

***MODELISATION PAR RESEAUX DE PETRI POUR UNE PROGRAMMATION VHDL.
EXEMPLE D'APPLICATION EN ROBOTIQUE MOBILE D'ASSISTANCE AU HANDICAP***

Alexandre Abellard,

Doctorant en Traitement de l'Image et du Signal

alexandre.abellard@univ-tln.fr , + 33 4 94 14 22 48

Mohamed Ben Khelifa,

Maître de conférences en Génie Automatique et Traitement du Signal

khelifa@univ-tln.fr +33 4 94 14 20 77

Moez Bouchouicha,

Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche en Génie Automatique et Traitement du Signal

moez@univ-tln.fr +33 4 94 14 24 93

Patrick Abellard,

Professeur des Universités en Génie Automatique et Traitement du Signal

abellard@univ-tln.fr +33 4 94 14 22 48

Adresse professionnelle

Laboratoire SIS/AI ★ Université de Toulon-Var ★ BP 20132 ★ F-83957 La Garde Cedex ★ France

Résumé : La recherche des solutions au problème de la conception conjointe matériel/logiciel est une tâche majeure dans la définition d'une méthodologie unique, structurée et automatique, permettant l'accélération du processus de conception et l'évaluation dynamique de différents compromis . Les Réseaux de Petri à Flux de Données sont une solution efficace pour y parvenir, ainsi que leur implantation sur circuits programmables. Nous décrivons une application relative à un fauteuil roulant contrôlé par une manette gérée par réseau neuronal.

Summary : The research of solutions to the problem of hardware/software codesign is a major task in the definition of a unique, structured and automatic methodology. Data Flow Petri Nets can be an efficient way to do this. Thus, it is possible to write a program and to compile it in order to implement it on programmable chips. The following paper describes their implementation in a wheelchair, whose lever is handled by a neural network.

Mots clés : Réseaux de Petri, réseaux de neurones, VHDL, fauteuil roulant.

Modélisation par réseaux de Petri pour une programmation VHDL. Exemple d'application en robotique mobile d'assistance au handicap

La recherche des solutions au problème de la conception conjointe matériel/logiciel est une tâche majeure dans la définition d'une méthodologie unique, structurée et automatique, permettant l'accélération du processus de conception et l'évaluation dynamique de différents compromis. Les Réseaux de Petri à Flux de Données (RdPFD) sont une solution efficace pour y parvenir, et l'utilisation d'un langage comme VHDL permet ensuite leur implantation sur circuits programmables.

L'exemple qui est décrit concerne un fauteuil roulant ergonomique et à commande adaptable au handicap. Pour certains handicapés, l'utilisation d'un fauteuil roulant peut être difficile du fait de capacités physiques trop faibles ou de troubles cognitifs. L'interface homme - machine doit donc être modulaire et configurable, facile à mettre en place, apporter une grande fiabilité, et utiliser le plus souvent possible du matériel non spécifique. Le projet FRACAH (Fauteuil Roulant A Commande Adaptée au Handicap) a été ainsi développé. Sa manette est gérée par un réseau de neurones artificiels qui enregistre les limitations fonctionnelles de la main puis qui les compense. Les expériences pratiquées avec des personnes présentant un handicap plus léger ont montré que la rentabilité dans l'exécution des tâches à accomplir était accrue, avec une sécurité maximale.

1 - INTRODUCTION

La conception conjointe de systèmes matériel/logiciel (hardware/software codesign) désigne la conception de systèmes comportant une partie matérielle avec un ou plusieurs circuits spécifiques (ASIC, composants reconfigurables...) et une partie logicielle qui est exécutée sur une architecture à base de processeurs standards ou spécifiques (microcontrôleurs, DSP...). Elle englobe la spécification, la validation et l'exploration des différentes possibilités de conception d'un système mixte dans le but d'optimiser des critères de coût et/ou de performances. Dias (2000) a montré que la recherche de

l'ensemble des solutions est une tâche majeure dans la définition d'une méthodologie unique, structurée et automatique car elle permet de définir des caractéristiques fondamentales telles que le coût et les performances temporelles.

