



HAL
open science

Vers un robot en bois. Première 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. Première partie. *Technologie*, 2010, 168, pp.28-36. hal-00537853

HAL Id: hal-00537853

<https://hal.science/hal-00537853>

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

1. Méthode de conception et justification du choix du matériau

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

Département d'enseignement de mécanique
Faculté des Sciences, Université Montpellier 2
CC55, Place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER CEDEX 5
{Thierry.Laurent, Jean-Louis.Kergueme, Olivier.Arnould, David.Dureisseix}@univ-montp2.fr

1. Cadre de l'étude

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]. 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 supporte celui du poignet, de la main et de l'objet, et l'épaule supporte 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 leur unique moteur individuel n'est placé qu'à leur base (figure 1). Conséquences : la masse de l'objet à manipuler peut être plus élevée, la vitesse plus grande (accélérations 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 robotique¹) et la société Fatronik², 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 and 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, figure 1). Dans le cadre d'une démarche de type éco-conception, le bois massif (d'origine locale) est un excellent candidat comme nous le montrerons dans la suite.

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 sur l'investissement de l'entreprise dans une démarche de type éco-conception de ses produits.



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

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 mécanique³ de l'Université

¹ <http://www.lirmm.fr>

² <http://www.fatronik.com>

³ <http://www.meca.univ-montp2.fr/>

Montpellier 2. Ce master 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... Durant la première année de ce parcours de master, une unité d'enseignement (UE) 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. Le déroulement pratique de ce projet fera l'objet d'une seconde partie de l'article.

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

2. Recherche d'un matériau de structure à faible impact écologique

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.

2.1 Performances écologiques de matériaux de structure

Afin de choisir le matériau remplaçant le composite en carbone du bras initial, nous avons regroupé, dans le tableau 1, pour différents matériaux de construction, les ordres de grandeur de :

- l'énergie nécessaire à la production d'1 kg de matériau,
- les émissions de CO₂ associés,
- la fraction recyclable.

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

Tableau 1. Comparaison de différents matériaux d'un point de vue des performances écologiques.

Ces chiffres sont issus du recoupement de sources diverses⁴ [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 dont l'ambition est de chiffrer 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

⁴ <http://fr.ekopedia.org> citant <http://www.negawatt.org/> ; <http://www.fcba.fr> ; <http://www.compositions-urbaines.fr> ; logiciel CES Selector : <http://www.grantadesign.com/products/ces/>

transport utilisés, etc.

Avec les problèmes soulevés par les changements climatiques, l'opinion publique est focalisée sur les 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 gCO₂/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 des émissions peuvent avoir lieu à ce moment-là. Ceci est d'autant plus vrai pour le bois où des émissions négatives de CO₂ sont reportées dans le tableau 1 car l'arbre en consomme 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 tCO₂/ha. Ceci 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 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 bois lamellé-collé est un peu plus complexe car il nécessite plus de ressource énergétique pour le sciage du bois, son collage et la production de la colle. Le bilan CO₂ de ce genre de produit est par conséquent beaucoup moins bon que celui du bois massif selon ce qui est inclus dans le calcul. Le bois 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 2 en prenant les valeurs moyennes du tableau 1.

Matériaux	Masse volumique ⁵ ρ (kg/m ³)	Limite d'élasticité ⁵ σ_0 (MPa)	Hauteur h (cm)	Masse m (kg)	Energie consommée (MJ)	Emission de CO ₂ (kg)
Composite carbone $\pm 45^\circ$	1500	200	11	36	9900	730
Alliage d'aluminium	2700	150	13	85	13900	890
Acier (faiblement allié)	7800	300	10	154	6500	300
Polymère synthétique (PE)	950	25	23	98	6600	140
Verre (non traité)	2200	25	23	228	4600	230
Béton	2500	10	31	476	950	80
Lamellé-collé Contre-plaqué	750	35	20	62	560	-20
Bois massif (épicéa)	500	45	19	35	90	-70

Tableau 2. Comparaison entre différents matériaux pour la construction d'une poutre de section carrée de 2 m de portée supportant une charge de 10 t/m.

