

VAL-AMS

High-Confidence **Validation** of **Analog** and **Mixed Signal** Circuits

ANR SETIN 2007

Antoine Girard

`Antoine.Girard@imag.fr`



Grand Colloque STIC, Paris, 5-7 novembre 2007



Participants au projet VAL-AMS

- Coordinatrice du projet : **Thao Dang**
- 3 partenaires Grenoblois :

VERIMAG	Labo Jean Kuntzmann	INRIA – Bipop
Thao Dang Goran Frehse Oded Maler Tarik Nahhal	Antoine Girard Gang Zheng	Vincent Acary Olivier Bonnefon Bernard Brogliato Pascal Denoyelle

Responsables locaux / Post-doc VAL-AMS

- VAL-AMS sur le web :

<http://www-verimag.imag.fr/~tdang/VAL-AMS/>

Contexte Scientifique

- Constat : **technologie embarquée omniprésente**
 - applications critiques (avionique, sécurité nucléaire)
 - applications quotidiennes (téléphones portables, baladeurs MP3)



- Couplage **analogique/numérique** dans les systèmes sur puce (SoC)
 - traitement du signal
 - régulation de grandeurs physiques
- Le bon fonctionnement de ces systèmes est critique
 - sécurité (vies humaines en jeux)
 - coût (rappel de produits, réputation de la marque)

Contexte Scientifique

- **Conception et validation des circuits numériques :**
 - Modélisation fidèle au niveau logique
 - Méthodes efficaces de simulation, test et vérification formelle
 - Nombre d'outils de CAO performants pour la validation
- **Conception et validation des circuits analogiques et mixtes :**
 - Modélisation par équations différentielles algébriques ou systèmes hybrides
 - Simulation coûteuse : équations différentielles raides
Exemple: simulateur SPICE
 - Peu de méthodes automatiques pour la validation

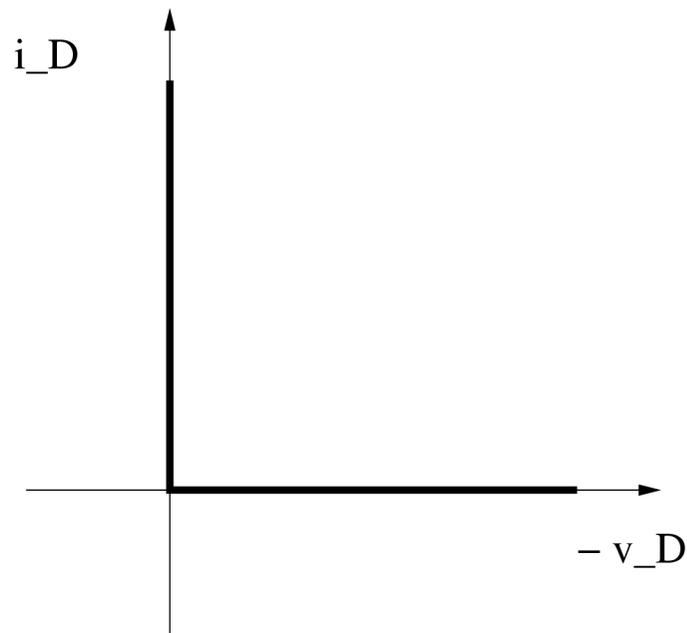
Objectifs du Projet VAL-AMS

- Contribuer à l'automatisation de la conception des circuits analogiques et mixtes
- Techniques d'**analyse basées sur la simulation et garantissant un certain niveau de confiance** dans les résultats
- Trois axes principaux :
 1. Simulation numérique fiable et efficace des circuits
 2. Méthodes de test basées sur des modèles
 3. Méthodes formelles basées sur la construction de modèles symboliques

