



**HAL**  
open science

# Méthodologie de Conception appliquée aux Systèmes de radiocommunications de quatrième génération

Arnaud Massiani, Fabienne Nouvel

► **To cite this version:**

Arnaud Massiani, Fabienne Nouvel. Méthodologie de Conception appliquée aux Systèmes de radiocommunications de quatrième génération. MajecSTIC 2005: Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, IRISA – IETR – LTSI, Nov 2005, Rennes, pp.209-214. inria-00000707

**HAL Id: inria-00000707**

**<https://inria.hal.science/inria-00000707>**

Submitted on 15 Nov 2005

**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.

# Méthodologie de conception appliquée aux systèmes de radiocommunications de quatrième génération

Arnaud Massiani, Fabienne Nouvel

IETR

20, avenue des Buttes de Coësmes, 35 043 Rennes

Email: arnaud.massiani@insa-rennes.fr

fabienne.nouvel@insa-rennes.fr

**Résumé :** Ce papier présente l'application de l'approche MCSE et de l'outil la supportant, CoFluent Studio, à la conception de systèmes de radiocommunications numériques. Les différentes phases de conception fonctionnelle et de conception architecturale sont notamment détaillées. Les résultats sont présentés en considérant le cas d'un système de transmission basé sur la technique de modulation MC-CDMA.

**Mots-clés :** méthodes de codesign, exploration architecturale, radio logicielle.

## 1 INTRODUCTION

Les contraintes de fonctionnement des futures générations de systèmes de communications sans fil imposent la mise en œuvre de méthodes de conception efficaces, sûres et rapides. En effet, ces systèmes se veulent largement hétérogènes. Cette hétérogénéité se retrouve tant dans la diversité des standards et des diverses formes d'onde associées que dans les architectures matérielles utilisées. L'émergence d'une Radio Logicielle apparaît comme une solution technologique séduisante pour leur réalisation. Elle induit cependant la nécessité de définir des systèmes reconfigurables, et ce des couches hautes de protocoles jusqu'aux interfaces physiques [Arndt, 2001, Kountouris, 2000]. L'objectif des méthodes de conception conjointe est alors de faciliter le passage d'une spécification vers une réalisation ou une intégration sur une plate-forme prototype. Pour ce faire, différentes étapes peuvent être identifiées :

- l'élaboration des spécifications par l'utilisation de méthodes et de langages orientés objets tels que UML (*Unified Modeling Language*),
- la simulation fonctionnelle du système à partir d'une modélisation de l'application pouvant prendre en compte aussi bien les fonctions de contrôles que de traitements,
- l'exploration architecturale afin de définir une architecture adéquate et d'en évaluer les performances,
- la génération de codes et l'intégration de fonctions IP (*Intellectual property*) pré-conçues afin de faciliter voire d'automatiser la phase de réalisation et d'intégration.

En offrant une réponse à ces différents points, l'application dans un tel contexte de la Méthodologie

pour la Conception de Systèmes Electroniques (MCSE) [Calvez, 1990] peut se révéler particulièrement intéressante. Ce papier vise donc à illustrer l'intérêt de l'approche MCSE pour la conception de systèmes de radiocommunications numériques. Cette approche est ainsi appliquée à la conception d'un système de communications numériques bien précis. Les différentes étapes de cette démarche sont tout d'abord présentées en section 2. La section 3 vise à rappeler les éléments de spécifications et de dimensionnement de systèmes de communications numériques. Nous abordons notamment l'exemple d'un système basé sur la technique de modulation à porteuses multiples et à accès multiple par répartition de codes (MC-CDMA pour *Multiple Carrier-Code Division Multiple Access*). Le modèle de conception fonctionnel préconisé par l'approche MCSE est décrit en section 4. La section 5 présente le modèle de description de l'architecture. L'architecture de prototypage considérée dans le cadre de nos développements est alors présentée. Les possibilités et les résultats d'exploration architecturale sont enfin décrits au cours de la section 6. Finalement, en conclusion nous rappelons les différents points de notre étude et présentons les axes actuellement en cours d'analyse.