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 de vie estimée 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 à celle du 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 d'années 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 la présence :

⁵ Source CES Selector : <http://www.grantadesign.com/products/ces/>

- de l'équipe de recherche « Mécanique de l'Arbre et du Bois » du Laboratoire de Mécanique et génie Civil⁶ dont les travaux portent sur la compréhension et les conséquences des mécanismes d'élaboration du matériau bois et son comportement à toutes les échelles caractéristiques (figure 2) ;
- de l'unité propre de recherche « Production et Valorisation des Bois Tropicaux » du Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement⁷ dont les travaux portent, entre autres, sur la qualification des propriétés des bois et de leur variabilité, jusqu'à la mobilisation de la ressource dans les zones de production.

Nous nous orientons donc naturellement vers l'utilisation de bois massif car l'utilisation de bois lamellé-collé ne permet pas d'obtenir un bilan écologique aussi bon. Pour encore augmenter le caractère écologique, nous nous limiterons 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 de bois (issu de forêts gérées durablement). En effet si le Japon et la Finlande consomment 1 m³/hab./an de bois, la France n'en consomme que 0,18 m³/hab./an⁸ (l'une des plus basses de l'Europe dont la moyenne est autour de 0,45 m³/hab./an).

2.2 Micro-structure et genèse du bois

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]. On rencontre le bois dans de nombreux secteurs d'activité, de l'ameublement au bâtiment (figure 2). Afin de comprendre en quoi le bois est un matériau performant mais aussi quelles sont ses limites (actuelles), nous allons présenter ses particularités.