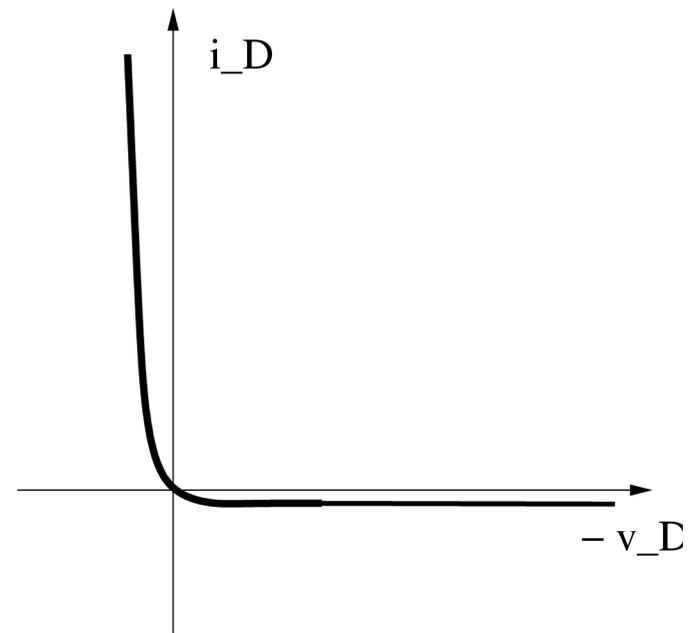
Axe 1 : Simulation numérique
fiable et efficace des circuits

Dynamiques Régulière et Non-régulière

- Une question de modèles : exemple de la diode



Caractéristique de diode idéale :
un modèle **non-régulier**



Caractéristique SPICE de diode :
un modèle **régulier**

Dynamiques Régulière et Non-régulière

comment un système est décrit...

Dynamique régulière :

- DAE non-linéaire

$$\begin{cases} f(\dot{x}(t), x(t), t) = 0, \\ x(0) = x_0 \in R^n \end{cases}$$

- f est non-linéaire
- Paraît a priori plus simple

Dynamique non-régulière :

- DAE linéaire

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B\lambda(t) + Tu(t) + b, \\ y(t) = Cx(t) + D\lambda(t) + Fu(t) + e, \\ x(0) = x_0 \in R^n \end{cases}$$

- + relation de complémentarité

$$\begin{aligned} 0 \leq y(t) \perp \lambda(t) \geq 0 \\ (\forall i, y_i \geq 0, \lambda_i \geq 0, y_i \lambda_i = 0) \\ y(t), \lambda(t) \in R^p \end{aligned}$$

Dynamiques Régulière et Non-régulière *et leur simulation numérique*

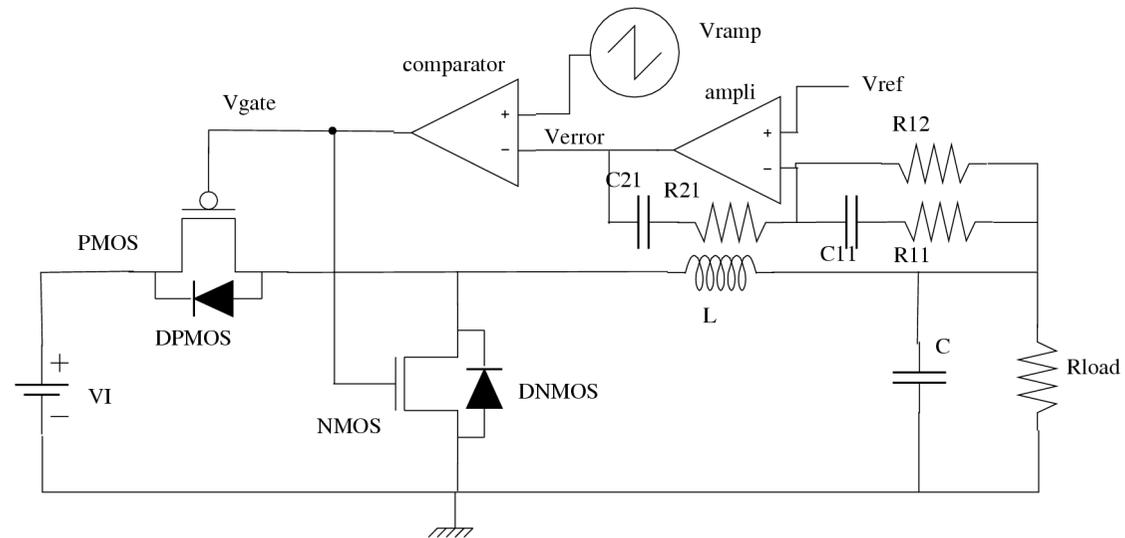
Dynamique régulière :