## 2 ETAPES DE CONCEPTION ASSOCIÉES À L'APPROCHE MCSE

La Méthodologie pour la Conception de Systèmes Electroniques (MCSE) est une démarche globale descendante de conception. Elle repose sur un ensemble de modèles et de méthodes permettant de simplifier le passage d'une spécification d'un système à une réalisation matérielle. Cette démarche s'articule autour de quatre étapes successives, définissant un flot en 'Y' classique :

- l'élaboration des spécifications, qui consiste en la définition la plus précise possible des contraintes fonctionnelles du système et de ses interactions avec son environnement.
- La conception fonctionnelle vise à définir et à valider une solution interne du système et ce indépendamment de toute contrainte matérielle.
- La conception architecturale permet de dimensionner et d'analyser la mise en œuvre de la solution fonctionnelle.

- L'étude de la réalisation consiste à intégrer les différentes solutions matérielles et logicielles élaborées.

Cette approche est actuellement supportée par l'outil CoFluent Studio [CoFluent Studio, 2005], [Le Moigne, 2003]. Cet outil permet la saisie graphique des modèles associés à chaque étape, il facilite et automatise donc les différentes étapes de conception.

Si cette approche a fréquemment été considérée pour des applications de contrôle-commande [Calvez, 1990], elle se révèle également adaptée au cas de systèmes de communications numériques. Les modèles de conceptions fonctionnelles et architecturales permettent en effet une analyse complète de tels systèmes. Par la suite, nous illustrons chacune de ces étapes par l'analyse d'une application basée sur la technique de transmission MC-CDMA.

### 3 ELABORATION DES SPÉCIFICATIONS D'UN SYSTÈME DE RADIOCOMMUNICATIONS

#### 3.1 Démarche d'élaboration de spécifications

Les spécifications fonctionnelles de la couche physique d'un système de radiocommunications sont classiquement issues des propriétés du canal de propagation pour lequel il est dimensionné. Compte tenu des propriétés statistiques de ce canal il est possible de définir une forme d'onde et une modulation adéquate. Les caractéristiques de cette modulation sont définies notamment en fonction de la mobilité souhaitée du système ou en fonction de la présence de trajets multiples, caractéristiques de l'environnement de propagation. Les contraintes de débit et d'efficacité spectrale permettent également de compléter ce dimensionnement. Dans cet article, nous aborderons uniquement les fonctions de traitement numérique du système de radiocommunications considéré.

#### 3.2 Présentation du système basé sur la technique MC-CDMA

La technique MC-CDMA est un candidat à très fort potentiel pour la liaison descendante, des stations de base vers les mobiles [Steendam, 2002], [Hara, 1997]. En effet, les propriétés de cette technique répondent aux contraintes de très haut débit et de forte mobilité. Elle se présente comme une association de l'étalement de spectre par séquence directe et de la modulation à porteuses multiples selon un multiplex fréquentiel de type OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Elle permet ainsi de tirer parti des avantages de ces deux modulations. En émission, le signal est étalé sur chaque sous-porteuse en utilisant un code d'étalement de longueur  $L_c$  dans le domaine fréquentiel, propre à chaque utilisateur. Les  $N_u$  différents utilisateurs, étant distingués par leur séquence d'étalement, peuvent accéder aux mêmes sous-porteuses. Le dimensionnement du système MC-CDMA passe par une association judicieuse des paramètres  $N_u$  (Nombre d'utilisateurs),  $L_c$  (Longueur des codes d'étalement),  $N_p$  (Nombre de sous-porteuses).

En outre, l'application de codes orthogonaux garantit

l'absence d'interférences d'accès multiples au niveau du récepteur, dans le cas d'un canal gaussien. Cependant, dans un canal à évanouissements sélectifs en fréquence, l'orthogonalité entre les signaux de chaque utilisateur disparaît et des interférences d'accès multiples apparaissent. Différentes techniques d'égalisation aux performances et aux complexités d'intégration différentes peuvent être utilisées en réception, le MRC (*Maximum Ratio Combining*), le EGC (*Equal Gain Combining*), l'ORC (*Orthogonal Restoring Combining*) et le MMSE (*Minimum Mean Square Error*) [Kaiser, 1998]. Cette étape d'égalisation s'insère alors, en réception, entre les opérations de démodulation OFDM et de désétalement selon la séquence d'étalement de l'utilisateur considéré. Un système MC-CDMA peut se représenter sous la forme du schéma bloc, illustré sur la figure 1.

