

1. Introduction

La tâche de conception de fonctions électroniques sur circuit intégré ne peut être aujourd’hui menée à bien sans besoin des outils informatiques, véritables plate-formes logicielles d’aide à la conception. La complexité croissante des circuits intégrés nécessite une amélioration constante des méthodes et outils de conception, afin de réduire au maximum le temps de développement, tout en assurant la fiabilité des circuits fabriqués.

Nous abordons dans ce chapitre l’aspect fondamental de la conception des systèmes analogiques et mixtes ainsi que les méthodes différentes de la modélisation hiérarchique.

2. Notions fondamentales sur la conception des systèmes

Du fait de la complexité et de l’hétérogénéité des systèmes électroniques, les concepteurs doivent gérer des projets associant plusieurs disciplines et plusieurs technologies. Ce problème pluridisciplinaire ainsi que le besoin d’optimiser le processus de conception pour réduire le temps de la mise sur le marché, nécessite de mettre en place des méthodes et des outils facilitant la création des circuits (analogiques, numériques et mixtes). En outre, les concepteurs doivent gérer la coordination de tous les aspects mis en jeu dans une conception, comme : les spécifications et les performances, les modèles, les règles de conception, les technologies, les objectifs et les contraintes, les méthodes de conception, les langages de programmation, l’automatisation, la fabrication,...etc.

2.1 Description de la conception hiérarchique

Récemment, en raison de l’hétérogénéité et de la grande complexité des systèmes intégrés sur une puce, la hiérarchisation de la conception s’avère nécessaire. Autrement dit, le concepteur commence par concevoir et valider un système à l’aide de blocs fonctionnels, puis il descend progressivement dans le détail des blocs, jusqu’à la conception de circuits élémentaires au niveau transistor ou portes logiques.

Lors de la conception d'un système, le problème initial étant la traduction du cahier des charges en un circuit intégré fonctionnel. Cette approche revient à décomposer le problème en des sous-problèmes et donnant lieu à plusieurs niveaux hiérarchiques. On distingue deux modes de conception d'un système correspondant aux deux sens de parcours de l'hiérarchie : *la conception en mode descendant (Top-Down)* et *la conception en mode ascendant (Bottom-Up)*. Chaque niveau hiérarchique est caractérisé par un ensemble d'entités permettant de décrire la topologie du système.

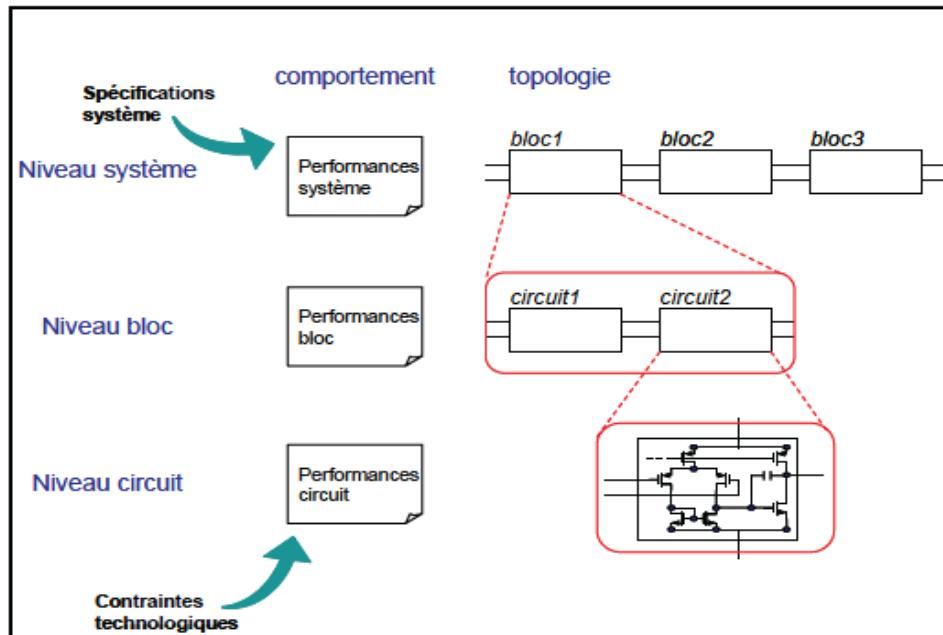


Figure I.1 : Description de la conception hiérarchique.

La figure I.1 présente une description générale de la conception hiérarchique en mode descendant. Dans ce cas, le système est décomposé en trois niveaux hiérarchiques :

- **Niveau système** : la topologie du système est décrite au moyen de blocs fonctionnels.
- **Niveau bloc** : les primitives de chaque bloc sont des circuits.
- **Niveau circuit** : les primitives à ce niveau sont des composants électroniques de base (transistors, diodes, résistances,...).

