

Apprentissage par problèmes pour l'enseignement de la simulation mixte (VHDL-AMS)

Auteurs : Gilles Amendola (g.amendola@esiee.fr), Anne Exertier (a.exertier@esiee.fr),
ESIEE Engineering, CEMIP.

Contexte

En dernière année de formation ingénieur, les étudiants d'ESIEE Engineering suivent une unité sur la conception de systèmes mixtes (analogiques / numériques). Une partie de cette unité est consacrée à la modélisation haut niveau et à la validation « bottom-up » en utilisant le langage VHDL-AMS. Cet enseignement était auparavant dispensé sous une forme pédagogique classique : cours/TD/TP. Bien qu'intéressés par le thème, les étudiants étaient peu réceptifs au cours magistral qui présentait la problématique et le langage au travers d'exemples et d'exercices concrets. En réponse à ce constat, nous avons opté pour une pédagogie active : l'apprentissage par problèmes (APP).

Déroulement

Un « apprentissage par problèmes » (APP) consiste à poser un problème ouvert (qui ne comporte pas toujours de solution unique) à des équipes de 3 ou 4 d'étudiants qui n'ont pas suivi de cours sur le sujet étudié. Le processus consiste en :

- Analyse du problème
- Remise à jour des connaissances antérieures
- Apprentissage autonome du contexte
- Travail collaboratif pour résoudre le problème et stimulation par le(s) encadrant(s).

Il est donc nécessaire de fournir un sujet comportant des indications méthodologiques et dans notre cas des tutoriels.

Cette unité s'adresse à des étudiants qui ont déjà été initiés à la conception de circuits intégrés analogiques (architectures basses fréquences, simulation Spectre, ...) et numériques (VHDL, simulation avec ModelSim ...). On consolide ces compétences pour aborder la simulation mixte. En effet, au travers d'une première série de problèmes, les étudiants analysent les différences entre simulateurs électrique et logico-temporel pour comprendre la difficulté des interactions temps continu et temps discret.

Exemple de question posée sur le simulateur électrique

Réflexion sur le pas de calcul

L'analyse transitoire (dite "TRAN") permet d'obtenir un résultat en fonction de :

- la fréquence,
- du temps,
- d'une autre tension, ...

Analysez les netlist(s) ci-après et déterminez le schéma électrique associé.

Analysez les réponses du simulateur dans les deux cas :

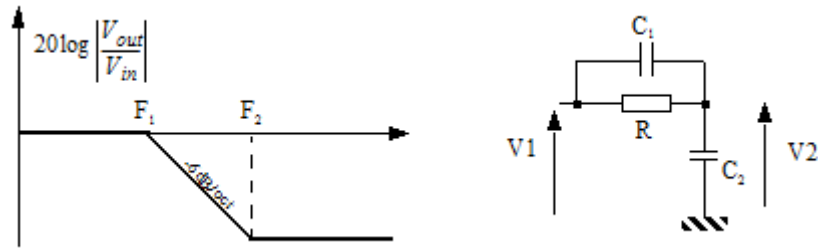


Figure 1

L'objectif est de vérifier l'acquisition des notions de terminal et quantité, la création de programme de test et surtout la compréhension du critère de solvabilité. Au passage les étudiants approchent deux types de modèle dont l'usage sera différent. L'un est basé sur une traduction de la représentation mathématique du filtre et les paramètres en sont les « fréquences de coupure » (pôles, zéros). L'autre décrit le circuit électrique et aura pour paramètres les valeurs des condensateurs C_1 , C_2 et de la résistance R .

Ils analysent ensuite des modèles erronés qui comprennent des erreurs de langage classiques en particulier liées aux interactions entre les temps discret et continu. Ils doivent identifier la cause du problème, et proposer une solution argumentée.

Par exemple, on leur fournit une modélisation incorrecte d'un interrupteur :

```

library ieee;
use ieee.electrical_systems.all;
use ieee.std_logic_1164.all;
entity ideal_switch is
  port (
    terminal n1,n2 : electrical;
    signal cmd : in std_logic );
end entity;

architecture bad of ideal_switch is
  quantity v12 across i12 through n1
  to n2;
begin
  if cmd ='1' use v12 == 0.0;
  else i12 == 0.0;
  end use;
end architecture;

```

Le signal de commande de l'interrupteur est numérique (évolution événementielle). Comme il influe sur des quantités analogiques, il est impératif de signaler au simulateur la discontinuité via l'instruction : `break on cmd;`. Cette omission assez courante chez les débutants conduit aux résultats de simulation temporelle suivants :