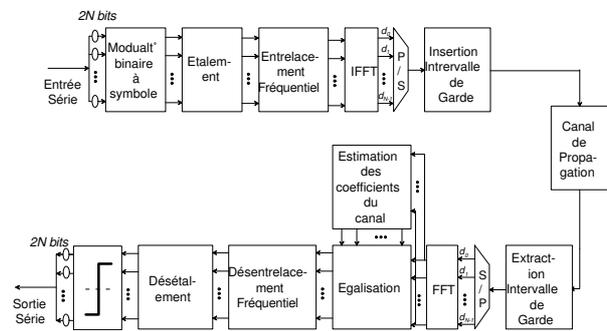


FIG. 1 – Représentation du système d'émission/réception basé sur la technique MC-CDMA.

A partir de ces spécifications de la technique MC-CDMA, l'outil CoFluent Studio permet la modélisation fonctionnelle complète du système.

### 4 ETAPE DE CONCEPTION FONCTIONNELLE

#### 4.1 Modélisation fonctionnelle selon l'approche MCSE

Le modèle fonctionnel repose sur trois vues complémentaires [Calvez, 1996]. Tout d'abord, la vue organisationnelle représente les dépendances de données entre les différents éléments fonctionnels. A ce niveau, les données peuvent être représentées par des ports de communication, des variables partagées ou des signaux de synchronisation. En complément, le point de vue comportemental définit le comportement séquentiel interne de chaque fonction. L'association de ces deux vues permet donc une modélisation complète adaptée à des systèmes de Radio Logicielle, associant contrôle (gestion de la reconfiguration) et flot de données (traitements nécessaires). Enfin, la vue algorithmique correspond à l'algorithme de chaque opération, saisi en langages C-C++ ou SystemC, et à la définition de chacun des types de données.

La modélisation obtenue est complètement exécutable, ce qui permet une vérification du bon fonctionnement du système. Cette exécution repose sur un modèle prenant en compte pour la simulation temporelle la valeur des attri-

buts fonctionnels saisis par l'utilisateur. Ces attributs correspondent notamment à la durée d'exécution de chaque opération, les caractéristiques des échanges de données, la taille des FIFO (*First In First Out*) ...

La phase de validation fonctionnelle consiste à vérifier le comportement global du système ainsi que la validité de chaque fonction algorithmique. L'outil de simulation offre alors la possibilité d'observer et de contrôler l'ordonnancement de l'exécution des différentes fonctions. Il est également possible d'obtenir une visualisation de la valeur des signaux traités. Appliqué à l'étude d'un système de communications numériques, l'outil permet ainsi de valider et de mesurer les performances du système modélisé.

## 4.2 Application au cas du système MC-CDMA

### 1) Simulation fonctionnelle avec un format de données non contraint

Durant la phase de conception fonctionnelle, le système MC-CDMA étudié est modélisé par sa vue organisationnelle et par la définition du comportement de chaque fonction. L'algorithme de chaque opération identifiée est lui saisi dans le langage C ou SystemC. Ceci permet donc une première vérification fonctionnelle du système, et ce sans aucune considération architecturale. La figure 2 donne un exemple du modèle de représentation du système MC-CDMA étudié.

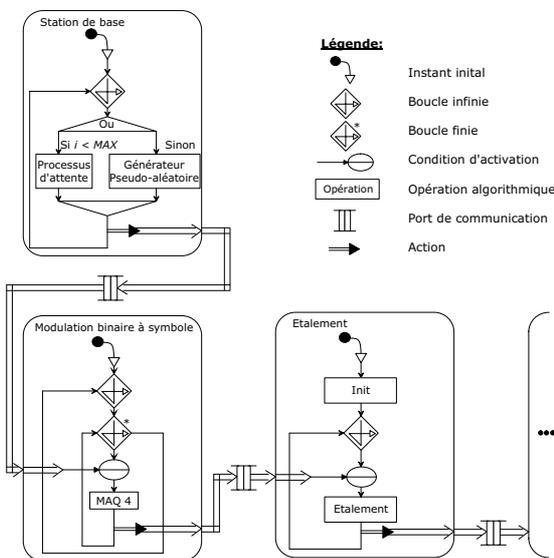


FIG. 2 – Représentation du modèle fonctionnel du système MC-CDMA étudié.