- Représentation uniquement par des fonctions univaluées
- DAE résolue par schémas implicites (algorithme de Newton-Raphson)
- OK si fonctions lisses et peu raides, sinon : **problèmes de convergence**

Dynamique non-régulière :

- Deux types de représentations disponibles :
 - **Caractéristiques fortement non-linéaires approximées par des segments de lignes** (y compris verticales)
 - Caractéristiques faiblement non-linéaires modélisées habituellement (fonctions régulières)
- Résolu par solveur de LCP/NCP (Linear/Nonlinear Complementary Problem)
- **Résultats plus robustes**

Benchmark : Convertisseur DC-DC

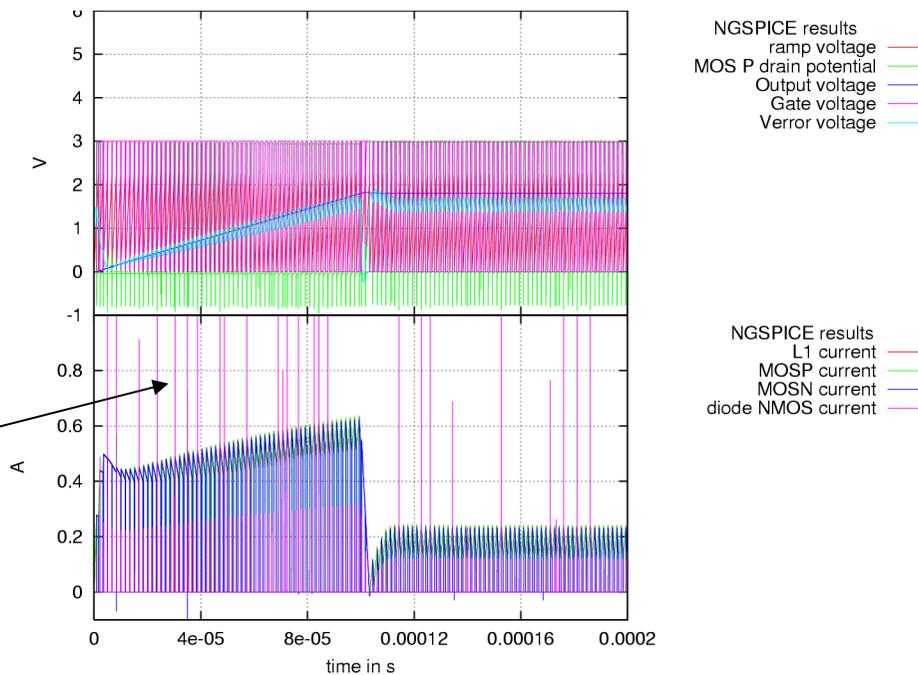


Éléments avec des caractéristiques fortement non-linéaires :