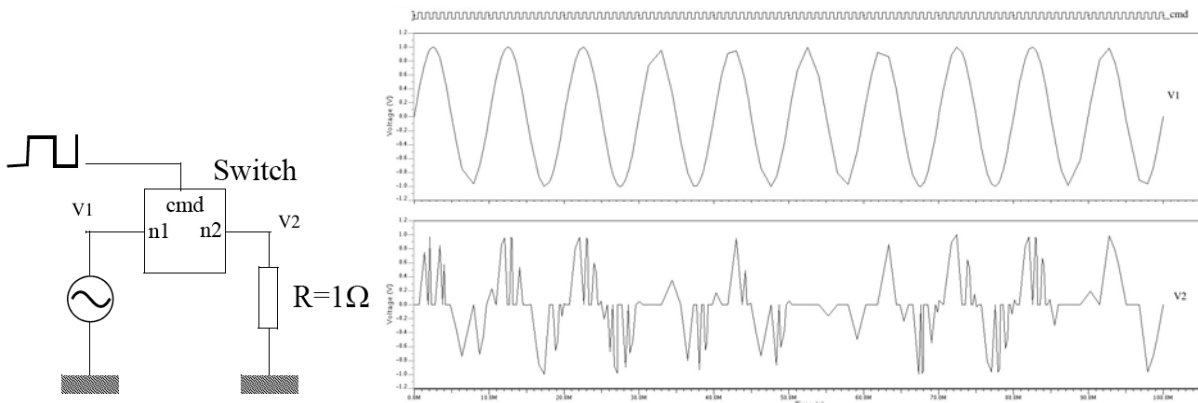


Figure 2

Après avoir diagnostiqué le problème, les étudiants ajoutent l'instruction manquante et obtiennent les résultats attendus :

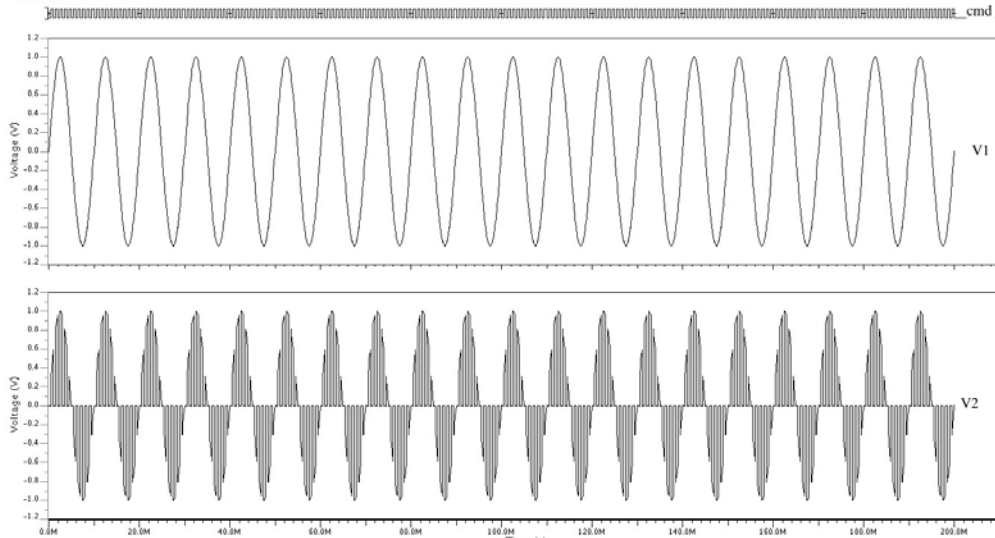


Figure 3

Il leur est ensuite demandé de simuler les versions correcte et erronée de l'interrupteur avec le même programme de test (même signal de commande). Les étudiants doivent expliquer pourquoi les résultats de simulation sont alors cohérents pour les 2 interrupteurs, ce qui permet de vérifier que le concept est compris.

