



Circuits numériques et synthèse logique,

un outil : VHDL

Synopsis

Jacques WEBER

Maître de conférences à l'IUT de CACHAN

Maurice MEAUDRE

Chef de travaux à l'IUT de CACHAN

Circuits numériques et synthèse logique, un outil : VHDL

La conception d'un système numérique actuel passe par sa description dans un langage abstrait, proche des langages de programmation de haut niveau.

Notre premier objectif, dans cet ouvrage, est de donner à l'étudiant cette double compétence : une bonne connaissance des opérateurs logiques élémentaires, portes et bascules, et la maîtrise d'un outil de description abstrait : le langage VHDL. Dans une deuxième étape, nous présentons les méthodes de conception des systèmes séquentiels synchrones. L'accent est mis sur les choix d'architecture, machines de Moore ou de Mealy, codages, et leur transposition dans le langage choisi.

Destiné initialement à un public d'étudiants en IUT, option électronique, le contenu de cet ouvrage est en accord avec le programme d'électronique numérique de ce type de filière (IUT ou BTS).

Une première expérience dans un langage de programmation procédural, C ou Pascal par exemple, facilitera grandement la compréhension de certaines parties.

On suppose, par ailleurs, que les étudiants suivent parallèlement, ou ont suivi, un enseignement d'électronique générale qui leur apporte une familiarité minimum avec les caractéristiques des composants actifs et passifs, et avec les lois élémentaires des circuits électriques.

L'approche VHDL est en train de se généraliser. La plupart des systèmes de conception assistée par ordinateur effectuent actuellement une migration vers ce langage, tant au niveau modélisation et simulation qu'au niveau synthèse de circuits. Notons en passant que ces systèmes ne sont pas forcément « gros », il est possible de trouver un compilateur VHDL, permettant la programmation des PLDs et des FPGAs, qui se contente d'un PC (486) sous Windows, pour moins de 2000 F.

Poussé par la forte demande de systèmes de CAO mixtes, analogiques et numériques, le langage VHDL est en cours d'extension vers le monde de l'analogique.

Mentionnons que l'obligation qui est faite aux concepteurs, qui travaillent pour la défense des Etats Unis, de spécifier leurs systèmes en VHDL, rendra ce langage aussi incontournable qu'ADA dans le domaine des applications logicielles.

Il n'existe, à notre connaissance, aucun ouvrage équivalent en Français, et certainement fort peu, s'il en existe, en Anglais à ce niveau.

Les livres d'électronique numériques actuellement disponibles restent très marqués par l'utilisation des fonctions standard, réservant au domaine des spécialistes de haut niveau la synthèse logique. Or l'avènement des circuits programmables complexes, la généralisation des logiciels d'aide à leur programmation et des logiciels de conception des circuits intégrés à grande échelle, a supprimé cette barrière qui sépare le monde des utilisateurs de circuits du monde des concepteurs de circuits.

De nombreux ouvrages de logique existent, qui traitent les aspects « circuits », citons :

TRAN TIEN Lang, *Electronique numérique*, MASSON 1995, aborde des sujets que nous passons volontairement sous silence, concernant les aspects structurels internes des circuits.

J. M. BERNARD et J. HUGON, *Pratique des circuits logiques*, EYROLLES 1987, plus ancien, mais qui est une référence dans le domaine. N'aborde ni les problèmes de synthèse, ni, à fortiori, VHDL.

Concernant la synthèse logique :

J.M. BERNARD, *Conception structurée des systèmes logiques*, EYROLLES 1987, n'aborde pas, et pour cause, VHDL, qui était en cours de conception à l'époque.

Concernant VHDL :

R. AIRIAU, J.M. BERGE, V. OLIVE et J. ROUILLARD, *VHDL du langage à la modélisation*, Presses polytechniques et universitaires romandes 1990, « la » référence en français, ouvrage de plus haut niveau, et, surtout, exclusivement orienté vers la modélisation au niveau système. La synthèse des circuits logiques n'est pas abordée.

Il existe, en langue anglaise, un grand nombre de livres qui traitent de la synthèse logique, et/ou, évidemment, de VHDL. Il s'agit, pour l'instant, essentiellement d'ouvrages très spécialisés, destinés aux concepteurs des circuits ou aux pilotes de grands projets (pour les aspects informatique), d'un abord difficile pour des étudiants de premier ou de second cycle universitaire.

L'absence de ce niveau intermédiaire, que nous proposons ici, est due à la grande jeunesse des outils logiciels abordables, tant au niveau prix qu'au niveau compétences requises.

