

ÉCOCONCEPTION

Vers un robot en bois

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

Bousculant l'idée reçue que la précision est liée à la raideur des matériaux, voici les résultats d'une étude de conception d'un robot parallèle à grande vitesse avec des bras... en bois ! De la recherche du matériau à la validation par des essais sous forte accélération, une démarche scientifique.

Depuis quelques années, l'évolution des robots est marquée par l'apparition d'une « espèce » plus rapide et plus précise : les robots parallèles [1] [2] [3] [4] ^[2]. Les robots classiques possèdent une architecture similaire à celle d'un bras humain : si la main tient un objet, le poignet supporte le poids de la main et de l'objet à manipuler, le coude celui du poignet, de la main et de l'objet, et l'épaule le bras entier et l'objet. Les efforts sont de plus en plus grands dans les articulations (les liaisons), et les muscles (les moteurs) doivent déplacer des masses de plus en plus grandes. Pour un robot parallèle, l'objet à manipuler est fixé à plusieurs bras, plus simples et surtout plus légers, car munis chacun d'un unique moteur placé à leur base ^[1]. En conséquence, la masse de l'objet à manipuler peut être plus élevée, la vitesse plus grande (accélération jusqu'à 30 fois plus grandes) ou la précision plus importante (utilisation en chirurgie de précision par exemple [5]). La difficulté réside dans la loi de commande du robot, en général assez complexe.

Le projet support de l'étude présentée est la reconception d'un bras, pièce critique d'un robot parallèle à grande vitesse, 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] ^[3]) et la société Fatronik ^[2] représentés par Sébastien Krut. Ce robot 4 axes (3 translations, 1 rotation autour de la verticale) est dédié aux opérations de prise et dépose de pièces *pick & place*, à cadence élevée (au moins 5 par seconde). L'objectif imposé est l'utilisation majoritaire de matériaux à faible impact écologique (le bras d'origine est un tube de composite carbone stratifié à $\pm 45^\circ$, assemblé par collage à des embouts plastiques ou métalliques ^[1]). Dans le cadre d'une démarche de type écoconception, le bois massif

mots-clés

actionneur, écoconception, matériaux, postbac, recherche & développement

(d'origine locale) est un excellent candidat, comme nous allons le montrer.

Ce projet s'inscrit dans une ligne de communication de la société Fatronik, qui envisage la réalisation d'un prototype de robot PAR4 [6] avec le maximum de pièces à faible impact écologique. Ce prototype fonctionnel sera placé dans le hall de l'entreprise pour sensibiliser les visiteurs à l'investissement de l'entreprise dans une démarche d'écoconception de ses produits.

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un enseignement professionnalisant à l'université : le master Création industrielle en mécanique (CIM), supporté par le département d'enseignement de mécanique ^[3] de l'université Montpellier-II. À l'issue de cette formation, à bac + 5, ceux qui l'ont suivie pourront intégrer des centres de R & D industriels en ingénierie mécanique, devenir responsables de bureaux d'études, ingénieurs technico-commerciaux, chargés d'affaires... Durant la première année de ce parcours de master, une unité d'enseignement (UE) propose aux étudiants un projet industriel, dont l'objectif est double : d'une part, 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 mettre en contact avec le client industriel qui a proposé le projet, différent chaque année, ce qui est une source de motivation supplémentaire. Son déroulement pratique fera l'objet d'une seconde partie dans un prochain numéro.

Cette première partie a pour but d'attester l'intérêt du matériau bois, aussi bien d'un point de vue environnemental qu'en termes de caractéristiques techniques, compte tenu du cahier des charges. Nous précisons ensuite la démarche de conception retenue pour cette étude ainsi que les performances des prototypes réalisés.

Les caractéristiques du matériau

L'objectif ici n'est pas de faire un cours sur l'écoconception [7] [8] [9] [10] ni d'appliquer une démarche complète d'analyse du cycle de vie [11] [12], mais de choisir de façon simple et pragmatique un matériau répondant au cahier des charges de reconception du bras de robot.

Son impact environnemental

Afin de choisir le matériau remplaçant le composite en carbone du bras initial, nous avons regroupé, dans le

[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.

(première partie)



SOURCE : LIRMM

1 Le robot PAR4 [6] et un bras d'origine

Matériaux	Énergie nécessaire à la production (MJ/kg)	Émission de CO ₂ liée à la production (kg CO ₂ /kg)	Fraction recyclable
Composite carbone ± 45°	270	20	2 %
Alliage d'aluminium	de 130 à 200	de 9 à 12	85 %
Acier (faiblement allié)	de 25 à 60	de 0,9 à 3	75 %
Polymère synthétique (PE)	de 45 à 90	de 0,8 à 2	40 %
Verre (non traité)	de 13 à 27	de 0,5 à 1,5	75 %
Béton	de 0,05 à 4	de 0,1 à 0,25	8 %
Lamellé-collé Contreplaqué	de 5 à 13	de - 0,8 à 0,25	15 %
Bois massif (épicéa)	de 1 à 4	de - 1,1 à - 0,5	50 %

2 La comparaison de différents matériaux du point de vue des performances environnementales

tableau 2, pour différents matériaux de construction, les ordres de grandeur de l'énergie nécessaire à la production de 1 kg de matériau, les émissions de CO₂ associées et la fraction recyclable.