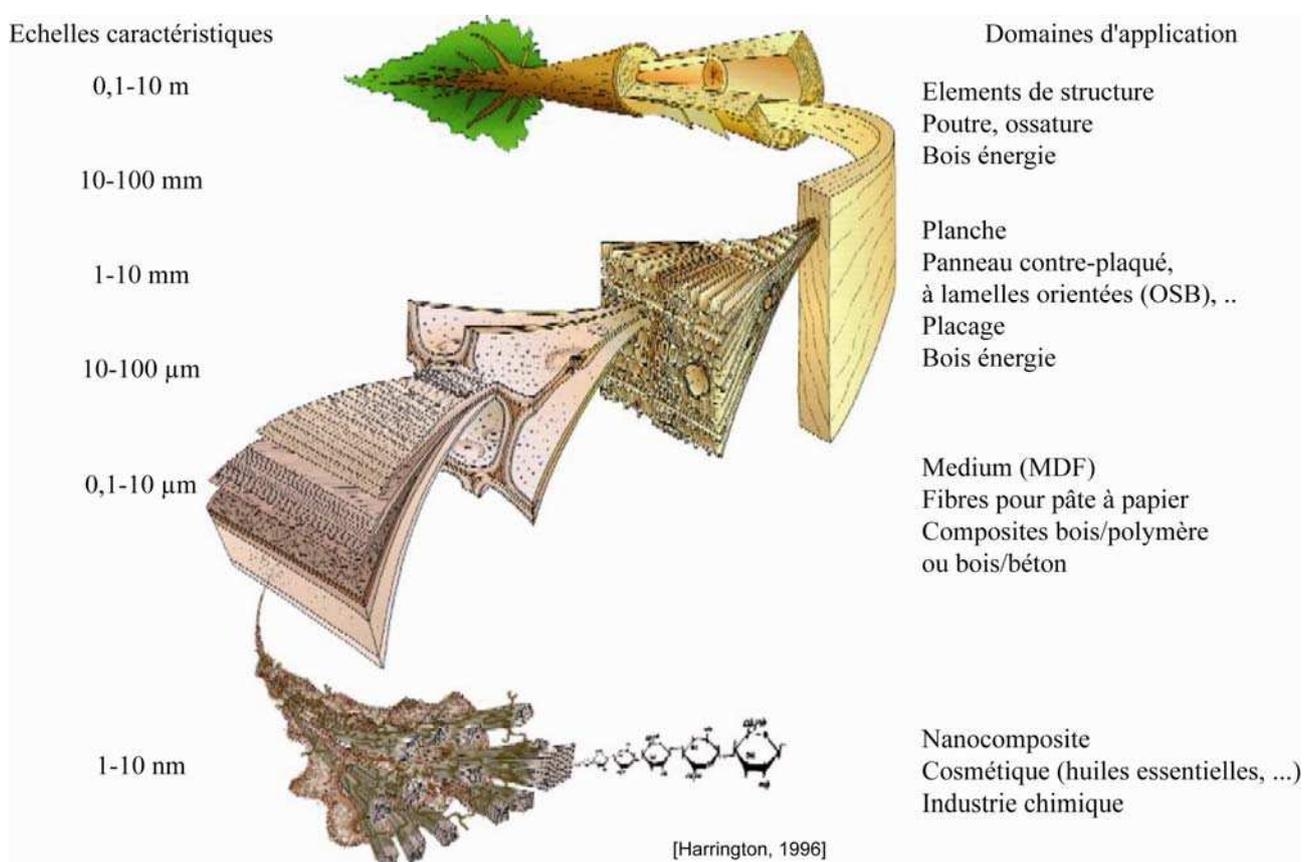


Figure 2. Les différentes échelles caractéristiques du bois et ses domaines d'application.

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, celui-ci 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 (cas extrêmes : séquoia *Hypérion* de 115 m de haut, Redwood National Park, USA ; eucalyptus de 130 m abattu dans les années 60 en Australie), résistant au vent et

⁶ <http://www.lmgc.univ-montp2.fr>

⁷ <http://www.cirad.fr>

⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Filière_bois

contenant une pompe et une tuyauterie capable d'alimenter en eau chaque capteur solaire. La durée de vie atteint au moins une bonne centaine d'années (cas extrêmes : racines d'un bosquet d'épicéa de 9550 ans en Suède ou le pin *Mathusalem* de 4840 ans, White mountains, USA).

Il existe au moins autant de bois que d'essences d'arbres (plus de 1200 espèces en forêt guyanaise par exemple). Selon l'usage, on sélectionnera un bois selon sa résistance mécanique (bois de construction), ses propriétés acoustiques (instruments de musique), sa durabilité (pour les 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 pour la fabrication du papier et la production d'énergie.

Le bois est produit lors de la croissance secondaire (*i.e.*, radiale) de l'arbre à partir d'une assise de cellules dites méristématiques, appelée cambium, située sous l'écorce⁹. 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 (figure 2). A l'échelle de la paroi, celui-ci est similaire à un nano-composite multicouches composé de (micro)fibres de cellulose semi-cristallines dans une matrice amorphe composée d'hémicelluloses et parfois de lignine. A 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 multi-couches 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 une forte 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'axe 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.