Enfin un problème est articulé autour de la modélisation d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) algorithmique à recirculation sur 8 bits : application mixte par excellence. Quatre niveaux de modélisation sont abordés :

- CAN0 : modèle VHDL-AMS d'un CAN générique
- CAN1 : modèle VHDL-AMS d'un CAN à recirculation
- CAN2 : modèle VHDL-AMS d'un CAN à recirculation avec partitionnement analogique/ numérique (VHDL classique)
- CAN3 : partie analogique niveau transistor et partie numérique en VHDL (Cf. figure 4)

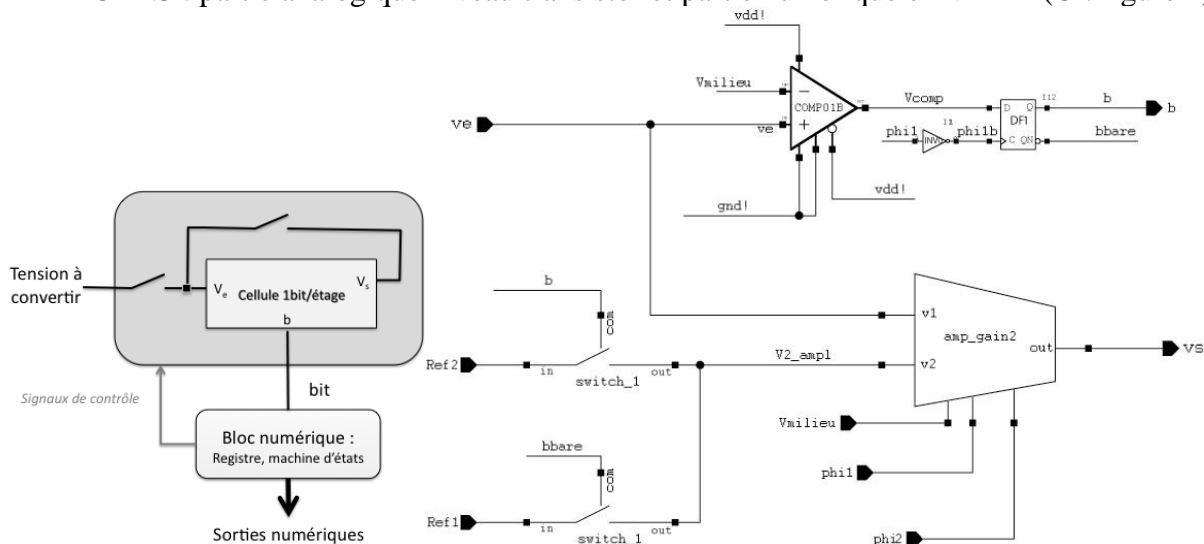


Figure 4

La partie numérique a pour rôle de fournir les sorties numériques en parallèle (via un registre série-parallèle) et de piloter l'acquisition des données. La cellule 1bit/étape comprend un comparateur (qui détermine la valeur d'un bit b_i), un amplificateur de gain 2 à base de capacités commutées d'un latch sur b .

Dans le schéma de la cellule 1 bit/étage, $V_{ref1}=1/4V_{dd}$ et $V_{ref2}= 3/4V_{dd}$ le signal d'entrée V_e est comparé à $V_{dd}/2$ ce qui détermine la valeur du bit b . D'autre part, on calcule une tension V_s de la manière suivante :

$$V_s = 2 \times \left(V_e - \frac{3}{4} V_{dd} \right) \text{ si } b='1' \text{ ou } V_s = 2 \times \left(V_e - \frac{V_{dd}}{4} \right) \text{ si } b='0'$$

Cette tension V_s est ensuite réinjectée sur l'entrée et sert à calculer le bit suivant.

Les étudiants comparent les durées (temps CPU) des simulations et la précision des résultats en fonction du niveau d'abstraction.

CAN0	CAN1	CAN2	CAN3
80 ms	90 ms	1s 360 ms	1 min 33s 950 ms

Un modèle avec un haut niveau d'abstraction est rapide à simuler, il a pour objectif de vérifier le fonctionnement général du circuit. Plus on affine le modèle (en y introduisant des défauts de composants comme l'offset d'un amplificateur par exemple), plus le temps de simulation augmente mais les résultats sont également plus pertinents.