- Comparateur
- Diodes intrinsèques des MOS : loi de Shockley

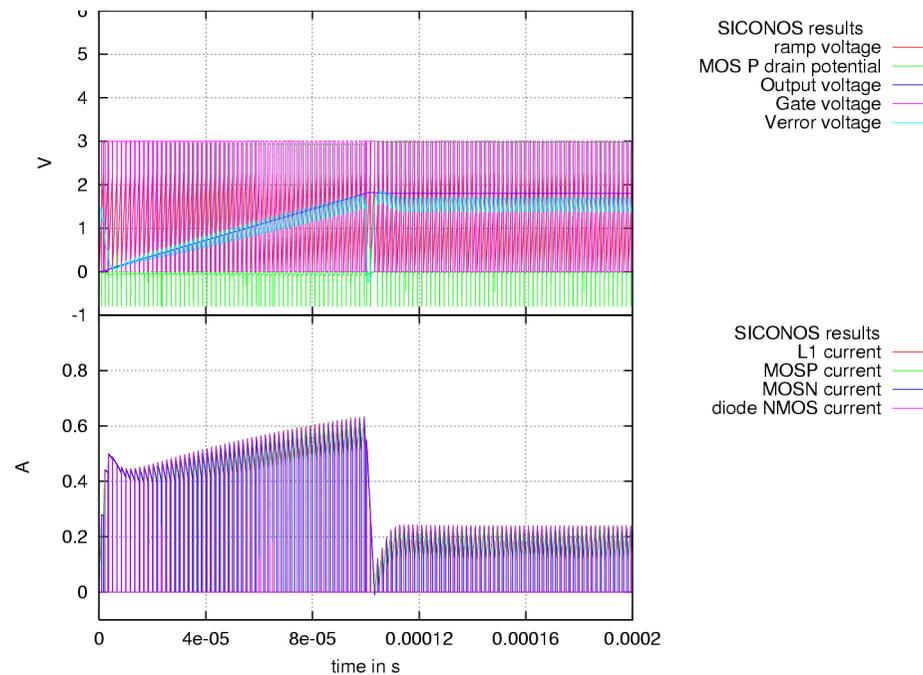
Résultats de NGSPICE

Erreurs de simulation



- Pas de convergence avec $RELTOL < 0.04$ (valeur par défaut = 0.001)
- Convergence vers une solution fautive avec $RELTOL = 0.04$ (CPU : 209 s)

Résultats du Logiciel INRIA Siconos



- Pas de problèmes de convergence (CPU : 12 s)

Axe 2 : Méthodes de test basées sur des modèles

Test Basé sur des Modèles

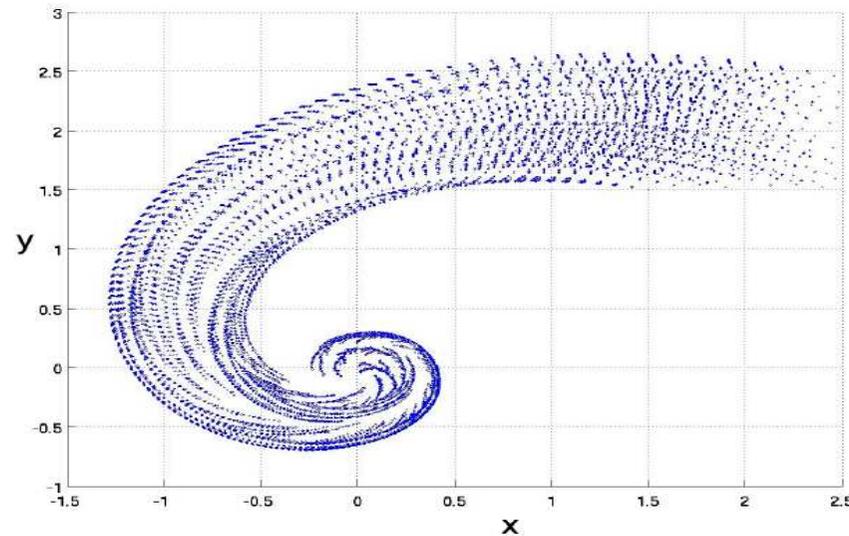
- **Avantages :**
 - Technique très utilisée en industrie.
 - Peut traiter des systèmes de grandes tailles
 - Applicable aux modèles et aussi aux implantations
- **Inconvénient :**
 - Ne permet pas de prouver la correction.
- **Résultats :**
 - Définition d'un cadre pour le test de conformité de systèmes hybrides suivant le standard FMCT (Formal Methods in Conformance Testing)
 - Nouvelle **mesure de couverture de test**
 - Algorithme de **génération de tests guidée par la mesure de couverture**
 - HTG, outil de génération de tests
 - Application à plusieurs circuits benchmark