Cette représentation fait apparaître différents éléments. Les ports de communication définissent les échanges entre les fonctions. Le comportement de chaque fonction comprend le déroulement temporel de son activité. Ce comportement inclut les conditions d'activation, les opérations effectuées, éventuellement en parallèle.

Une fois le modèle saisi, le comportement global du système ainsi que la validité de chaque fonction algorithmique sont vérifiés pendant la phase de validation fonctionnelle. Appliqué à l'étude d'un système de communi-

cations numériques, l'outil permet ainsi de mesurer les performances en terme de taux d'erreur binaire (TEB) du système modélisé en fonction du SNR (*Signal to Noise Ratio*), représenté dans la figure 3. L'outil permet également la visualisation des constellations, du spectre, de l'évolution temporelle des signaux, du débit global ou par utilisateur ...

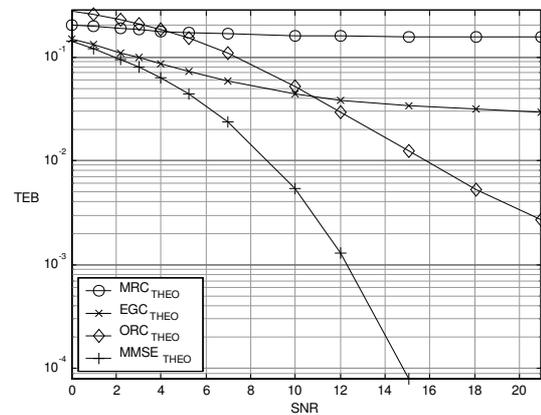


FIG. 3 – Performance du MC-CDMA avec différentes techniques d'égalisation pour une configuration  $N_u = L_c = 32$ .

Les attributs fonctionnels définis par l'utilisateur permettent une analyse temporelle du déroulement de chaque fonction. Ceci permet ainsi de détecter les risques possibles de blocage ou d'attente entre fonctions, comme illustré dans la figure 4.

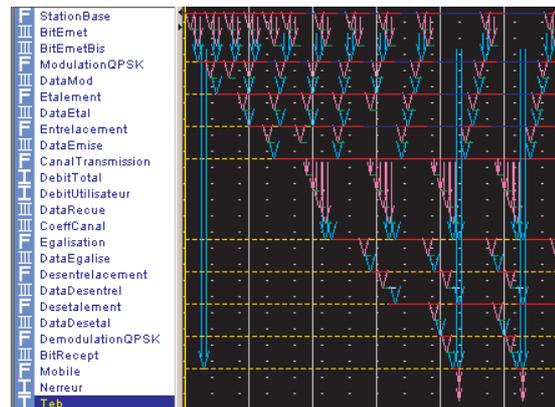


FIG. 4 – Déroulement temporel de l'application MC-CDMA.

Un autre résultat intéressant de la simulation fonctionnelle réside dans la possibilité d'effectuer un *profiling* de l'application modélisée. Ce *profiling*, illustré figure 5, est déterminé par rapport aux temps relatifs d'exécution de chaque fonction. Ce résultat permet ainsi d'identifier très rapidement les fonctions les plus coûteuses en temps de calcul.

### 2) Simulation fonctionnelle avec un format de données contraint

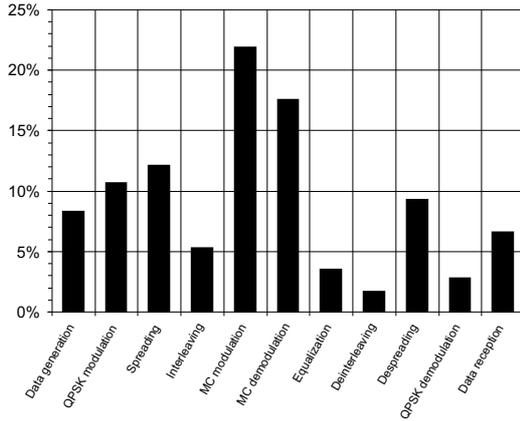


FIG. 5 – Évaluation de la complexité des fonctions pour une configuration MC-CDMA.