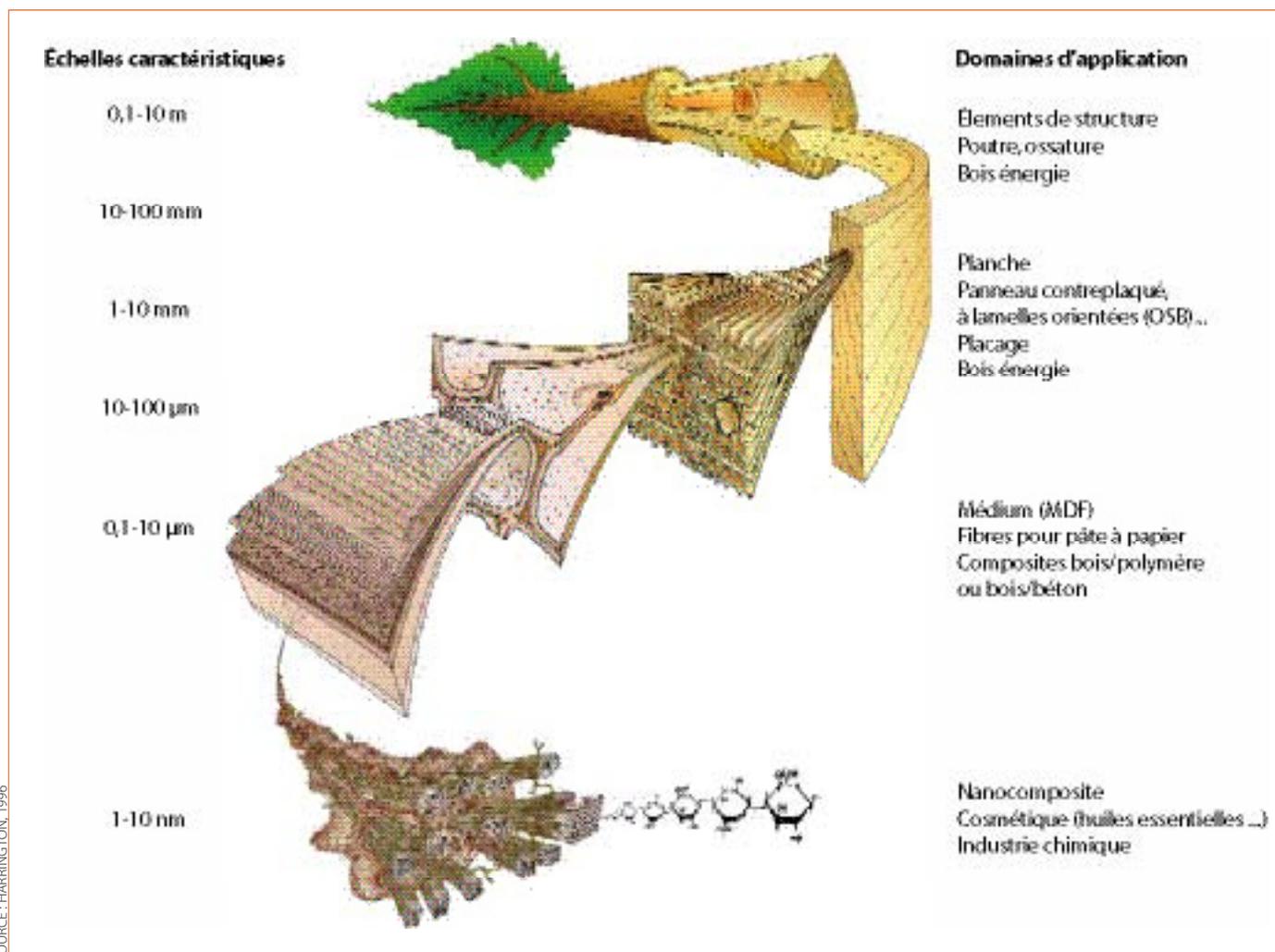
Ces chiffres sont issus du recoupement de sources diverses [4] [11]. Nous n'avons reporté que les ordres de grandeur des valeurs minimales et maximales nécessaires à la comparaison. Il est, en effet, extrêmement difficile d'obtenir des chiffres précis dans ce domaine, car les limites du système étudié sont floues et les sources plus ou moins fiables. Par exemple, l'énergie

nécessaire à la production peut, selon les sources, correspondre soit uniquement à l'extraction, au transport, à la transformation et à la distribution du matériau prêt à être mis en forme en usine, soit à l'énergie dite grise, c'est-à-dire l'énergie totale dépensée depuis l'extraction de la matière brute jusqu'au recyclage final du matériau. On comprend alors la grande incertitude de cette estimation suivant l'origine de l'énergie, les moyens de transport utilisés, etc.