Couverture de Test

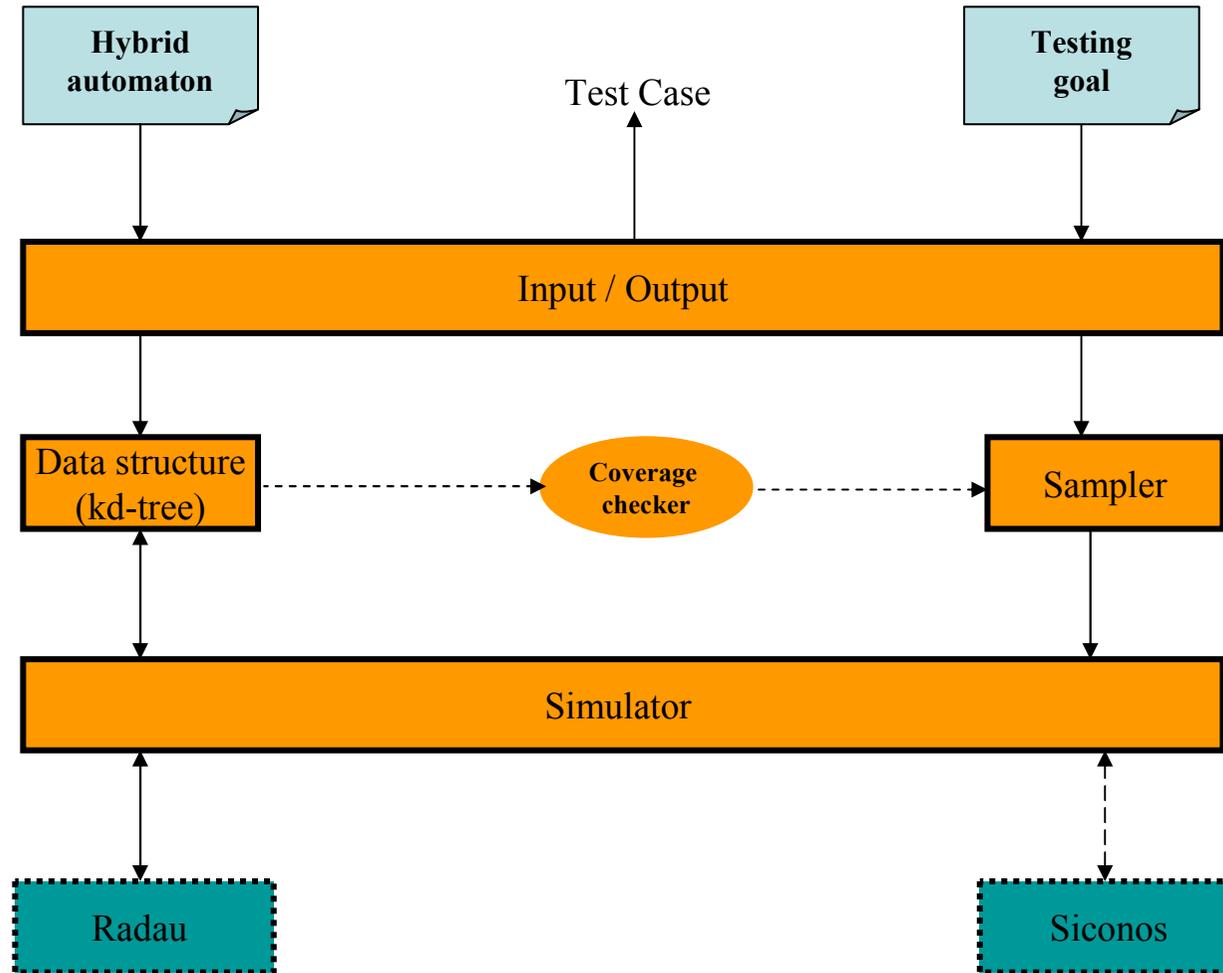
- Basée sur la notion « star discrepancy » de la théorie des équidistribution en statistique. [Nahal, Dang; CAV 2007]
- Caractérise si les états visités représente bien l'ensemble d'états atteignables
- Plus sémantique que les notions classiques dans la vérification de programmes, telle que la couverture de lignes de code
- Peut être évaluée efficacement

Génération des Tests

- Génération aléatoire, inspirée par la technique **RRT** de planification de trajectoires en robotique. [Nahal, Dang; HSCC 2007]
- **Guidée par la couverture de test**
- Complétude probabiliste / bon résultats en pratique
- Passage à l'échelle (une centaine de variables)



