal du matériau. Pour affiner la sélection du matériau, il faut ajouter d'autres contraintes liées à notre étude : d'une part, le caractère « écologique » qui préconise l'utilisation d'essences locales 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.

Les hypothèses simplificatrices et conservatives utilisées pour le prédimensionnement font qu'après le choix de la forme de section et du matériau la solution peut être optimisée, comme nous allons le voir.

La 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'ingénieur doit savoir sélectionner le ou les modèles ayant le meilleur rapport qualité-prix, ainsi que les critères de dimensionnement pertinents (rigidité, résistance, stabilité, durée de vie, fabricabilité, recyclabilité, coût...). Les outils à sa disposition lui permettent de simuler le comportement du modèle de l'objet ou du système à concevoir.

Dans le projet présenté ici, la simulation prédictive des performances vise à s'assurer que le prototype remplisse 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 l'essai final sur le robot).

	Simulation sur modèle EF	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)	3 400	2 400	490
Moment d'inertie sur l'axe de motorisation (kg·m ²)	0,023	0,025	0,034
Masse (g)	1 018	1 044	1 240

11 Les caractéristiques du produit, prédites par le modèle et mesurées sur le 1^{er} prototype en chêne de la figure 13

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 pour les travaux pratiques par la mise en œuvre des compétences acquises au cours de ceux-ci. Son déroulement est similaire à celui du projet industriel, avec des consultations en groupe de l'équipe enseignante.

Le logiciel de calcul par éléments finis retenu est le même que celui des TP, Ansys [5]. Le bras est tout d'abord modélisé dans un logiciel de CAO (ProEngineer [6]) qui permet de déterminer son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation du motoréducteur 11. Le modèle géométrique est ensuite transféré dans le code EF. Les étudiants sont sensibilisés dans le cadre de ce projet au comportement 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, est menée par les étudiants. Un exemple de modélisation est donné en 12 ; les raideurs calculées pour le premier prototype en chêne de la figure 13, en 11.

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 EF aussi vu les simplifications liées à la modélisation. Les différences observées sont tout à fait acceptables puisque 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 temps de calcul (ainsi que par les possibilités 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 [7], tenant compte uniquement de la densité.

On peut voir, sur le tableau 11 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 2^e et du 5^e prototype de la figure 13.

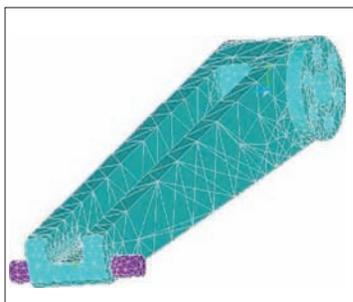
Dans cette partie, les étudiants appliquent la démarche de choix des matériaux vue en cours et recherchent les informations manquantes sur le matériau bois. Ils réalisent une simulation numérique par éléments finis qui leur permet de confronter les résultats obtenus par essais et ceux obtenus par simulation, et ainsi de mieux appréhender les difficultés et les limites de cette dernière.

La fabrication et la validation des prototypes

Les groupes d'étudiants disposent d'une période de quatre semaines durant laquelle ils doivent fabriquer leur prototype 14 et le tester mécaniquement avec le même protocole que pour le bras original en carbone 15 pour mesurer la masse, le moment d'inertie par rapport à l'axe du motoréducteur ainsi que les différentes raideurs 11.

Cela permet aux étudiants de faire un retour sur le cahier des charges initial, pour voir s'il est rempli ou non, en renseignant la fiche d'évaluation de leur solution. Cette fiche est élaborée pratiquement dès le début 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. À l'issue des différentes itérations, cette fiche est validée, et elle sert en fin de projet à l'évaluation des solutions 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'il respecte bien l'espace de non-collision avec



12 Un modèle discrétisé par éléments finis dans Ansys



13 Le bras initial en carbone et tous les prototypes réalisés (de gauche à droite : chêne, hêtre, hêtre, pin, chêne, chêne)

les éléments environnants du robot et qu'il résiste aux efforts dynamiques correspondant aux accélérations en phase de fonctionnement. C'est pourquoi la dernière phase de validation se fait *in situ* **16** 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 disponible sur le site internet du département de mécanique **12** présente les conditions de travail du robot et les prototypes de bras en bois réalisés par les étudiants.