Les avantages de cette intégration de conception matérielle et logicielle sont l'accélération du processus de conception et la possibilité d'évaluer dynamiquement les différents compromis possibles comme l'a fait Rompaey (1996). Par exemple, dans le cas de DSP et de circuits spécifiques, le processus de conception doit supprimer l'écart existant entre la spécification fonctionnelle hétérogène et son implantation. Au niveau système, Rubini et Lavenier (1997) ont démontré que les DSP ont besoin d'une combinaison entre les modèles flots de données et les modèles flots de contrôle pour leur spécification complète. L'utilisation des Réseaux de Petri à Flux de Données (RdPFD) est une solution efficace pour y parvenir. En effet, l'algorithme à implanter est facilement décrit par RdPFD et simulé avec n'importe quel outil standard. C'est à partir des résultats des simulations, qu'il est alors possible d'écrire un programme VHDL et de le compiler pour son implantation sur circuits programmables comme le propose Belhadj (1994).

2 - LES RESEAUX DE PETRI A FLUX DE DONNEES

Ils ont été définis par J. Alhmana (1983) et permettent de modéliser efficacement les machines multiprocesseurs de type flux de données / flux de contrôle, dans lesquelles la recherche des performances nécessite que soient supprimées des difficultés aussi diverses que : partage de bus, conflits d'accès mémoire, échanges inter-processeurs.... Ce type d'architecture est structurellement différent des multiprocesseurs classiques car il ne comporte ni processeur central, ni mémoire centrale. Ce sont les données qui dirigent les opérations. Abellard et Grall (2000) ont recensé un certain nombre de réalisations qui existent avec des modèles de fonctionnement variés.

Les Réseaux de Petri à Flux de Données (RdPFD) réalisent la combinaison en un modèle, de flots de données et de flots de contrôle. Abellard (2001) les utilise comme outil de spécification, de simulation et validation d'architectures à flux de données. Ce modèle, basé sur la notion de places biparties (opérateurs P_o et variables P_v) permet de modéliser de nombreuses structures : synchrones, asynchrones, systoliques, neuronales... (figure 1).

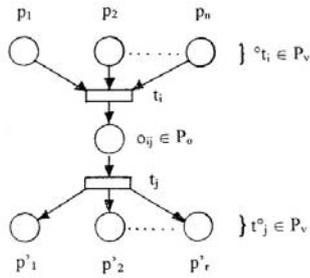


Figure 1 : Réseau de Petri à Flux de Données

Un RdPFD est un septuplet $(R, \varphi, \xi, \psi, X, O, C)$ défini de la façon suivante :

➤ R est un Réseau de Petri à Places bi-Parties (RdP PbP) conforme.

➤ φ est une application

$$\varphi | P_v : P \rightarrow X$$

$$\varphi | P_o : P \rightarrow O$$

telle que

$$\forall p_i \in P_o, p_j \in P_o \text{ et } \varphi(p_i) = \varphi(p_j) \text{ pour } i \neq j$$

alors

$$\forall t_l \in P_v \text{ et } t_k \in P_v, \{\varphi(t_l) \neq \varphi(t_k)\}$$

Ainsi, deux opérateurs identiques ne peuvent pas travailler sur le même ensemble de données.

➤ ξ est une application injective

$$\xi : X \rightarrow M = \{ME_1, ME_2, \dots, ME\}$$

telle que :

$$\forall p \in P_v, \exists ME \in M \text{ avec } ME = \xi(\varphi(p))$$

M est appelé ensemble de zones mémoires.

➤ ψ est une application qui permet de poser des conditions sur le franchissement d'une transition $\psi : T \rightarrow C$.

➤ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ est un ensemble de variables (réelles, entières, logiques...) prenant leurs valeurs respectivement dans les domaines D_1, D_2, \dots, D_u .

➤ $O = \{o_1, o_2, \dots, o_v\}$ est un ensemble fini d'opérateurs définis comme des applications internes de $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_u$.

➤ $C = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ est un ensemble de prédicats sur les variables de X .

3 - EXEMPLE D'APPLICATION

3.1 - Présentation

L'exemple qui est décrit concerne une réflexion sur la mise au point d'un fauteuil roulant ergonomique et à commande adaptable au handicap. Le fauteuil roulant électrique est un élément essentiel pour l'autonomie des personnes handicapées. Mais pour certaines, l'utilisation peut parfois être difficile, voire impossible, du fait de capacités physiques résiduelles trop faibles, d'une trop grande spasticité, d'une fatigabilité importante ou de troubles cognitifs. Par exemple, certaines personnes ne peuvent actionner qu'un simple capteur tout ou rien, ce qui rend difficile la commande d'un fauteuil roulant comme l'a expliqué Bourhis (2000). On peut alors apporter des améliorations à l'interface homme - machine standard de type joystick en utilisant des asservissements locaux ou des fonctionnalités intelligentes empruntées à la robotique : détection et évitement d'obstacles, accostage et passage de portes, suivi de parcours, planification de trajectoires... comme ceux réalisés par Ben Khelifa (2001) dans son travail de thèse.