Hybrid Test Generator : HTG



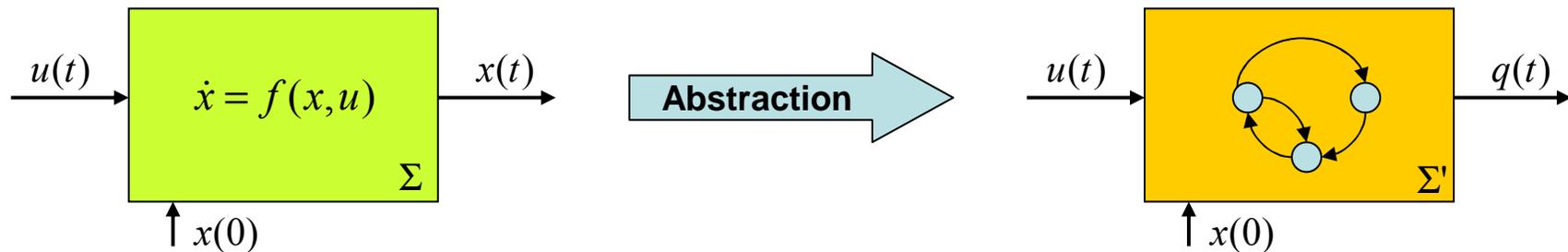
Application à des Circuits Benchmark

- Plusieurs circuits analogique et mixtes :
 - Plusieurs types de dynamique
 - Systèmes de tailles différentes

Circuit	Type	Dynamique	Dimension
Tunnel diode	Analogique	ODE non-linéaires	2
Amplifier transistor	Analogique	DAE non-linéaires	8
Voltage controlled oscillator	Analogique	DAE non-linéaires	55
Delta sigma	Mixte	Système hybride	3

Axe 3 : Méthodes formelles basées sur
la construction de modèles symboliques

Modèles Symboliques de Systèmes Dynamiques



- Propriété du modèle symbolique :

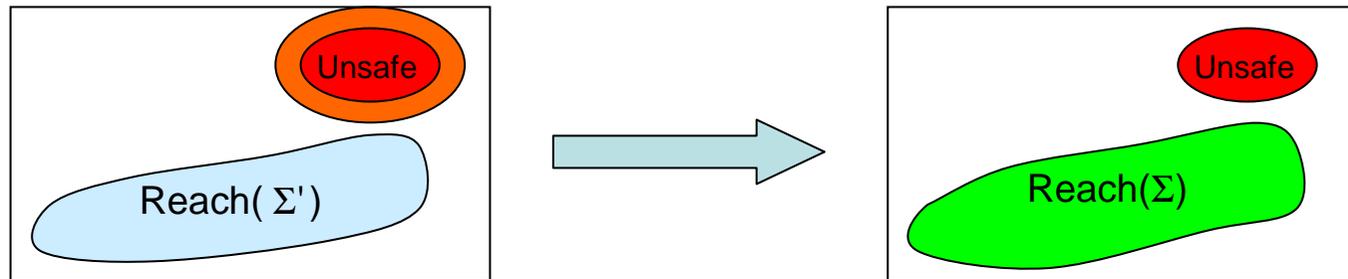
$$\forall u(.), x(0), \forall t \geq 0, \|x(t) - q(t)\| \leq \delta$$

où δ est un paramètre de précision que l'on sait déterminer.

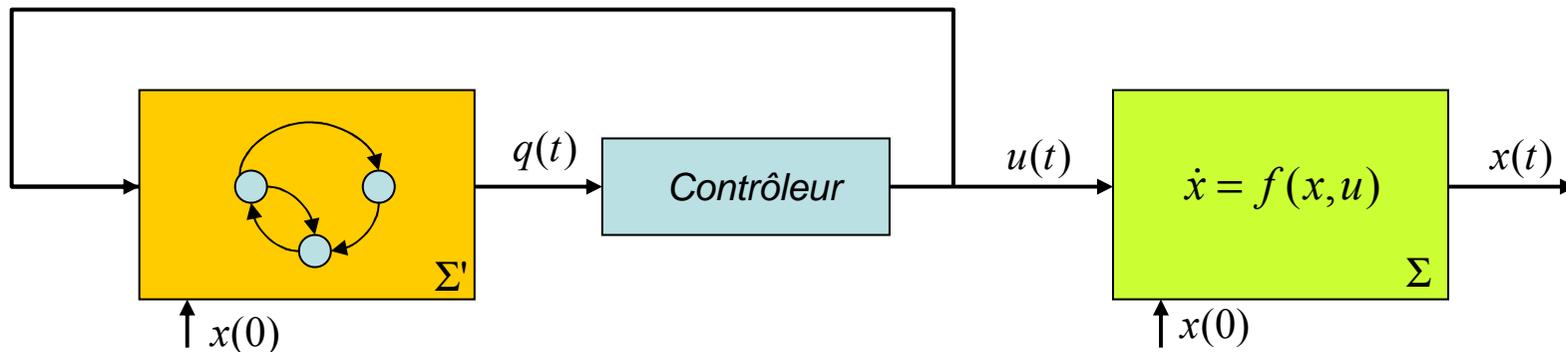
- Cadre théorique : bisimulation approchée [Girard, Pappas; IEEE TAC 2007]

Utilisation de Modèles Symboliques

- Le modèle symbolique est fini (e.g. automate)
- En vérification formelle (e.g. propriété de sûreté)



- Pour le contrôle :



Calcul de Modèles Symboliques

- Des modèles symboliques existent si Σ est incrémentalement stable :

Pour des états initiaux voisins et des signaux d'entrées voisins,
les trajectoires correspondantes restent voisines.