Le contenu de cet ouvrage correspond effectivement à ce que nous avons enseigné, au cours de l'année scolaire 1994-95, au département d'électronique de l'IUT de CACHAN.

Assorti de nombreuses activités pratiques, qui ne sont pas terminées, le contenu a reçu un bon accueil de la part des étudiants. A l'heure actuelle, ceux-ci n'hésitent pas à utiliser le compilateur dont nous disposons pour réaliser une fonction logique et programmer le circuit qui réalise cette fonction. Ils ont apprécié la grande puissance du langage et des méthodes de travail qu'il induit, qui permettent en quelques heures de réaliser des applications qui auraient demandé la mise en oeuvre d'une bonne dizaine de circuits LSI traditionnels.

Citons, pour terminer, un ingénieur, chef de projet de la société Serge DASSAULT : « mes techniciens et ingénieurs ne travaillent plus qu'avec trois catégories de circuits numériques : les FPGAs pour les fonctions complexes, les PLDs pour les petites fonctions rapides et les circuits d'interface, qui sont les derniers de la famille TTL que nous utilisons encore. »

Etudiants des premiers cycles technologiques, IUT et BTS, dans les spécialités électronique, automatique et informatique industrielle.

Formations professionnalisées, comme celles dispensées par les IUP.

Etudiants d'écoles d'ingénieurs et de second cycles universitaires, dans les domaines de l'EEA et du Génie Electrique.

Etudiants en DEA d'électronique.

Auditeurs de sessions de formation dans les domaines de la CAO électronique.

Avec une approche nouvelle, le contenu du livre correspond aux méthodes de travail qui sont actuellement employées par la profession.

Nous privilégions l'acquisition de méthodes, plus que celle de connaissances ponctuelles, qui deviendraient vite obsolètes.

Première introduction à la synthèse logique et à l'utilisation de VHDL dans cet objectif

Nombre des idées exposées ont été inspirées de documents professionnels, manuels de systèmes de CAO, notices de fabricants de circuits. Notre effort a porté sur la transposition didactique, de façon à rendre accessibles les concepts employés à un public qui n'a pas le vécu des auteurs de ces notices.

Electronique international Hebdo,
Françoise GROsvALET
Immeuble EUROPARIS
75504 PARIS cedex 15

Electronique
Catherine GROSS
26, rue d'Oradour sur Glane
75504 PARIS cedex 15

L'Onde Electrique
Revue Générale de l'Electricité
48, rue de la Procession
75724 PARIS cedex 15

Electronique applications
2 rue de Bellevue
75019 PARIS

EDN

Electronic design

TEXTE DE PRÉSENTATION.

Au cours des quinze dernières années, les méthodes de conception des fonctions numériques ont subi une évolution importante. Dans les années soixante dix, la majorité des applications de la logique câblée étaient construites autour de circuits intégrés standard, souvent pris dans la famille TTL. Au début des années quatre vingt apparurent, parallèlement, les premiers circuits programmables par l'utilisateur du côté des circuits simples (PLD *pour programmable logic devices*) et les circuits intégrés spécifiques pour les fonctions complexes fabriquées en grande série (ASIC *pour application specific integrated circuits*). La complexité de ces derniers a nécessité la création d'outils logiciels de haut niveau qui sont à la description structurelle (schémas au niveau des portes élémentaires) ce que les langages évolués sont au langage machine dans le domaine de la programmation. A l'heure actuelle, l'écart de complexité entre circuits programmables et ASICs s'est restreint : on trouve une gamme continue de circuits qui vont des héritiers des premiers PALs (*programmable array logic*), équivalents de quelques centaines de portes, à des FPGAs (*Field programmable gate array*) ou des LCAs (*Logic cell array*) de quelques dizaines de milliers de portes équivalentes. Les outils d'aide à la conception se sont unifiés ; un même langage, VHDL par exemple, peut être employé quels que soient les circuits utilisés, des PALs aux ASICs.

Le remplacement, dans la plupart des applications, des fonctions standard complexes par des circuits programmables, s'accompagne d'un changement dans les méthodes de conception :

- On constate un « retour aux sources » : le concepteur d'une application élabore sa solution en descendant au niveau des bascules élémentaires, au même titre que l'architecte d'un circuit intégré.
- L'utilisation systématique d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO), sans lesquels la tâche serait irréalisable, rend caducs les fastidieux calculs de minimisation d'équations logiques. Le concepteur peut se consacrer entièrement aux choix d'architecture qui sont, eux, essentiels.
- La complexité des fonctions réalisables dans un seul circuit pose le problème du test. Les outils traditionnels de tests de cartes imprimées, du simple oscilloscope à la « planche à clous » en passant par l'analyseur d'états logiques, ne sont plus d'un grand secours, dès lors que la grande majorité des équipotentielles sont inaccessibles de l'extérieur. Là encore, la CAO joue un rôle essentiel. Encore faut-il que les solutions choisies soient analysables de façon sûre.