2.3 Performances mécaniques du bois

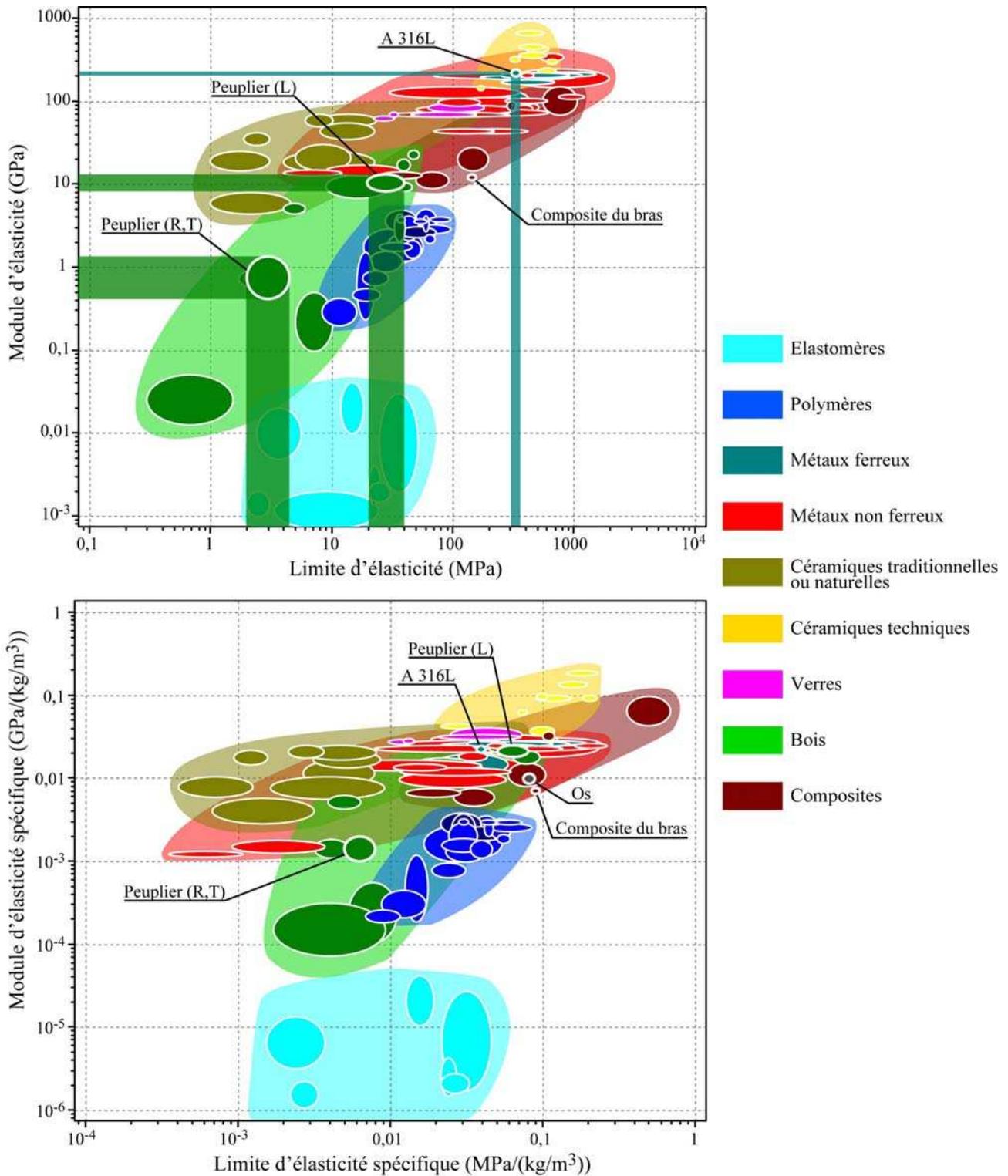
Comme nous venons de le voir, une propriété importante, due à l'origine végétale du matériau, est la variabilité : les propriétés (mécaniques par exemple) ne sont pas parfaitement déterminées car différentes d'une forêt à une autre, d'un arbre à l'autre et surtout suivant l'emplacement de prélèvement du matériau au sein même de l'arbre. Ces différentes variabilités aussi bien structurelles que vis-à-vis des conditions de sollicitations thermo-hydro-mécaniques font que les ingénieurs n'ont pas « confiance » dans ce matériau. C'est pourquoi les recherches actuelles tendent à améliorer les connaissances sur celui-ci (de sa genèse dans l'arbre à son utilisation en tant que matériau) et la prédictibilité de son comportement. Contrairement 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) sur la carte de la figure 3, une essence de bois (par exemple le peuplier) couvre une zone de taille plus importante.

Les propriétés intrinsèques comparées sont bien inférieures à celles de l'acier. Il faut cependant se méfier d'une vue limitée (ici pour 2 propriétés particulières, le module d'Young E et une résistance σ_0 telle que la limite élastique en traction) des performances d'un matériau. Considérons par exemple les propriétés spécifiques (E/ρ et σ_0/ρ par exemple, où ρ est la masse volumique, voir la figure 3) : 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 : $E/\rho(\text{cellulose cristalline}) \approx 0,085 \text{ GPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$, $E/\rho(\text{hémicelluloses sèches}) \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ GPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$, $E/\rho(\text{lignine}) \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ GPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$, comparées à celle de l'acier $E/\rho(\text{A 316L}) \approx 0,025 \text{ GPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$.

Comparé aux matériaux composites, les propriétés spécifiques du bois sont globalement inférieures (à l'échelle d'une planche) sans en être trop éloignées. Nous verrons dans la seconde partie de cet article qu'un bon dimensionnement du

⁹ <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/bois/index.htm>

bras en bois massif est tout à fait concurrentiel avec le bras en carbone. Ceci est principalement dû au fait que le bras en carbone n'est pas réalisé en une seule pièce et qu'il comporte des interfaces de collage avec des pièces en alliage d'aluminium (figure 1) qui affaiblissent le comportement général du bras. Par contre, les fibres de carbone sont orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe du bras ce qui lui confère un module d'élasticité spécifique (en traction/compression) plus faible que le peuplier dans la direction longitudinale (figure 3) mais de bien meilleures performances en torsion.