Avec les problèmes soulevés par les changements climatiques, l'opinion publique est focalisée sur les

Matériaux	Masse volumique ρ [5] (kg/m ³)	Limite d'élasticité σ_0 [5] (MPa)	Hauteur h (cm)	Masse m (kg)	Énergie consommée (MJ)	Émission de CO ₂ (kg)
Composite carbone $\pm 45^\circ$	1 500	200	11	36	9 900	730
Alliage d'aluminium	2 700	150	13	85	13 900	890
Acier (faiblement allié)	7 800	300	10	154	6 500	300
Polymère synthétique (PE)	950	25	23	98	6 600	140
Verre (non traité)	2 200	25	23	228	4 600	230
Béton	2 500	10	31	476	950	80
Lamellé-collé Contreplaqué	750	35	20	62	560	- 20
Bois massif (épicéa)	500	45	19	35	90	- 70

3 La comparaison de matériaux pour la construction d'une poutre de section carrée de 2 m de portée supportant une charge de 10 t/m



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

SOURCE : HARRINGTON, 1996

émissions de CO₂. Celles-ci sont principalement liées à l'énergie primaire consommée et dépendent de la ressource énergétique utilisée. Les chiffres reportés ici reposent sur une émission moyenne de l'ordre de 0,3 g CO₂/kWh et ne tiennent pas compte, dans le cas présent, des émissions en fin de vie (ni en cours de vie) correspondant au recyclage ou à la destruction. Néanmoins, il faut être conscient qu'une bonne partie du CO₂ émis peut l'être à ce moment-là.

C'est d'autant plus vrai pour le bois, pour lequel des « émissions négatives » sont reportées dans le tableau 2 car l'arbre consomme du CO₂ pour produire le bois. C'est pourquoi ce matériau est généralement présenté, à tort ou à raison, comme un puits de carbone. En effet, une forêt française représente en moyenne un « stockage » de 60 à 70 t CO₂/ha. C'est globalement vrai à condition qu'elle soit exploitée, et tant que le bois est utilisé comme matériau de construction. Néanmoins, le CO₂ stocké est ensuite entièrement réémis dans l'atmosphère lors de sa combustion (qui produit peut être cependant de l'énergie) ou de sa biodégradation. Le bilan carbone du bois est donc plutôt neutre si l'on considère le cycle complet de vie en tenant compte de son extraction, de sa transformation (séchage inclus) et de son transport.

Le cas du lamellé-collé est un peu plus complexe, car il nécessite plus de ressources énergétiques pour le sciage du bois, son collage et la production de la colle. Le bilan CO₂ de ce genre de produit peut être par conséquent beaucoup moins bon que celui du bois massif – selon ce qui est inclus dans le calcul. Le lamellé-collé s'avère dans tous les cas moins écologique que le béton, par exemple.

Pour réaliser une bonne comparaison, nous ne pouvons pas en rester à ces chiffres ; il est indispensable de comparer l'énergie consommée et les émissions de CO₂ pour une même application. Prenons l'exemple d'une pièce de structure : une poutre de 2 m de portée devant supporter une charge linéaire de 10 t/m. On obtient alors les chiffres reportés dans le tableau 3 en prenant les valeurs moyennes du tableau 2.

Les avantages écologiques du bois sont ici soulignés par ses excellentes propriétés spécifiques, comme nous le verrons plus loin. Par rapport au composite en carbone, le bois massif apporte un gain d'un facteur 110 pour l'énergie consommée et améliore grandement le bilan carbone. De plus, la durée estimée de disponibilité des ressources naturelles (hors recyclage) pour les matériaux métalliques est de l'ordre de quelques dizaines d'années (titane, cuivre, etc.) à quelques centaines d'années (fer, aluminium), d'après la Japan Society of Metallurgy (1998). Quant à la production de polymères et de carbone, la ressource est liée au pétrole. On voit alors tout l'intérêt de l'utilisation du matériau bois, qui est naturellement renouvelable en quelques dizaines d'années (contre plusieurs millions pour le pétrole).

Enfin, l'utilisation du bois pour le projet présenté ici bénéficie d'un contexte local favorable à Montpellier. En effet, on trouve sur place :

- l'équipe de recherche « Mécanique de l'arbre et du bois » du Laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC [6]), dont les travaux portent sur la compréhension et les conséquences des mécanismes d'élaboration du matériau bois et de son comportement à toutes les échelles caractéristiques [4] ;

- l'unité propre de recherche « Production et valorisation des bois tropicaux » du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad [7]), dont les travaux portent, entre autres, sur la qualification des propriétés et de la variabilité des bois, et vont jusqu'à la mobilisation de la ressource dans les zones de production.

Le lamellé-collé ne permettant pas d'obtenir un bilan environnemental aussi bon, nous nous sommes donc naturellement orientés vers l'utilisation d'un bois massif. Et nous nous sommes limités à des essences de bois locales, afin de réduire les émissions de CO₂ liées au transport [11].

Notons au passage que la France a encore des efforts à faire pour l'utilisation du bois (issu de forêts gérées durablement). En effet, en moyenne, si un Japonais ou un Finlandais consomme 1 m³ de bois par an, un Français n'en consomme que 0,18 m³ [8] (l'une des plus faibles consommations d'Europe, dont la moyenne se situe autour de 0,45 m³/hab/an).