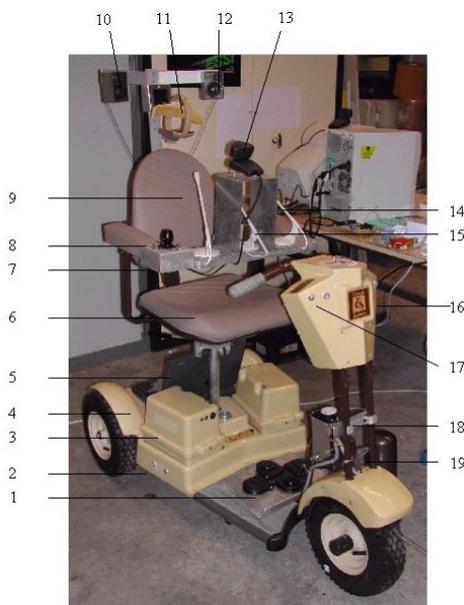
La robotique mobile de réadaptation et l'étude de fauteuils roulants intelligents s'apparentent au domaine de la robotique de service qui présente deux caractéristiques importantes : d'une part le robot partage son espace d'évolution avec les personnes et d'autre part, l'utilisateur n'est pas a priori compétent dans le domaine technologique, ce qui montre l'importance de l'interface homme - machine.

La grande diversité des utilisateurs et des structures est une caractéristique importante de l'application. Par exemple, l'environnement

peut être le domicile, un centre de réadaptation, un hôpital... et l'encombrement potentiel des chemins ainsi que les distances à parcourir sont de ce fait, très variables. Par ailleurs, les patients en fauteuil ont des possibilités physiques et cognitives très différentes.

L'interface homme - machine doit donc être modulaire et configurable, tant du point de vue logiciel que des capteurs de commande. Elle doit être facile à mettre en place et apporter une sécurité maximale avec une grande fiabilité. Par ailleurs, pour optimiser le rapport coût / performances, il est important d'utiliser chaque fois que possible, du matériel non spécifique à l'application, comme par exemple, une base de fauteuil roulant du commerce.

Le projet FRACAH (Fauteuil Roulant A Commande Adaptée au Handicap) a été développé en respectant ces exigences. La base est un ancien fauteuil roulant 3 roues qui a été restauré mais n'importe quel fauteuil du commerce peut convenir. Elle fournit un support expérimental de tests de différentes solutions techniques d'aide au pilotage : bouton - poussoir, joystick, commande par la tête, par le pied, le souffle, la voix... (figure 2).



1. Commande par pédales
2. Détecteurs de proximité droite
3. Compartiment batteries
4. Compartiment cartes électroniques
5. Micro-ordinateur
6. Siège motorisé en rotation et élévation
7. Commande par manette neuronale
8. Voyants - guides directionnels
9. Commande par le souffle (Avant et Droite)

10. Haut-parleur droit (synthèse vocale)
11. Commande par la tête
12. Haut-parleur gauche (synthèse vocale)
13. Caméra (états des yeux, mouvements de tête, suivi du regard, expressions du visage), guidage automatique
14. Commande par le souffle (Arrière et Gauche)
15. Microphone pour commande vocale
16. Détecteurs de proximité Avant Gauche
17. Détecteurs de proximité Avant Droit
18. Servo-moteur de direction
19. Moteur de propulsion

Figure 2 : Fauteuil roulant appareillé

La manette est gérée par un réseau de neurones artificiels qui enregistre les limitations fonctionnelles de la main en phase d'apprentissage, puis qui compense tous les gestes incomplets et élimine les tremblements et les mouvements involontaires désordonnés. En plus des capteurs actifs de sécurité, une caméra embarquée surveille l'état des yeux de l'enfant qui ne doit pas s'attarder trop longtemps à regarder sa manette, et les expressions de son visage (inquiétude, angoisse, peur...).