¹⁰ Source CES Selector : <http://www.grantadesign.com/products/ces/>

3. Conception du bras

3.1 Processus de conception

La démarche suivie dans le cadre du projet est une adaptation de la démarche de conception « CESAM » développée par Marouzé [16] et utilisée par le CIRAD.

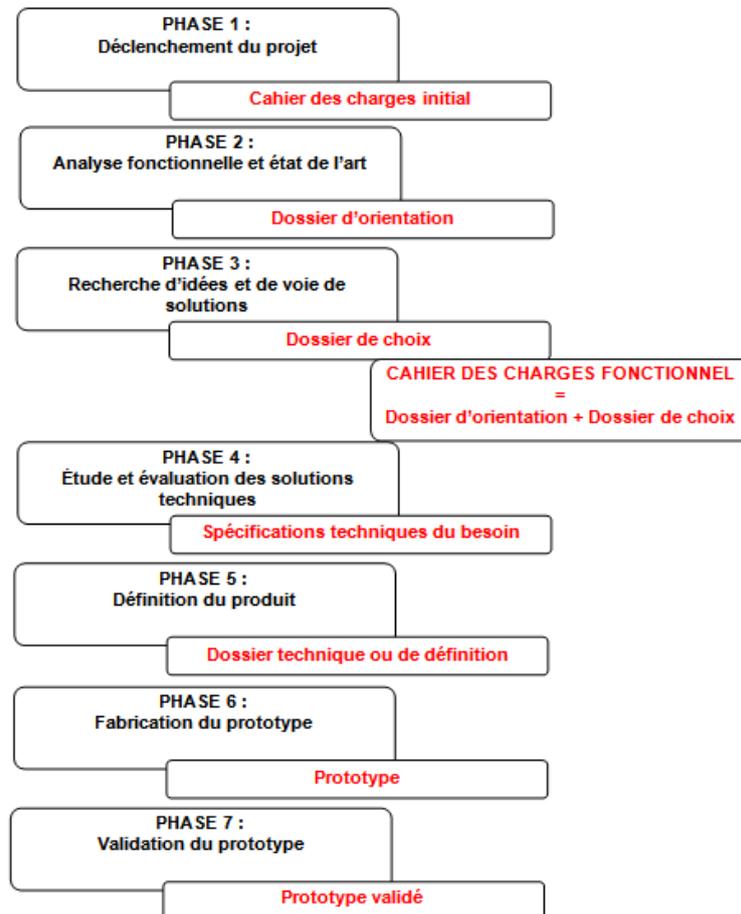


Figure 4. Processus de conception adopté.

La figure 4 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. Les inscriptions en rouge précisent le document de fin de phase. Chacune de ces phases est ensuite détaillée, en précisant :

- les objectifs et les composants 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, conduisent 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 5 donne en exemple le détail de la phase 2 « analyse fonctionnelle et état de l'art ». Les informations fournies dans chacune des phases permet 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 d'affecter à chacune de ces tâches des moyens humains en regard des compétences attendues.