- Les langages de haut niveau, comme VHDL, privilégient une approche globale des solutions. Dès lors que l'architecture générale d'une application est arrêtée, que les algorithmes qui décrivent le fonctionnement de chaque partie sont élaborés, le reste du travail de synthèse est extrêmement simple et rapide.

Circuits numériques et synthèse logique, un outil : VHDL est l'un des résultats de la réflexion faite à l'IUT de CACHAN sur l'évolution du contenu de l'enseignement de l'électronique numérique, pour proposer aux étudiants une formation en accord avec les méthodes de conceptions actuelles.

La gageure était d'éviter le piège du « cours VHDL », impensable à ce niveau de formation, compte tenu du volume horaire imparti (une centaine d'heures, travaux d'applications compris). Nous avons décidé de nous restreindre à un sous-ensemble cohérent de VHDL, qui soit strictement synthétisable. Ce choix étant fait, nous avons mené en synergie l'apprentissage des bases de la logique et celui des concepts des langages de description de haut niveau. Chaque élément nouveau, vu sous son aspect circuit, est immédiatement transcrit en VHDL, ce qui précise sa fonction, et permet à l'étudiant de se familiariser progressivement avec la syntaxe du langage.

L'objectif étant la maîtrise du processus de synthèse, jusqu'à la réalisation, nous avons utilisé un compilateur VHDL qui permet très simplement de générer les fichiers JEDEC utilisés pour la programmation des circuits. Expérimentée pour la première fois au cours de l'année scolaire 1994-95, cette approche un peu différente de l'électronique numérique semble avoir rencontré un accueil favorable de la part des étudiants. La création de machines d'états adaptées à un problème donné, ne semble plus constituer un obstacle pour eux.

Le livre est subdivisé en cinq chapitres et une annexe :

- I. *Une introduction générale au monde du numérique.* On y définit les notions de base telles que la représentation des nombres, les conventions logiques etc.
- II. *Un panorama des caractéristiques électriques, statiques et dynamiques, des circuits numériques et leur emploi pour déterminer les limites de fonctionnement d'une application.* Ce chapitre n'est pas forcément traité de façon chronologique linéaire ; certaines parties ne prennent sens qu'au vu des applications de la logique séquentielle (calcul d'une fréquence maximum de fonctionnement, par exemple).

- III. *La définition des opérateurs élémentaires, combinatoires et séquentiels.* Le principe adopté est de ne pas attendre d'avoir vu toute la logique combinatoire pour aborder la logique séquentielle. Les bascules (synchrones principalement) doivent devenir des objets aussi familiers qu'une porte ET. C'est à l'occasion de la découverte des opérateurs élémentaires que les premiers rudiments du langage VHDL apparaissent. Les difficultés de ce langage (dont la principale concerne le passage combinatoire→séquentiel asynchrone→séquentiel synchrone) sont abordées sur des objets très simples, elles sont donc faciles à expliciter. Une fois ces difficultés surmontées, la puissance du langage récompense très largement l'utilisateur de son effort intellectuel.
- IV. *Les architectures des principales familles de circuits, fonctions standard et circuits programmables.* L'étude de cette partie ne peut se faire qu'en illustrant le cours de nombreuses analyses de notices techniques.
- V. *Les méthodes de synthèse qui sont l'aboutissement de cet enseignement.* On y fait connaissance avec les machines d'états, les architectures de Moore et de Mealy, leur transcription en VHDL. Les méthodes de simplification sont vues très rapidement, essentiellement pour comprendre ce que fait un optimiseur, de façon à apprendre à le piloter.
- VI. *Une annexe qui résume et explicite les principales constructions qu'autorise le langage VHDL.* Sont exclues, volontairement, toutes les constructions non synthétisables, qui servent exclusivement à la modélisation et à la simulation.

De nombreux exemples illustrent les principes abordés, et des exercices permettent au lecteur d'asseoir sa compréhension.

La connaissance d'un langage de programmation procédural, comme C ou Pascal, n'est pas indispensable, mais elle facilite la compréhension de certains passages. Quelques notions sur les composants, transistors et capacités, et sur les lois élémentaires des circuits électriques sont souhaitables. On notera cependant que les aspects structurels internes des circuits ne sont pas abordés, sauf quand ils sont incontournables (sorties non standard).