Dans cette dernière phase, les étudiants doivent gérer les commandes avec le budget qui est alloué au 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 donne un caractère achevé au projet gratifiant pour les étudiants.

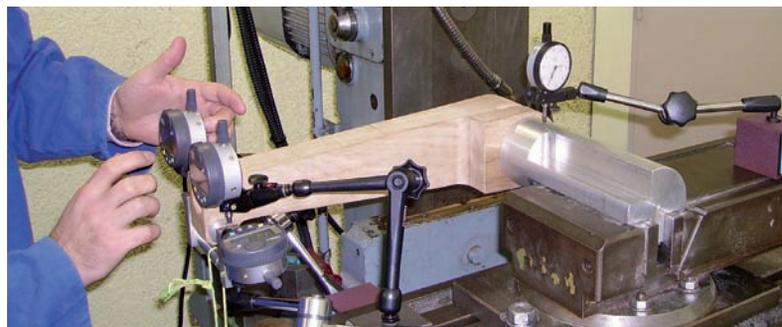
L'évaluation des étudiants

Dernière partie, mais non des moindres : l'évaluation des étudiants, qui compte pour 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 rapport terminal ou un poster A3, et sur des communications partiellement individuelles, comme lors des consultations ou de la présentation orale terminale devant le client en fin de projet.

L'équipe pédagogique a donc élaboré cette évaluation de sorte qu'elle soit le 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), 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 deux notes :



14 La fabrication d'un prototype sur machine conventionnelle



15 Le test de raideur en flexion d'un prototype avec le même protocole que pour le bras en carbone



16 Le test final des prototypes sur le robot pour plusieurs cycles avec une plate-forme de masse 2 kg et des accélérations croissantes jusqu'à 17 g

– une « note externe au groupe » N_e^λ , attribuée par les consultants du projet à l'étudiant λ en fonction de la qualité de sa communication 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_i^λ , fixée par les membres du groupe au cours de la dernière réunion de travail. À huis clos, les étudiants du groupe s'attribuent ou se distribuent des points sur la base d'une enveloppe de points 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, et un groupe hétérogène de 5 étudiants peut par exemple se répartir les 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 $c^\lambda = (N_e^\lambda + N_i^\lambda) / 20$ – et va affecter toutes les notes communes de façon directe. Ainsi, pour la note commune de rapport écrit N_r , la note effective de rapport pour l'étudiant λ sera $N_r^\lambda = c^\lambda N_r$. Enfin, le responsable du projet industriel procède à une restitution individuelle de la note finale (de même niveau qu'une évaluation en entreprise) en insistant sur le comportement de l'étudiant durant le projet. 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.

Une réussite technique et pédagogique

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 mécani-

ques spécifiques compétitives du bois et de la faiblesse des assemblages collés utilisés dans le bras initial.

Ces résultats prometteurs ont permis la poursuite de ce travail de recherche, dans le cadre d'un projet exploratoire pluridisciplinaire (PEPS Robois entre l'équipe Dexter du LIRMM, l'équipe MAB du LMGC et Symétrie [7], un fabricant de robots parallèles), par 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 permet aux étudiants, d'une part, de s'investir dans une action à caractère professionnalisant (en utilisant des outils professionnels 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 considérable (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 de l'approfondissement de ses connaissances et en lui donnant conscience de ses propres compétences professionnelles, qu'il pourra retranscrire dans son CV ou au cours d'un entretien de stage ou d'embauche.