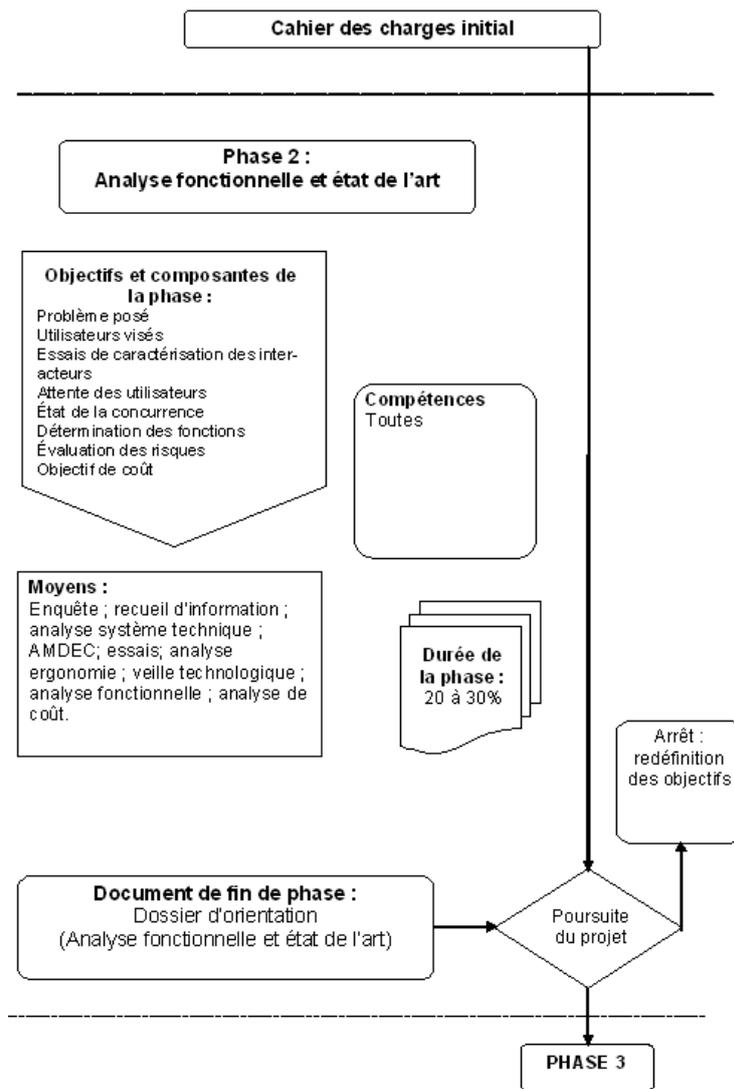


Figure 5. Détail de la phase 2 du processus de conception.

3.2 Résultats

La figure 6 montre le bras originel en carbone et les prototypes en bois des différents groupes d'étudiants. Ces prototypes ont ensuite été qualifiés par rapport aux performances attendues (tableau 3) à savoir la masse du bras, le moment d'inertie par rapport à l'axe du moto-réducteur, les raideurs en flexion, torsion et traction ainsi que le coût du prototype qui intègre uniquement le coût des composants, de la matière première et du temps d'usinage.



Figure 6. Photo du bras initial et de tous les prototypes réalisés ; de gauche à droite en carbone, 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

Tableau 3. Comparaison des performances, estimées par les étudiants, des différents prototypes avec le bras en carbone (l'ordre correspond à celui de la figure 6)

Les prototypes obtenus ont des performances du même ordre de grandeur que celle du bras originel en carbone sauf pour la rigidité en torsion qui est plus faible et la raideur en traction qui est bien plus élevées pour les prototypes (composite à $\pm 45^\circ$ alors que les bois ont des fibres dans l'axe du bras). Il est donc encore possible d'optimiser la solution mais ces premiers résultats montrent la faisabilité d'un bras en bois.

4. Conclusion et perspectives

Les bras sont ensuite validés directement sur le robot PAR4 en remplaçant un des bras carbone par un bras en bois (figure 7). Le cycle de validation est un cycle spécialement conçu pour cette étape et consiste, après initialisation du robot, à amener progressivement les bras à l'accélération requise de 17 g (g accélération de la pesanteur). Les 6 bras en bois testés ont passé avec succès cette étape de validation finale.



Figure 7. Test final de validation des bras avec pilotage des accélérations jusqu'à 17 g.

Les résultats de ce projet ont été jugés très satisfaisants par le client et ont servi de base pour la construction d'un projet de recherche exploratoire (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 débouchés sur 2 champs d'investigation :

- le développement d'une solution de bras contreplaqué à base d'enroulement en spirales jointives inclinées à $+30^\circ/0^\circ/-30^\circ$ [18], figure 8. Pour respecter la contrainte écologique du nouveau produit une attention particulière est portée sur la colle, souvent à l'origine du mauvais bilan-carbone des produits lamellés-collés en bois [19, 20] ;

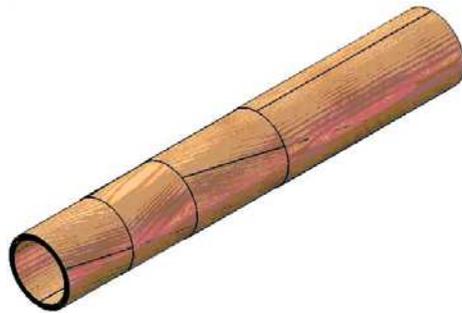


Figure 8. Contreplaqué tubulaire avec plis intérieurs orientés et croisés [18].