Une fois les résultats des simulations fonctionnelles validés, une étape essentielle avant l'implantation sur l'architecture choisie est le passage du format en virgule flottante en virgule fixe. Ce traitement peut induire des erreurs de quantification et de débordement qui peuvent gravement dégrader les performances du système. Pour ce faire, nous avons utilisé des fonctionnalités liées au langage SystemC notamment sur la détermination de format de données ayant une virgule fixe. Cette fonctionnalité est présente dans la librairie "sc-fix" de SystemC. Elle permet non seulement de déterminer un format de données contraint, mais également la stratégie de troncature, de saturation des données et la surcharge des opérateurs afin d'effectuer réellement des calculs dans le format défini. Des informations de débordements et de troncutures sont disponibles afin d'ajuster le format de données. Ce dernier est décrit comme suit :

$\langle \text{word\_length}, \text{integer\_word\_length} \rangle$

avec  $\text{word\_length}$  représentant le nombre de bits total, et  $\text{integer\_word\_length}$  le nombre de bits pour la partie entière, incluant le bit de signe.

Il est possible de définir de nouveaux types de formats de données héritant des bibliothèques SystemC. Il est alors possible de simuler le système avec différents formats de données et pour différentes configurations. Les résultats présentés sur la figure 6 illustrent ce dernier point. La notation  $ORC - FIX_{5,7}$  représente la technique d'égalisation utilisée avec un format de données contraint de 5 bits avant la virgule et 7 bits après la virgule.

Sur la figure 6, nous pouvons par exemple observer que pour un format de données de 8 bits, les performances du système obtenues avec une égalisation de type ORC en format de données contraint sont meilleures que pour une égalisation ORC avec un format de données non contraint [Massiani, 2004].

A l'issue de l'étape de simulation fonctionnelle, les performances du système sont connues en virgule flottante et en virgule fixe. Les informations que donnent les performances du système en virgule fixe orientent fortement

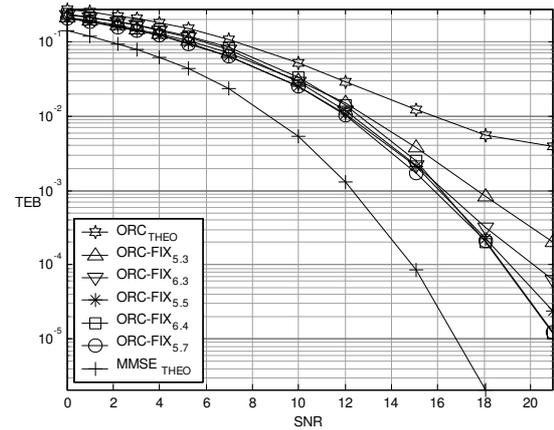


FIG. 6 – Performance de la technique d'égalisation ORC pour différents format de données dans une configuration MC-CDMA donnée.

l'intégration du système MC-CDMA vers une architecture de type FPGA.

## 5 MODÉLISATION DE L'ARCHITECTURE

### 5.1 Modèle associé à l'approche MCSE

La modélisation de l'architecture repose sur une définition explicite des processeurs, des éléments de mémoires externes associés et des ports de communication. Les processeurs logiciels (microprocesseur, DSP) sont distingués des composants matériels (ASIC, FPGA). Cette représentation est complétée par un ensemble d'attributs. Ces attributs concernent le degré de concurrence de chaque processeur logiciel, l'accélération relative apportée par les composants matériels ainsi que la nature et la durée des communications entre processeurs.