Sa structure interne

Le bois connaît actuellement un regain d'intérêt grâce à ses qualités écologiques et à l'amélioration des connaissances sur ses propriétés par la recherche scientifique [13]. Il est utilisé dans de nombreux secteurs d'activité, de l'ameublement au bâtiment [4]. Afin de comprendre en quoi le bois est un matériau performant, mais aussi quelles sont ses limites (actuelles), nous allons étudier ses particularités.

Le bois, avant d'être un matériau, est un ensemble de tissus organiques (ensemble de cellules ayant la même fonction) assurant différents rôles dans l'arbre : soutien mécanique, réseau de conduction de la sève brute, « muscle » pour la réorientation des axes (tronc, branches) [14], stockage de substances nutritives et aussi protection contre les agents de dégradation (insectes, champignons...). Si l'on devait établir le cahier des charges d'un arbre, il pourrait se résumer ainsi [15] : une tour autonome devant supporter une batterie de capteurs solaires, pesant quelques dizaines à quelques centaines de kilogrammes, à 30-40 m du sol en moyenne, résistant au vent et contenant une pompe et une tuyauterie capable d'alimenter en eau chaque capteur solaire. Sa durée de vie est d'au moins une bonne centaine d'années (et peut aller jusqu'à plusieurs milliers).

Il existe au moins autant de bois que d'essences d'arbres (plus de 1 200 en forêt guyanaise, par exemple). Selon l'usage, on sélectionnera un bois pour sa résistance mécanique (bois de construction), ses propriétés acoustiques (instruments de musique), sa durabilité (usages extérieurs), ses qualités esthétiques et sa couleur (ameublement) ou encore son odeur (bois de rose en parfumerie). Il est important de ne pas oublier toutes les parties du bois qui ne peuvent pas être utilisées pour ces usages nobles (déchet de scierie, bois d'éclaircie, etc.) et qui constituent la ressource première de la fabrication du papier et de la production d'énergie.

Le bois est produit lors de la croissance secondaire (radiale) de l'arbre à partir d'un ensemble de cellules appelé *cambium*, situé sous l'écorce [9]. La différenciation des cellules du cambium, qui dure quelques semaines, entraîne la création de bois (ou *xylème*) vers l'intérieur de l'arbre et d'écorce (ou *phloème*) vers l'extérieur. Lors de cette différenciation, les cellules subissent d'abord une phase de croissance qui se poursuit par une phase de développement au cours de laquelle la paroi cellulaire s'épaissit. C'est ce mode de développement biologique qui explique l'aspect très hiérarchisé du bois à diverses échelles [4].

À l'échelle de la paroi, il est similaire à un nanocomposite multicouche composé de microfibrilles de cellulose semi-cristalline dans une matrice amorphe composée d'hémicelluloses et parfois de lignine. À l'échelle du cerne, il peut être assimilé à un matériau cellulaire avec différents types de cellules et une variation, entre autres, de densité suivant la période de croissance (printemps ou été). Enfin, à l'échelle de la planche et du tronc, on retrouve un composite multicouche à symétrie cylindrique (concentrique) avec des variations de propriétés suivant l'âge des cernes.

En effet, les arbres produisent naturellement des substances chimiques, souvent appelées extractibles, déposées tardivement dans le bois dit de cœur au cours de ce que l'on appelle la *duraminisation*. Ces substances peuvent, pour certaines essences, leur permettre de résister aux attaques de certains insectes ou champignons, et jouent un rôle (mineur) dans les propriétés mécaniques. Elles induisent aussi parfois des couleurs et des odeurs particulières.

De plus, l'arbre jeune est flexible comme un roseau pour devenir ensuite plus rigide avec l'âge. On retrouve alors trois zones principales, ayant des comportements différents, dans la section transversale d'un tronc : l'*aubier* à l'extérieur, le *duramen* (ou *bois de cœur*) et le *bois juvénile* au niveau de la moelle.

Il faut encore ajouter des singularités structurelles comme les nœuds, le bois dit de réaction et des défauts naturels qui engendrent de fortes hétérogénéité et variabilité des propriétés.

Cette structure hiérarchique organisée à plusieurs niveaux et ses constituants polymériques donnent au

bois un comportement complexe sous l'effet d'actions thermiques, hydriques ou mécaniques. Il est généralement considéré comme orthotrope dans un repère cylindrique, d'axes radial R, transversal T et longitudinal L, à l'échelle de la planche ou du tronc, avec une forte hétérogénéité, principalement suivant la direction radiale.

Ses performances mécaniques

Comme nous venons de le voir, une propriété importante du matériau bois, due à son origine végétale, est sa variabilité : ses propriétés (mécaniques par exemple) ne sont pas parfaitement déterminées, car différentes d'une forêt à une autre, d'un arbre à l'autre et surtout suivant son emplacement dans l'arbre. Sur la carte [5], par rapport à une nuance d'acier (par exemple, l'acier inoxydable de cuve de centrale nucléaire AISI 316L ou ASTM A479 ou X2CrNiMo17133E ou encore UNS S31603 suivant la norme choisie) dont les caractéristiques sont, pour un traitement donné, positionnées de façon précise (par un point), une essence de bois (par exemple le peuplier) couvre une zone de taille plus importante. Ces différentes variabilités, structurelles mais aussi selon les types de sollicitations thermohydromécaniques, font que les ingénieurs n'ont pas « confiance » dans ce matériau. Les recherches actuelles tentent donc de mieux le connaître (de sa genèse dans l'arbre à son utilisation en tant que matériau) et de mieux prévoir son comportement.