- 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.



Figure 9. Photos de la Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) parallèle en bois, à actionnement et mesures dissociés, réalisée dans le cadre du PEPS Robois [17].

L'idée maîtresse que nous défendions dans ce projet était qu'il était possible de concilier robots à architecture parallèle et éléments bois, ceci afin de diminuer l'impact écologique de ces machines. Cette idée reposait sur le fait que, de part leur architecture mécanique particulière (bâti massif, éléments de structure élancés de forme simple), les robots parallèles se prêtaient parfaitement à l'utilisation de composants 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]0. L'application retenue pour cette machine est pour le moins étonnante : il s'agit d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Cette réalisation rompt avec les idées préconçues qui stipulent que, pour être précise, une MMT doit être composée d'éléments rigides et parfaitement calibrés. La figure 9 donne un aperçu de la machine.

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] Reymond Clavel, Robots parallèles, *Les Techniques de l'Ingénieur*, R 7 710 (archives), 1994.
- [2] Jean-Pierre Merlet, *Les robots parallèles*, Hermès, 1996.
- [3] François Pierrot et Jean-Pierre Merlet, Modélisation des robots parallèles, dans : *Analyse et modélisation des robots manipulateurs* (sous la direction d'Étienne Dombre), pp. 93-144. Hermès, 2001.
- [4] Grigore Gogu, *Structural Synthesis of Parallel Robots: Methodology*, Springer, 2007.
- [5] Etienne Dombre, Introduction to medical robotics, dans : *3rd Summer school in surgical robotics*, Montpellier, 2007.
- [6] Vincent Nabat, Maria de la O Rodriguez, Olivier Company, Sébastien Krut et François Pierrot, PAR4: very high speed parallel robot for pick-and-place, dans : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*, pp. 1202–1207, Edmonto, Canada, 2005.
- [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, novembre 2007.
- [10] Pierre Devalan, Ecoconception des composants mécaniques, *Les Techniques de l'Ingénieur*, BM 5 009, 2007.
- [11] Olivier Jolliet, Myriam Saadé et Pierre Crettaz, *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, PPUR presses polytechniques, 2005.
- [12] Enrico Benetto, Analyse du cycle de vie, *Les Techniques de l'Ingénieur*, G 5 510, 2005.
- [13] Bernard Thibaut, Joseph Gril et Mériem Fournier, Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. 329, pp. 1-16, série II b, 2001.
- [14] Bruno Moulia, Catherine Coutand et Catherine Lenne, Posture control and skeletal mechanical acclimation in terrestrial plants: implications for mechanical modeling of plant architecture, *American Journal of Botany*, vol. 93, pp. 1477-1489, 2006.
- [15] Mériem Fournier, Bruno Moulia, Adelin Barbacci, Thierry Constant et Catherine Coutand, 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 XIXe Congrès Français de Mécanique*, Marseille, 24-28/08/2009.
- [16] 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.
- [17] Sébastien Krut, Thierry Laurent, Rapport d'achèvement PEPS Robois « bois et robots parallèles », Montpellier, 2008.
- [18] Sylvain Futin, *Etude d'un bras de robot à architecture parallèle*, rapport de projet de recherche et de transfert de technologie, Ecole des Sciences de Bois, promotion 73, 2008.
- [19] Aldo Ballerini, Aurélien Despres et Antonio Pizzi, Non-toxic, zero-emission tannin-glyoxal adhesives for wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 63(6), pp. 477–478, 2005
- [20] Hong Lei, Antonio Pizzi et Guanben Du, Environment-friendly, mixed tannin/lignin wood resins. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107(1), pp. 203–209, 2007.
- [21] David Corbel, Olivier Company et François Pierrot, 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, France, 22-26 septembre, 2008.