3.2 - Commande par manette neuronale

Pour prendre en compte les limitations fonctionnelles d'un enfant IMC (Infirme Moteur Cérébral), un réseau de neurones réalise la compensation automatique du geste après une phase d'apprentissage de la manette de contrôle pour que le matériel s'adapte à l'enfant handicapé et non pas le contraire.

Après plusieurs tests en simulation, le réseau de neurones retenu est constitué de 3 couches :

- une couche d'entrée qui reçoit la position (x,y) de la manette,
- une couche cachée,
- une couche de sortie qui fournit la direction appropriée à la commande du fauteuil et sa propulsion

Parmi les différentes architectures neuronales possibles et compte - tenu de la nature du problème, l'algorithme de fonctionnement est basé sur la rétro-propagation du gradient. La figure 3 en donne la structure avec $v_i^{[0]}$ les données d'entrée, $w_{ij}^{[k]}$ les poids synaptiques, $v_i^{[1]}$ les potentiels de la couche cachée, $v_i^{[2]}$ les sorties obtenues, et k l'indice de couche.

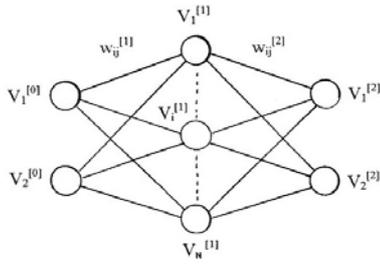


Figure 3 : Réseau de neurones

Les calculs à réaliser sont classiques :

1 - présentation de la donnée d'entrée $v_i^{[0]}$

2 - calcul des potentiels

$$v_i^{[k]} = F \left[\sum_{j=1}^{n_{k-1}} w_{ij}^{[k]} \cdot v_j^{[k-1]} \right]$$

3 - calcul des gradients :

- pour les cellules de sortie :

$$\delta_i^{[k]} = 2F' \left[\sum_{j=1}^{n_{k-1}} w_{ij}^{[k]} \cdot v_j^{[k-1]} \right] \cdot (s_{di}^{[k]} - s_i^{[k]})$$

- pour les autres cellules :

$$\delta_i^{[k-1]} = F' \left[\sum_{j=1}^{n_{k-1}} w_{ij}^{[k]} \cdot v_j^{[k-1]} \right] \cdot \sum_{m=1}^{n_k} w_{mi}^{[k]} \cdot \delta_m^{[k]}$$

avec λ le pas du gradient, F la fonction d'activation et F' sa dérivée.

4 - modification des poids synaptiques :

$$w_{ij}^{[k]} \leftarrow w_{ij}^{[k]} + \lambda \cdot \delta_i^{[k]} \cdot v_j^{[k-1]}$$

Pour illustrer ces calculs par un exemple, nous nous limitons dans le cadre de cet article à la modélisation du calcul du potentiel du premier neurone (figure 4).

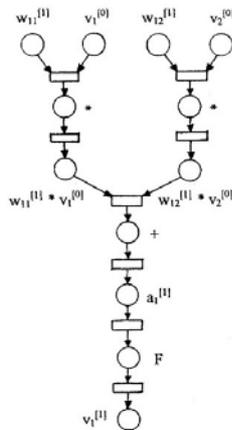


Figure 4 : Réseau de Petri à Flux de Données du calcul du potentiel d'un neurone

Chaque opérateur élémentaire est décrit suivant le principe de la figure 5. Cette description est répétée pour couvrir l'intégralité du RdPFD, comme indiqué figure 6 sur laquelle 3 opérateurs sont pris en compte pour le calcul de $a_1^{[1]} = w_{11}^{[1]} \cdot v_1^{[0]} + w_{12}^{[1]} \cdot v_2^{[0]}$.