La conception hiérarchique est contrainte au plus haut niveau par les *spécifications système* ainsi qu'au plus bas niveau par les *contraintes technologiques*. Les spécifications système sont les données du client fixant les performances du système, tandis que les contraintes technologiques imposent les marges de conception.

2.2 La spécification

La spécification représente la première étape de développement d'un système (cahier des charges). Elle consiste d'une part à prendre en considération les exigences fonctionnelles et les contraintes de réalisation, et d'autre part, elle précise le schéma directeur qui sera choisi pour réaliser le système. Par conséquence, le fait de spécifier un système consiste à répondre à la question « que doit faire ce système ? ».

2.3 Flot de conception

La succession des décisions permettant de passer d'un niveau hiérarchique à un niveau adjacent est appelée *flot de conception*. Le parcours Top-Down du flot de conception consiste à propager et distribuer les spécifications système vers les niveaux inférieurs, jusqu'au schéma transistor de chaque circuit. Le parcours Bottom-Up consiste à vérifier que l'implémentation électrique permet bien de réaliser un système conforme aux spécifications initiales.

2.4 Modèle et modélisation

- Le modèle consiste essentiellement à développer une représentation abstraite d'une réalité physique. Le modèle dépend du point de vue selon lequel on observe le système, mais aussi suivant l'utilisation que l'on souhaite faire de ce modèle au sein du processus de conception.
- La modélisation représente la tâche centrale de la conception. Elle consiste à trouver une loi mathématique représentative du comportement d'un système et la vérification de la vraisemblance de cette loi se fait par comparaison avec des données de référence provenant des mesures avant tous et parfois des simulations réalisées à partir des modèles déjà validés.
- Les principaux critères de qualité d'un modèle sont la précision et la rapidité d'exécution. La précision d'un modèle dépend de sa capacité à couvrir un grand nombre de contextes d'utilisation ; plus le modèle est précis, plus le nombre d'équations et de paramètres est important. Tandis que la rapidité d'exécution dépend de la méthode d'implémentation des équations, de l'outil de simulation et aussi de la précision du modèle.

2.5 Niveaux d'abstraction

Dans le cas de la conception des systèmes analogiques, un *modèle comportemental* représente tout modèle décrivant le comportement électrique du circuit autrement que la description structurelle au niveau transistor. Lors de la conception, les modèles sont considérés à des niveaux d'abstraction différents. On distingue souvent trois niveaux d'abstraction :

- **Niveau fonctionnel** : définition des relations entrée/sortie et de la représentation de la fonction idéale.
- **Niveau comportemental** : description des caractéristiques de la réalisation physique ainsi que ses non-idéalités.
- **Niveau circuit** : description avec les primitives de plus bas niveau (transistors).

L'intérêt de ces différents niveaux d'abstraction est qu'ils peuvent être utiles à différents niveaux hiérarchiques du flot de conception donnant le meilleur compromis rapidité/précision.

2.6 Technique de modélisation

La tâche consistant à implémenter un modèle dans un style de langage donné s'appelle *technique de modélisation*. Cette dernière dépend fortement du type de comportement observé (continu, discret, logique), ainsi que du niveau hiérarchique auquel on se place pour étudier un système.

En analogique, La validation d'un système électronique est essentiellement basée sur des logiciels de simulation électriques (le logiciel *SPICE* est le plus connu). Ceux-ci font appel à des modèles de différents composants utilisés (transistors, diodes, résistances, capacités,...), qui en décrivent le *comportement*, c'est à dire les relations entre les signaux présents sur les points d'entrée/sortie (E/S). Ces modèles décrivent les relations macroscopiques entre tensions et courants de diverses bornes, sous forme d'équations différentielles. Il s'agit donc d'une représentation mathématique de phénomènes physiques auxquels obéissent les composants.

L'apparition des langages de description matérielle a permis de modéliser les circuits directement en implantant des *équations différentielles algébriques* (adaptées aux comportements analogiques continus dans le temps) ou des *algorithmes dirigés par événements* (adaptés aux comportements des circuits à temps discret). Enfin, on trouve

également une technique de modélisation ne passant pas par la recherche d'équations comportementales mais qui consiste à modéliser sous la forme de tableaux. On décrit alors les relations entrées/sorties numériquement, pour des valeurs bien précises des entrées et avec un degré de paramétrage variable.

3. Méthodologies de modélisation

La modélisation comportementale signifie le processus partant de l'analyse du comportement d'un circuit et aboutissant à un système d'équations ou un algorithme descriptif. Ce processus diffère selon les phases de la conception d'un système : en phase descendante on parle de *raffinement* des modèles, dans le sens où ils vont vers des niveaux de précision croissants (grand nombre de variables d'état et de performances modélisées), en phase montante on parle à l'inverse de *simplification* de modèles.