Ses propriétés intrinsèques sont bien inférieures à celles de l'acier. Il faut cependant se méfier d'une vue limitée des performances d'un matériau (ici, pour 2 propriétés particulières, le module d'Young E et une résistance σ_0 telle que la limite élastique en traction). Considérons par exemple les propriétés spécifiques (E/ρ et σ_0/ρ par exemple, où ρ est la masse volumique [5]) : on voit alors que la rigidité spécifique de ce bois (dans la direction longitudinale) est tout à fait comparable à celle de l'acier A 316L, et sa résistance spécifique supérieure. Les propriétés spécifiques dans la direction transversale sont quant à elles dix fois inférieures à celles de l'acier. Grossièrement comparé à d'autres matériaux d'origine biologique, le bois est presque aussi rigide que l'os, et presque aussi tenace que le muscle. L'attrait récent de l'utilisation des composants du bois pour les nanocomposites provient de leurs rigidités spécifiques dans la direction longitudinale

$$E/\rho \text{ (cellulose cristalline)} \approx 0,085 \text{ GPa/(kg/m}^3\text{)}$$

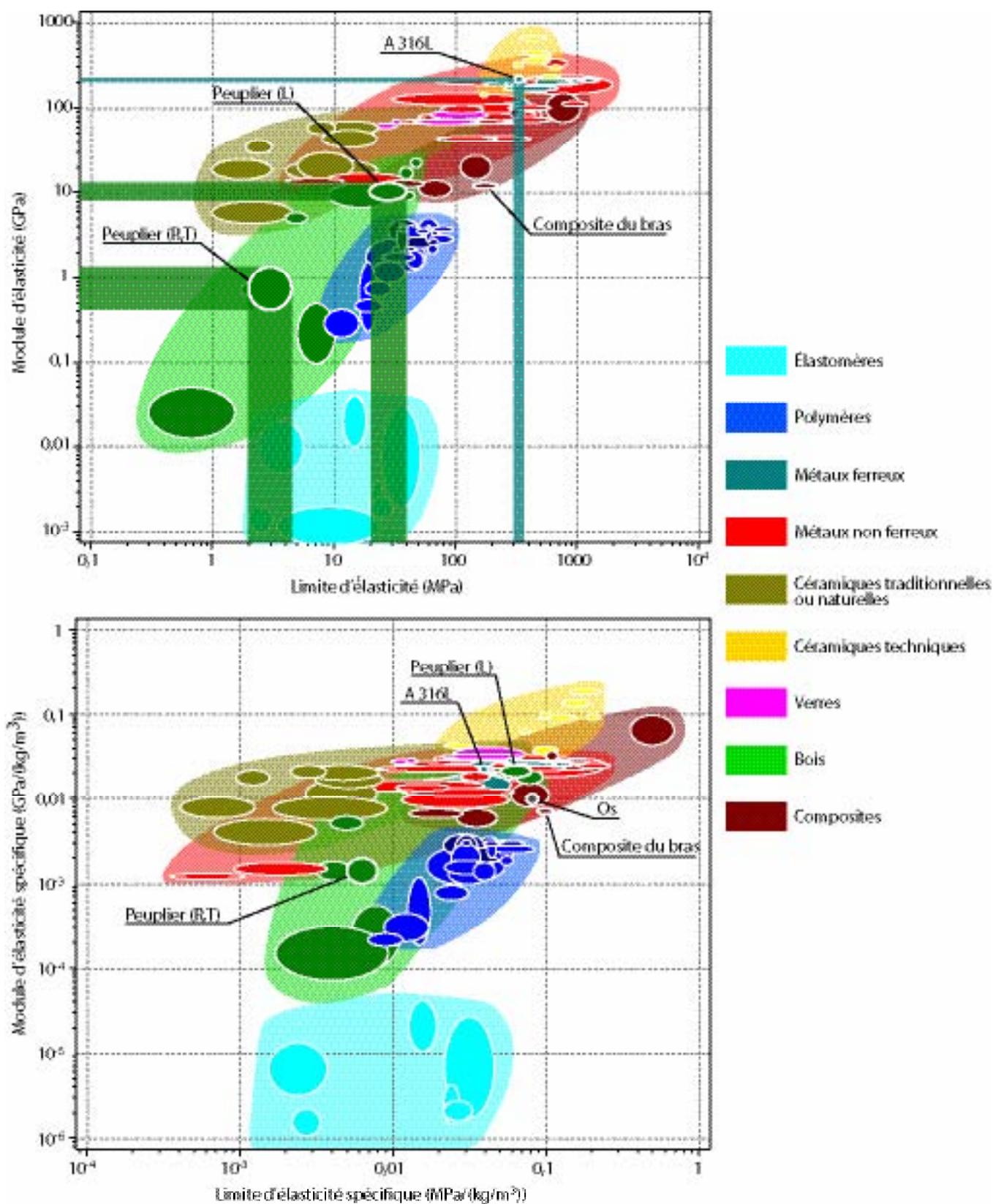
$$E/\rho \text{ (hémicelluloses sèches)} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ GPa/(kg/m}^3\text{)}$$