Le mode d'évaluation original, en partie proche de celui de l'entreprise, renforce le caractère professionnalisant de cet enseignement. Soulignons que les notes internes au groupe, donc attribuées par les étudiants eux-mêmes, sont souvent bien plus sévères que celles que nous leur donnerions s'il n'y avait pas cette auto-évaluation de groupe. 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. 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, aucun étudiant n'a contesté la justesse de sa note. ■

► Bibliographie

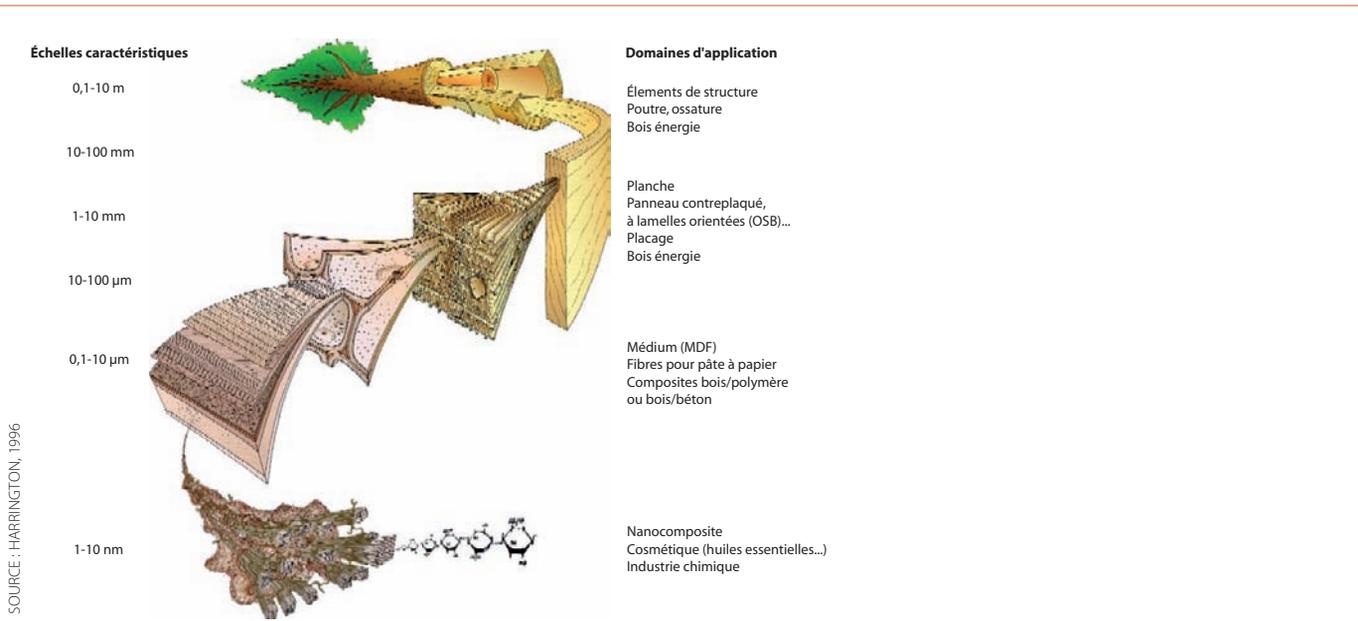
- [1] YANNOU (Bernard), « Conception d'un mousqueton d'escalade innovant par une démarche d'analyse de la valeur », *Technologies & formations*, n° 134, novembre-décembre 2007, p. 13-27
- [2] ASHBY (Michael), SHERCLIFF (Hugh), CEBON (David), *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, 2007
- [3] SALVO (Luc), BRÉCHET (Yves) et ASHBY (Michael), « Sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre », *Traité des matériaux*, t. 20, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001
- [4] LEMAÎTRE (Jean), CHABOCHE (Jean-Louis), *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, 1996
- [5] HOFSTETTER (Karin), HELLMICH (Christian), EBERHARDSTEINER (Josef), « Continuum Micromechanics Estimation of Wood Strength », *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, vol. 6, p. 75-78
- [6] GAUTHERIN (Marie-Thérèse), *Critère de contrainte limite du bois massif*, thèse de doctorat, université Pierre-et-Marie-Curie, 1980
- [7] GUITARD (Daniel), *Mécanique du matériau bois et composites*, Cépaduès, 2000