3.1 Modélisation en phase Bottom-Up (ascendante)

Dans la phase de conception ascendante (Bottom-Up), le point de départ est un circuit dimensionné ayant un objectif précis. Il s'agit d'en extraire un modèle comportemental, nécessairement plus abstrait que la description au niveau transistor, mais capable de propager les performances du circuit réalisé vers les haut niveaux hiérarchiques. Dans ce cas deux types de modèles sont possibles : *modèle basé sur la connaissance* et *modèle basé sur l'identification*.

a. Modèle basé sur la connaissance: cette approche est basée sur la connaissance de la structure interne du circuit (topologie) et de lois électriques simples (lois de Kirchoff, modèles du premier ordre des transistors : Ebers-Moll ou MOS niveau 1) et Il s'agit d'effectuer un calcul symbolique et d'exprimer les performances du circuit à partir des paramètres clés de ses composants. On aboutit à un système d'équations qui pourra éventuellement être simplifié. Le principal avantage est que le modèle ainsi développé garde un sens physique et peut même être prédictif, si le domaine de validité du système est clairement connu.

Les inconvénients de cette approche sont que l'obtention du système d'équations est une tâche qui devient rapidement complexe avec l'augmentation de la taille du circuit et qu'elle est plus facilement applicable aux circuits linéaires.

b. Modèle basé sur l'identification : Il s'appuie sur l'acquisition des caractéristiques externes du circuit, sans tenir compte de sa structure interne. Les données de caractérisation se présentent donc sous forme tabulaire et il s'agit de trouver une expression mathématique reproduisant le bon comportement, par une méthode d'interpolation.

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle présente un grand potentiel d'automatisation. Tandis que, l'inconvénient major de ce modèle est que ses paramètres perdent leur sens physique autrement que la méthode symbolique précédente basée sur la connaissance.

3.2 Modélisation en phase Top-Down (descendante)

Dans cette phase de conception, le schéma électrique étant inconnu et le point de départ est une liste de spécifications. L'objectif est alors de construire un modèle décrivant la fonction du bloc considéré ajustable par des paramètres de performances.

Le modèle en phase descendante est souvent utilisé en amont de la tâche de conception pour poser les bases de l'architecture du système et la valider par une première série de simulations. Par conséquence, les spécifications du système sont distribuées sur chaque bloc. Les modèles extraits en phase Top-Down sont des modèles *fonctionnels* caractérisés par une précision moindre que celle des modèles *comportementaux* extraits en phase Bottom-Up. Tandis que la rapidité est prédominante dans cette phase.

4. Simulation des systèmes mixtes (analogique-digitale)

La simulation mixte permet d'étudier le comportement temporel de systèmes complexes en un temps extrêmement réduit par rapport à une simulation uniquement électrique. Ce type de simulation est en effet basé sur l'abstraction de la partie digitale à un niveau fonctionnel logique. Pour cette partie, les grandeurs étudiées ne sont donc plus électriques mais numériques et sont caractérisées par leurs changements d'état. Des algorithmes *dirigés par évènements (event-driven)* permettent d'étudier de manière très efficace l'évolution des signaux digitaux. Une simulation mixte peut être décomposée en trois différentes phases:

4.1 Phase d'élaboration

Elle correspond à la décomposition du circuit mixte en blocs distincts analogiques et digitaux, chaque partie étant traitée par les algorithmes concernés. Aux interfaces entre les deux parties, doivent être placés des modèles plus ou moins élaborés de *convertisseurs A/D* et

D/A, qui assurent la correspondance des données entre les algorithmes analogiques et numériques.

4.2 Phase d'initialisation

Il s'agit de déterminer le point de fonctionnement du système, c'est à dire l'état initial de toutes les grandeurs mises en jeu (tensions, courants, états logiques). Cette recherche est indispensable au simulateur analogique et correspond à une analyse DC. Pour la partie digitale, cette notion dépend du simulateur: cela peut correspondre soit à une initialisation (solution au temps 0), soit à une certaine durée, appelée temps de *setup*, au bout de laquelle un état stable est trouvé.

4.3 Phase de simulation

Elle doit résoudre les problèmes de *synchronisation* des algorithmes électriques et numériques, qui ont des gestions différentes du pas de temps.

5. Conclusion :

Ce chapitre a fait en revue une description générale et fondamentale des méthodologies de modélisation et de conception des circuits analogiques et mixtes ainsi que toutes les phases de la simulation analogique-dégitale.