$$E/\rho \text{ (lignine)} \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ GPa/(kg/m}^3\text{)}$$

comparées à celle de l'acier :

$$E/\rho \text{ (A 316L)} \approx 0,025 \text{ GPa/(kg/m}^3\text{)}$$

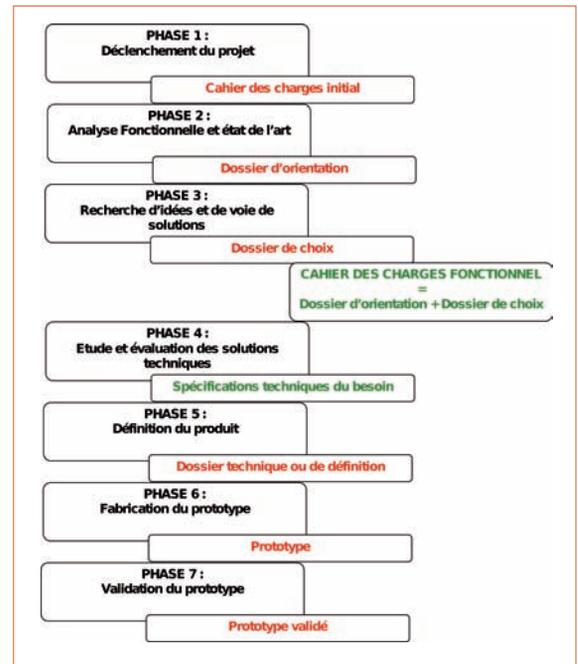
Comparées à celles des matériaux composites, les propriétés spécifiques du bois sont globalement inférieures (à l'échelle d'une planche), sans en être trop éloignées. Par contre, les fibres de carbone du tube composant le bras initial sont



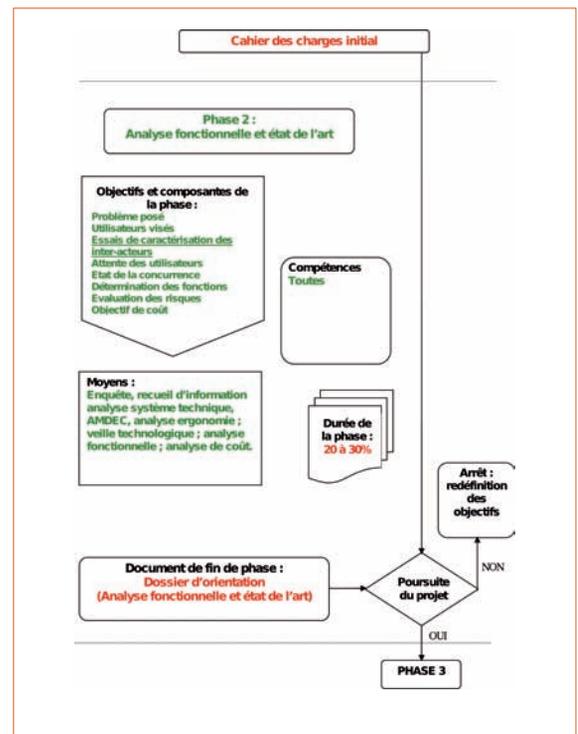
5 Les caractéristiques mécaniques comparées de plusieurs matériaux [5]