► Webographie

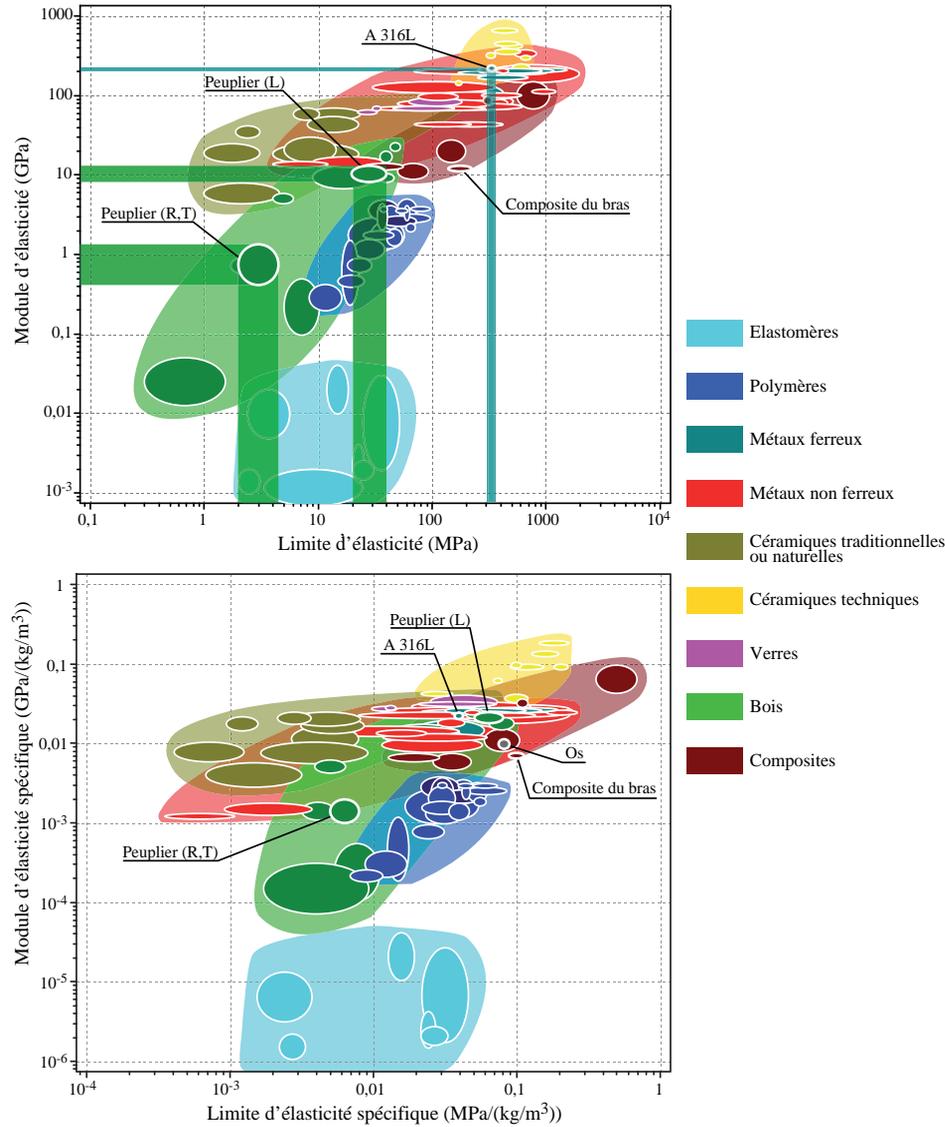
- [1] www.meca.univ-montp2.fr
- [2] www.meca.univ-montp2.fr/realisations/projet-industriel-m1
- [3] www.structil.fr/fr/produits/avant_profiles.html
- [4] www.grantadesign.com/products/ces/
- [5] www.ansys.com
- [6] www.ptc.com/products/proengineer/
- [7] www.symetrie.fr

► 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.



4 Les différentes échelles caractéristiques du bois et ses domaines d'application



5 Les caractéristiques mécaniques comparées de plusieurs matériaux

Erratum

À la suite d'un problème technique, les figures 4 et 5 de la première partie de l'article, parue dans le numéro précédent, n'ont pu être imprimées avec une qualité satisfaisante. Nous prions les auteurs et les lecteurs de nous en excuser. Les voici telles qu'elles auraient dû être.