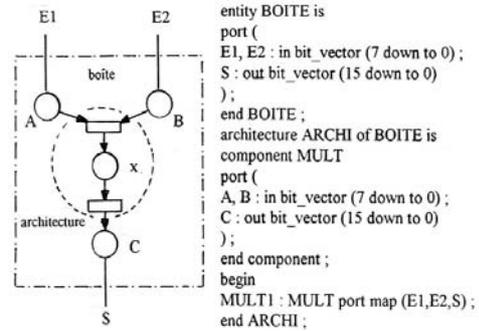


Figure 5 : Description VHDL d'un opérateur

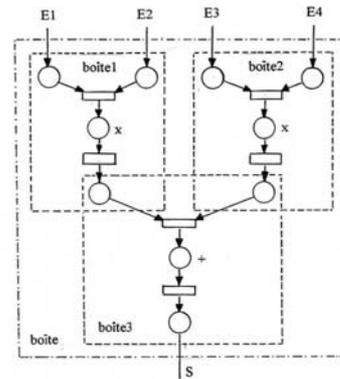


Figure 6 : Description de plusieurs opérateurs

Le programme peut alors être testé et simulé pour une implantation sur diverses cartes commerciales ou personnelles utilisant des composants programmables. La figure 7 donne un exemple de résultats obtenus par Abellard (2002) avec un ensemble logiciel et matériel Altera, après apprentissage dans différentes directions de la manette du fauteuil roulant.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,98	0,95	0,45	0,15	0,05				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,99	0,92	0,56	0,17	0,04	0,01			
0,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,97	0,67	0,19	0,04	0,01	C			
0,12	0,59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,99	0,78	0,23	0,04	0,01	C		
0,03	0,08	0,92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94	0,34	0,04	0,01	C	C		
0,01	C	0,01	0,99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,99	0,74	0,08	0,01	C	C	C	
0,01	C	0	0,05	0,98	0,99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,95	0,37	0,02	C	C	C	C
0	C	0	C	0,59	0,88	0,88	0,98	1	1	1	1	1	1	0,99	0,62	0,1	0,01	C	C	C	C
0	C	0	C	C	0,59	0,5	0,94	0,91	1	1	1	1	1	0,99	0,24	0,02	C	C	C	C	C
0	C	0	C	C	0,05	0,28	0,17	0,23	0,73	0,98	0,52	0,05	C	C	C	C	C	C	C	C	C

Figure 7 : Exemple de résultats obtenus après apprentissage

3.3 - Résultats

Sur le plan de l'application, pour amener l'enfant lourdement handicapé et souvent

limité intellectuellement à apprendre comment utiliser fonctionnellement une manette dans la perspective d'une commande de fauteuil roulant électrique, l'ergothérapeute doit impérativement procéder par étapes : étapes progressives, voire parfois régressives dans lesquelles un certain nombre de paramètres doivent être considérés. Une méthodologie de quantification de l'évolution de l'apprentissage a donc été mise au point par J.P. Belheur (2002). Elle repose sur 5 phases :

- Evaluation fonctionnelle des possibilités de la main de l'enfant (figure 8),
- Chronologie rééducative pour la préparation au maniement de la manette (figure 9),
- Exploitation des feedbacks multisensoriels pour l'orientation cardinale optimale du levier de la manette (figure 10),
- Réglages progressifs des paramètres de fonctionnalités de la manette (figure 9),
- Quantification et analyse des progrès / régressions (figure 11).



Figure 10 : Jeux sensoriels

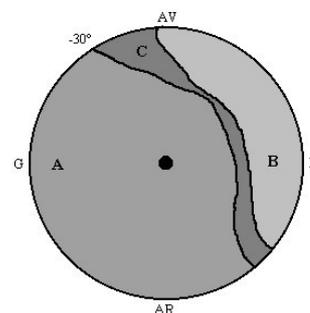


Figure 11 : Analyse de résultats par superposition de zones (A : zone gestuelle fonctionnelle, B : zone difficile à atteindre, C : évolution gestuelle)

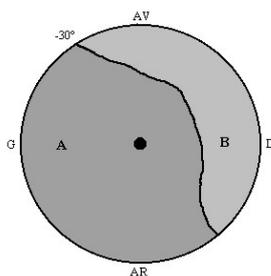


Figure 8 : Evaluation fonctionnelle initiale avant rééducation (A : zone gestuelle fonctionnelle, B : zone difficile à atteindre)

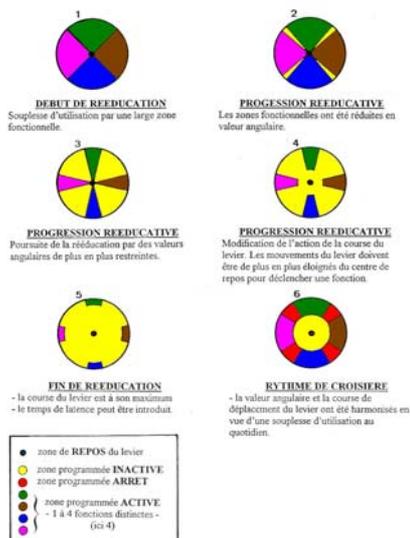


Figure 9 : Chronologie de rééducation gestuelle

4 - CONCLUSION

Les RdPFD constituent un outil efficace de description du parallélisme d'un algorithme de calcul. L'implantation sur une architecture parallèle utilisant des composants programmables est obtenue facilement à partir d'une description VHDL.