Bibliographie

- [1] CLAVEL (Raymond), « Robots parallèles », *Les Techniques de l'ingénieur*, R 7 710 (archives), 1994
- [2] MERLET (Jean-Pierre), *Les robots parallèles*, Hermès, 1996
- [3] PIERROT (François), MERLET (Jean-Pierre), « Modélisation des robots parallèles », dans *Analyse et modélisation des robots manipulateurs* (sous la direction d'Étienne Dombre), Hermès, 2001, p. 93-144
- [4] GOGU (Grigore), *Structural Synthesis of Parallel Robots: Methodology*, Springer, 2007
- [5] DOMBRE (Étienne), « Introduction to Surgical Robotics », dans *3rd Summer School on Surgical Robotics*, Montpellier, 2007
- [6] NABAT (Vincent), RODRIGUEZ (Maria de la O.), COMPANY (Olivier), KRUT (Sébastien) et PIERROT (François), « PAR4: Very High Speed Parallel Robot for Pick-and-Place », dans *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, Edmonton, Canada, 2005, p. 1202-1207
- [7] XP E01-005, « Produits mécaniques – Méthodologie d'éco-conception », norme expérimentale, mars 2009
- [8] XP ISO/TR 14062, « Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit », norme expérimentale, janvier 2003
- [9] *Panorama des initiatives françaises dans le domaine de l'éco-conception*, Afnor/Ademe, 2007
- [10] DEVALAN (Pierre), « Écoconception des composants mécaniques », *Les Techniques de l'ingénieur*, BM 5 009, 2007
- [11] JOLLIET (Olivier), SAADÉ (Myriam) et CRETZAZ (Pierre), *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Presses polytechniques et universitaires romandes, coll. « Gérer l'environnement », 2005
- [12] BENETTO (Enrico), « Analyse du cycle de vie », *Les Techniques de l'ingénieur*, G 5 510, 2005
- [13] THIBAUT (Bernard), GRIL (Joseph) et FOURNIER (Mériem), « Mechanics of Wood and Trees: Some New Highlights for an Old Story », *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, vol. 329, série II b, 2001, p. 1-16
- [14] MOULIA (Bruno), COUTAND (Catherine) et LENNE (Catherine), « Posture Control and Skeletal Mechanical Acclimation in Terrestrial Plants: Implications for Mechanical Modeling of Plant Architecture », *American Journal of Botany*, vol. 93, 2006, p. 1477-1489
- [15] FOURNIER (Mériem), MOULIA (Bruno), BARBACCI (Adelin), CONSTANT (Thierry) et COUTAND (Catherine), « Comment des structures aussi élancées que les arbres peuvent-elles tenir debout aussi longtemps : les processus de régulation de la formation du bois », dans *Actes du XIX^e Congrès français de mécanique*, Marseille, 2009
- [16] MAROUZÉ (Claude), *Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud*, thèse de doctorat, ENSAM, Paris, 1999
- [17] KRUT (Sébastien), LAURENT (Thierry), *Bois et robots parallèles*, rapport d'achèvement PEPS Robois, Montpellier, 2008
- [18] FUTIN (Sylvain), *Étude d'un bras de robot à architecture parallèle*, rapport de projet de recherche et de transfert de technologie, École supérieure du bois, promotion 73, 2008
- [19] BALLERINI (Aldo), DESPRES (Aurélien) et PIZZI (Antonio), « Non-Toxic, Zero-Emission Tannin-Glyoxal Adhesives for Wood Panels », *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 63 (6), 2005, p. 477-478
- [20] LEI (Hong), PIZZI (Antonio) et DU (Guanben), « Environment-Friendly, Mixed Tannin/Lignin Wood Resins », *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107 (1), 2007, p. 203-209
- [21] CORBEL (David), COMPANY (Olivier) et PIERROT (François), « Optimal Design of a 6-dof Parallel Measurement Mechanism Integrated in a 3-dof Parallel Machine-Tool », dans *Proceedings of IEEE/RSJ IROS 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008



6 Le processus de conception adopté



7 La phase 2 du processus de conception



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

Matériau principal	Carbone	Chêne	Hêtre	Hêtre	Pin	Chêne	Chêne
Masse (kg)	1,228	1,044	1,16	0,871	1,226	1,149	1,04
Moment d'inertie / à l'axe du réducteur (kg·m ²)	0,024	0,022	0,022	0,0165	0,019	0,025	0,0164
Raideur en « flexion » (kN/m)	320	133	293	NC	200	156	137
Raideur en torsion (N·m)	470	100	110	NC	160	120	150
Raideur en traction (kN/m)	390	2 400	2 700	1 300	500	1 700	NC
Coût du prototype (€)	–	NC	315	330	900	710	320

9 La comparaison des performances, estimées par les étudiants, des différents prototypes avec celles du bras en carbone

(l'ordre correspond à celui de la figure 8)

orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe, ce qui lui confère un module d'élasticité spécifique (en traction/compression) plus faible que celui du peuplier dans la direction longitudinale 5 mais de bien meilleures performances en torsion. Nous verrons qu'avec un bon dimensionnement un bras en bois massif peut tout à fait concurrencer le bras en carbone.

La conception du bras

Le processus de conception

La démarche suivie dans le cadre du projet est une adaptation de la démarche de conception Cesam développée par Claude Marouzé [16] et utilisée par le Cirad.

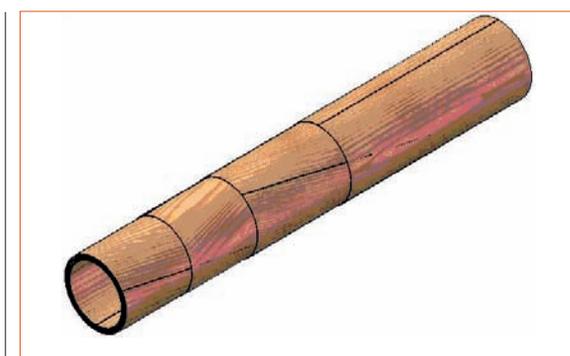
La figure 6 montre, de façon synthétique, le phasage du projet de son déclenchement à la validation du prototype fonctionnel correspondant à la finalité de la demande du client (en rouge, les documents de fin de phase). Chacune de ces phases est ensuite détaillée, en précisant :

- Les objectifs et les composantes de la phase ;
- Les compétences nécessaires (économiques, techniques ou encore d'animation) ;
- Les moyens ou les outils ;
- La durée affectée à la phase ;
- Le document de fin de phase à remettre ;
- La validation, si cette phase fait l'objet d'une validation de la part du décideur ;
- La situation de fin de phase qui, selon les résultats obtenus, conduit à la poursuite ou non du projet (avec, en cas d'arrêt, l'action à mener et le retour dans l'organigramme du projet).