### 5.2 Description de l'architecture

Nous avons choisi une plate-forme matérielle fournissant une architecture évolutive, cohérente et modulaire. Elle est constituée d'une carte mère Sundance possédant un lien PCI (*Peripheral Component Interconnect*) sur laquelle viennent s'insérer des cartes filles de type DSP (*Digital Signal Processor*), FPGA (*Field Programmable Gate Array*) et d'acquisition. Ces modules TIM (*Texas Instrument Module*) communiquent entre eux via deux médias de communications. L'un d'eux appelé *CommPort* (CP) est une interface de communication synchrone et bidirectionnelle qui respecte le standard établi par Texas Instruments pour le protocole de communication C4x. Elle permet le transfert de données de taille 8 bits à un débit maximal de 20 Mcoctet/sec. Le second dénommé *Sundance Digital Bus* (SDB) est une interface synchrone et bidirectionnelle proposée par Sundance. Elle permet le transfert de données de taille 16 bits à un débit maximal de 200 Mcoctet/sec. Il est à noter qu'il existe une interface appelée *Sundance High-speed Bus* (SHB) combinant 2 interfaces SDB sur un même connecteur. Les modules sur lesquels nous avons testé notre application sont des modules de type SMT398, illustré figure 7, contenant des

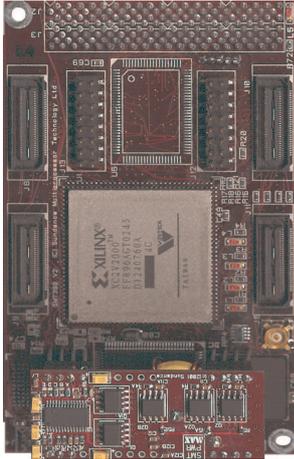


FIG. 7 – Module SMT398 comprenant un FPGA XC2V2000, 4 SHB et 6 CP.



FIG. 8 – Module SMT335 comprenant un DSP C6201, 2 SDB et 6 CP.

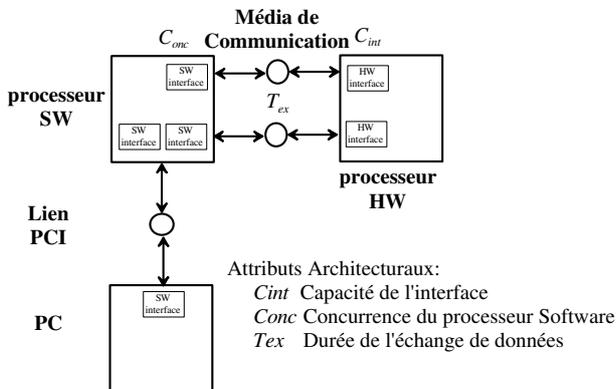


FIG. 9 – Modèle architectural de la plate-forme prototype.

FPGA Xilinx de la famille Virtex2 comprenant 2 millions de portes (XC2V2000) et SMT335, représenté figure 8, contenant un DSP Texas Instrument C6201. Ces deux modules possèdent des médias de communications CP et SDB. Un lien PCI est présent entre le PC et le DSP, schématisé sur la figure 9.

## 6 ETAPE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

### 6.1 Exploration architecturale à partir de l'approche MCSE

L'étape d'exploration architecturale permet d'étudier et de comparer les performances de différentes stratégies d'intégration. La distribution de la solution fonctionnelle sur le modèle d'architecture est étudiée de façon itérative par l'utilisateur. La simulation de l'ensemble permet alors d'observer l'influence de cette distribution selon les attributs architecturaux. L'impact des communications peut en particulier être observé.

Les attributs tels que la vitesse des processeurs, la taille des bus, les temps de calcul sont utilisés pour définir une bonne adéquation algorithme architecture. Cette étape permet d'étudier l'impact de la distribution des fonc-

tions sur l'architecture hétérogène en tenant compte des temps de communications. La définition des interfaces est raffinée tout au long de l'exploration architecturale. Chaque fonction, algorithmique ou de communication, est affectée du nombre nécessaire de cycles d'horloge correspondant à leur durée d'exécution. L'ensemble des attributs architecturaux étant définis, des simulations permettent de déterminer les temps relatifs d'exécution de chaque fonction sur l'architecture choisie. Les performances du système en terme de débit peuvent donc en être déduites.

A partir de cette exploration il est alors possible d'envisager la génération de la solution vis à vis de l'architecture cible.

### 6.2 Exploration architecturale et génération de code appliqués au système MC-CDMA

La distribution du système réalisé, l'étape de la génération de code reste une étape clef. Les fonctions étant écrites dans le langage adapté à la cible choisie, la gestion des interfaces est prise en compte par l'outil.