Pour l'application décrite, l'architecture neuronale est une bonne solution pour la prise en compte des progressions/régressions. Le rôle des ergothérapeutes est d'aller encore plus loin dans les interventions et les investigations afin de faciliter la vie des enfants IMC. L'ensemble de ces actions devrait permettre d'améliorer l'existant de façon significative car pour certains jeunes IMC, ce n'est pas toujours le temps qui aide le mieux à accéder à l'autonomie, mais plutôt le choix des stratégies rééducatives et des outils mis en oeuvre. Les expériences pratiquées avec des personnes présentant un handicap plus léger ont montré que l'approche innovante de ces travaux accroît la rentabilité dans l'exécution des tâches à accomplir (réduction du temps de

réponse, limitation des erreurs, diminution du facteur émotionnel...) avec une sécurité maximale.

L'électronique et l'informatique sont des outils qui nous conduisent à réfléchir et voir que d'autres personnes adultes lourdement handicapées, même avec des pathologies différentes peuvent elles aussi, accéder à l'autonomie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil Régional PACA pour la bourse d'étude attribuée pour ce travail, la Chambre de Commerce et d'Industrie du Var et le Centre d'Etudes et de Recherches de Toulon et du Var pour leur contribution financière, et M. J.P. Belheur, ergothérapeute à l'Institut Pomponiana-Olbia (Hyères) et Président de l'Association TROPHEE d'aide à la personne handicapée, pour ses conseils et la fourniture du matériel.

BIBLIOGRAPHIE

- Abellard, P., Grall, P. (2000), "A low cost data flow architecture", *ACIDCA*, Monastir.
- Abellard, P., Grall, P., Abellard, A. (2001), "Adéquation algorithme architectures", *CNR'IUT 2001*, Roanne.
- Abellard, A., Enéa, G., Abellard, P., Belheur, J.P., Nolibé, G. (2002) : "Aides techniques en appareillage pour handicapés : de l'éducation gestuelle au projet FRACAH", *Colloque Recherche et Handicap*, Lyon.
- Alhmana, J. (1983) : "Modélisation par Réseaux de Petri à Flux de Données. Application à la synthèse de l'opérateur de Riccati rapide", Thèse de Doctorat, Université de Marseille III.
- Belhadj, M. (1994) : "Conception d'architectures en utilisant SIGNAL et VHDL", Thèse de Doctorat, Rennes 1.
- Belheur J.P, Pailloux M., Petitprez B., Abellard A., Abellard P. (2002), "Aides techniques d'éducation gestuelle pour enfants IMC", *Colloque HANDICAP 2002*, Paris.
- Ben Khelifa, M. (2001), "Vision par ordinateur et robotique mobile d'assistance. Application au projet MARH, Mobile Autonome Robotisé pour Handicapés", Thèse de doctorat, Université de Toulon.
- Bourhis, G., Gelin, R., Pruski, A. (2000), *Robotique d'aide aux personnes handicapées. Applications non manufacturières de la robotique mobile*, pp. 193-238, Ed. Hermès.
- Dias, A.F., "Contribution à l'implantation optimisée d'algorithmes bas niveau de traitement du signal et des images sur des architectures mono-FPGA à l'aide d'une méthodologie d'Adéquation Algorithmes Architectures". Thèse de Doctorat, Paris XI Orsay.
- Rompaey, K., Verkest, D., Bolsens, I., Deman, H. (1996) : "Coware : a design environment for heterogenous hardware/software systems" in *Design Automation for Embedded Systems*, vol 1, n° 4, pp 357-362.
- Rubini, S, Lavenier, D. (1997) : *Les architectures reconfigurables. Les calculateurs parallèles*, Vol 9, n°1.