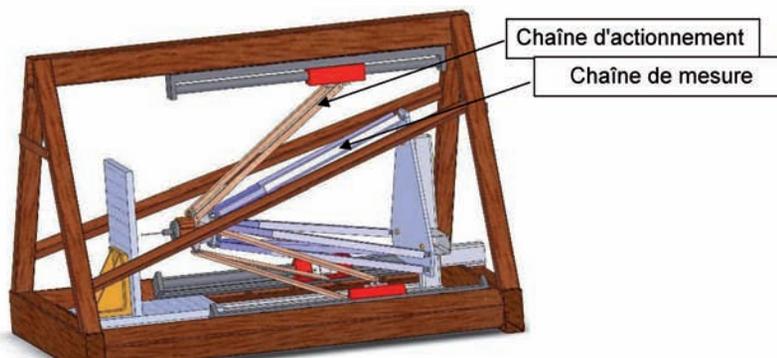
La figure 7 donne en exemple le détail de la phase 2, « analyse fonctionnelle et état de l'art ». Les informations fournies dans chacune des phases permettent au groupe de projet de construire consciemment un Gantt en ayant une estimation de la durée de chacune des phases, une visibilité des tâches à mener et la possibilité



10 La validation des bras avec pilotage des accélérations jusqu'à 17 g



11 Le contreplaqué tubulaire avec plis intérieurs orientés et croisés [18]



12 La machine à mesurer tridimensionnelle parallèle en bois

d'affecter à chacune de ces tâches des moyens humains au regard des compétences attendues.

Les résultats

La figure 8 montre le bras originel en carbone et les prototypes en bois des différents groupes d'étudiants. Ces prototypes ont ensuite été qualifiés selon les performances attendues 9, à savoir la masse du bras, le moment d'inertie par rapport à l'axe du motoréducteur, les raideurs en flexion, torsion et traction, ainsi que le coût, correspondant uniquement à celui des composants, de la matière première et du temps d'usinage.

Les prototypes obtenus ont des performances du même ordre de grandeur que celles du bras originel en carbone, sauf pour la rigidité en torsion, plus faible, et la raideur en traction, bien plus élevée pour les prototypes (dont les fibres sont dans l'axe du bras, alors que les fibres de carbone sont orientées à ± 45°). Il est donc encore possible d'optimiser la solution, mais ces premiers résultats montrent la faisabilité d'un bras en bois.

Conclusion et perspectives

Chaque bras a ensuite été validé directement sur le robot PAR4, en remplaçant un des bras carbone 10. Le cycle de validation, spécialement conçu pour l'occasion, consiste, après initialisation du robot, à amener progressivement les bras à l'accélération requise de 17 g (g: accélération de la pesanteur). Les six bras en bois ont passé avec succès cette étape de validation finale.

Les résultats de ce projet ont été jugés très satisfaisants par le client et ont servi de base pour la construction d'un « projet exploratoire/premier soutien » (PEPS Robois [17]) qui visait à améliorer les faiblesses ou limites des bras en bois massif et particulièrement leur manque de raideur en torsion. Les travaux menés dans le cadre de ce PEPS ont débouché sur deux champs d'investigation :

- Le développement d'une solution de bras contre-plaqué à base d'enroulement en spirales jointives inclinées à + 30° / 0° / - 30° [18] 11. Pour respecter la contrainte écologique du nouveau produit, une attention particulière est portée à la colle, souvent à

l'origine du mauvais bilan carbone des lamellés-colés [19] [20] ;

- Le développement de l'intégration du matériau bois dans des robots parallèles acceptant les problèmes inhérents à l'utilisation du bois (variation dimensionnelle, variabilité des propriétés, etc.) sans conséquence sur la précision du robot.

L'idée maîtresse que nous défendons dans ce projet est que l'on peut concilier robots à architecture parallèle et éléments en bois, afin de diminuer l'impact environnemental de ces machines. Cette idée repose sur le fait que, par leur architecture mécanique particulière (bâti massif, éléments de structure élancés de forme simple), les robots parallèles se prêtent parfaitement à l'utilisation de composants en bois.

Une machine parallèle en bois tout aussi précise que les machines classiques (au moins en théorie) a pu être conçue en exploitant le concept d'actionnement et mesures dissociés [21]. L'application retenue pour cette machine est pour le moins étonnante : il s'agit d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) 12 ! Cette réalisation rompt avec l'idée préconçue que, pour être précise, une MMT doit être composée d'éléments rigides et parfaitement calibrés. ■

Webographie

- [1] www.lirmm.fr
- [2] www.fatronik.com
- [3] www.meca.univ-montp2.fr
- [4] <http://fr.ekopedia.org> citant www.negawatt.org ; www.fcba.fr ; www.compositions-urbaines.fr
- [5] Logiciel CES Selector : www.grantadesign.com/products/ces/
- [6] www.lmgc.univ-montp2.fr
- [7] www.cirad.fr
- [8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Filière_bois
- [9] www.snv.jussieu.fr/bmedia/bois/index.htm

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.