En effet, l'outil peut générer des Fifos ou Rams servant d'interfaces. Des interfaces sous formes d'IPs sont également intégrables dans l'outil. Dès lors, les interfaces SDB et CP sont directement implantables sous l'outil et prises en compte lors de la génération.

Dans le cas d'une intégration complète sur FPGA, la génération totale de code pour l'application MC-CDMA n'est pas encore atteinte. Cependant, afin de tester la génération de code ainsi que l'intégration d'interfaces externes pour une cible FPGA sous l'outil CoFluent Studio, une chaîne de radiocommunications simplifiée comprenant des interfaces de type SDB a été étudiée. Toutes les étapes de la méthode ont été appliquées sur le système. Un premier test a été réalisé sur un module SMT398. Le modèle architectural cible comprenait un FPGA rebouclé au travers d'un SDB. Un second test a mis en œuvre deux modules SMT398 communiquant via un lien SDB. La phase de génération de code a permis d'obtenir les différentes entités des fonctions, tout en considérant les IP associées aux liens SDB. Les simulations après synthèse ont permis de valider le code VHDL généré. La génération de code multi-cible (DSP et FPGA) reste à étudier.

## 7 CONCLUSION

Un système de transmission MC-CDMA a été modélisé avec l'outil CoFluent Studio supportant la méthode MCSE. Le dimensionnement du système de radiocommunications MC-CDMA en accord avec le canal de propagation a pu être déterminé lors des simulations fonctionnelles. Les simulations fonctionnelles ont également aidé au passage du format virgule flottante en virgule fixe de cette application. La modélisation architecturale ainsi que l'exploration architecturale ont pu être abordées avec l'outil. Cependant, la génération automatique de code conjointe visant une architecture multi-cibles (DSP et FPGA) reste encore en cours de validation.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Arndt, 2001] Arndt M., Martin S., Miscopein B., Bella V., Bollea L., Buracchni E. : "Software Radio : the challenges for reconfigurable terminals". Annales des télécommunications, Vol. 7-8, p. 570-612 (2001).
- [Kountouris, 2000] Kountouris A., Moy C., Rambaud L. : "Reconfigurability : a key property in Software Radio systems". First Karlsruhe Workshop on software Radio, (2000).
- [Calvez, 1990] Calvez J. P. : "Spécification et conception des systèmes : une méthodologie". Editions Masson, (1990).
- [CoFluent Studio, 2005] "CoFluent Studio". www.cofluentdesign.com. (2005).
- [Calvez, 1990] Calvez J. P. : "Spécification et conception des systèmes : études de cas". Editions Masson, (1990).
- [Calvez, 1996] Calvez J. P., Heller D., Pasquier O. : "Uninterpreted co-simulation for performance evaluation fo HW/SW systems". International workshop on Hardware/Software Co-Designs, (1996).
- [Steendam, 2002] Steendam H., Moeneclaey M. : "The sensitivity of downlink MC-DS-CDMA to carrier frequency offsets". IEEE communications Letters", Vol. 5, p. 215-217 (2002).
- [Hara, 1997] Hara S., Prasad R. : "Overview of multicarrier CDMA". IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 12, pp. 126-133, (1997).
- [Nobilet, 2001] Nobilet S., Helard J.F., Mottier D. : "Spreading Sequences for Uplink and Downlink MC-CDMA Systems". European Transaction and communications, Vol. 13, no. 5, p. 123-130 (2001).
- [Kunt, 1984] Kunt M. : "Traitement numérique des signaux". traité d'électricité, vol. 20, (1984).
- [Kaiser, 1998] Kaiser S. : "Multi-carrier CDMA mobile radio systems - Analysis and optimization of detection, decoding and channel estimation". (1998).
- [Coors, 2002] Coors M., Keding H., Lüthje O., Meyr H. : "Design and DSP Implementation of Fixed-Point Systems". Eurasip Journal, vol. 9, pp. 908-925, (2002).
- [Massiani, 2004] Massiani A., Nouvel F. : "MC-CDMA system using fixed-point interference cancellation and single user detection". Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), (2004).
- [Le Moigne, 2003] Le Moigne R., Pasquier O., Calvez J. P. : "A graphical tool for system-level modeling and simulation with SystemC". Forum on Specification and Design Languages, (2003).