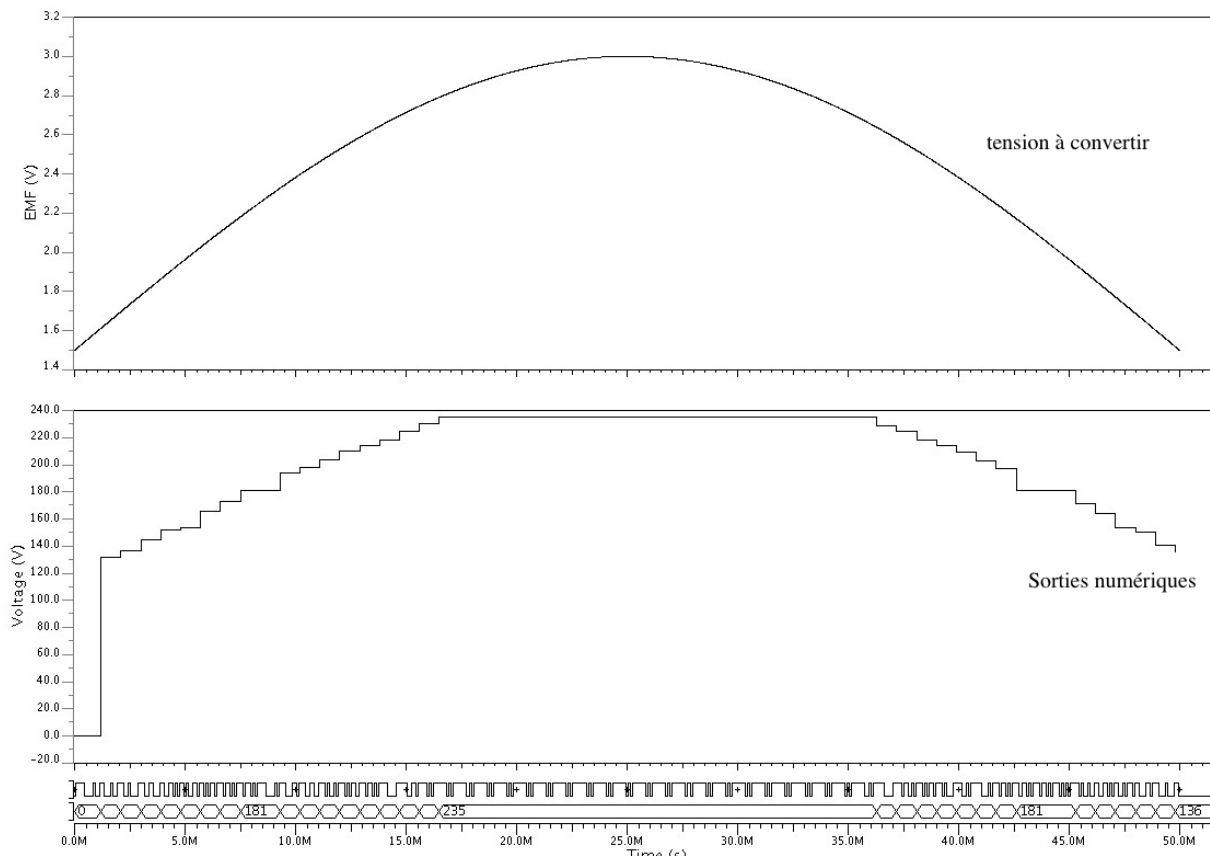


Figure 5

La figure 5 correspond à la simulation temporelle de CAN3 (description la plus proche de la réalité). Elle met en évidence des erreurs des non-linéarités intégrale et différentielle du convertisseur. Ces défauts proviennent des imperfections apportées par la description à base de transistors. : saturation des amplificateurs, offset, erreur de gain, injection de charges.

L'objectif ici est d'illustrer le compromis précision / rapidité et les principes de la conception top-down

Conclusion et retour d'expérience

L'enseignement d'un langage dans un cours risque de tourner à une description catalogue d'autant plus inefficace que les étudiants en dernière année sont exigeants. Les questions, posées lors de l'évaluation de l'enseignement, les plus en rapport avec notre propos sont les suivantes :

1) Auriez vous préféré un cours magistral ?

Oui = 60% non = 40%

2) Par rapport aux enseignements classiques vous considérez vous ?

plus actifs = 70% autant actif = 30%

Elles permettent de juger de la perception par les étudiants de cette pratique. Les questions sont toutefois sujettes à interprétations. Ainsi certains (ayant répondu non à la première question) ajoutent en commentaire qu'ils auraient souhaité un cours d'une heure pour « fixer » le cadre ou faire une synthèse... Dans la réponse à la seconde question nous retenons surtout qu'aucun n'a le sentiment d'avoir été moins actif (ce qui poserait alors un problème). Nous devons toutefois nous interroger sur le fait de savoir si cette perception est juste ou non. Pour cela nous devons compléter ces premières questions par d'autres, permettent de préciser les choses.

Notre perception en tant qu'enseignant est que la mise en situation dans une approche de type APP permet de les rendre plus actifs, et de leur permettre une mise en application quasi immédiate des concepts décrits dans les tutoriels. Elle oblige l'enseignement à construire ces tutoriels et problèmes autour des points clés à assimiler. D'autre part, l'interaction enseignant-apprenant permet de percevoir très vite les incompréhensions, de corriger les erreurs et de relancer les équipes ou étudiants en difficulté.