[Girard; HSCC 2007 / Pola, Tabuada, Girard; CDC 2007]

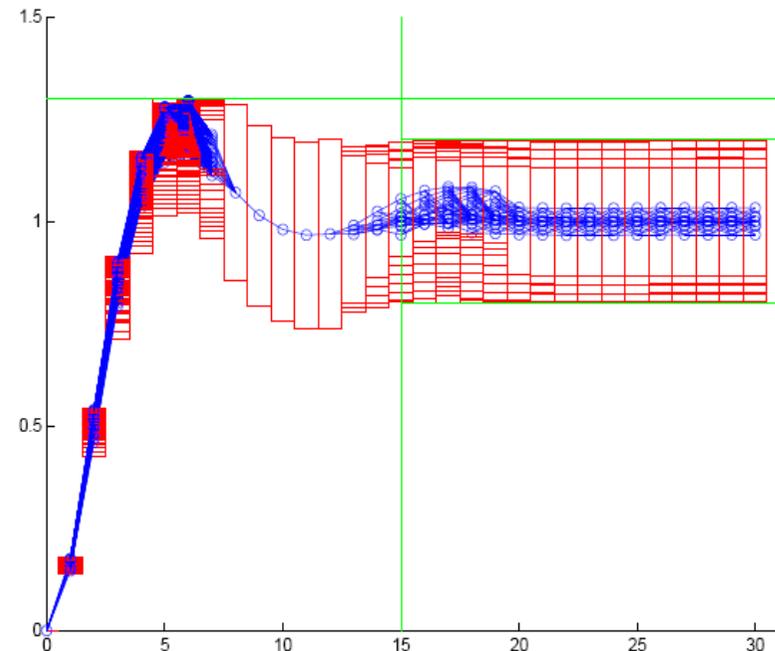
- Calcul des modèles symboliques :
 - Quantisation des entrées et des états
 - Construction d'un graphe de transition par simulation de trajectoires de Σ
- Le calcul de la précision du modèle nécessite une analyse plus fine de la dynamique (fonction de Lyapunov).

Vérification Formelle

- Vérification de la réponse d'un circuit analogique (RLC) :

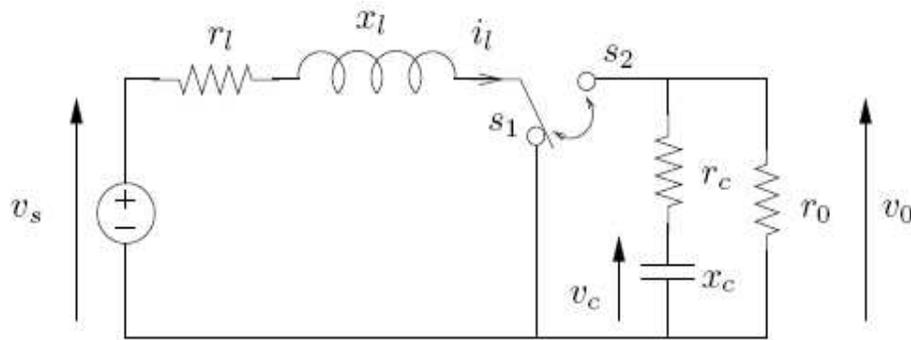
Pour toute tension d'entrée variant entre 0.9V et 1.1V,
la tension de sortie ne dépasse pas 1.3V
et se stabilise après 15ms entre 0.8V et 1.2V.

- Calcul des modèles symboliques :
 - A la volée, on explore uniquement les états intéressants
 - Précision du modèle symbolique est adaptée localement



Synthèse de Contrôleur

- Contrôle d'un circuit analogique/numérique (convertisseur DC-DC) :



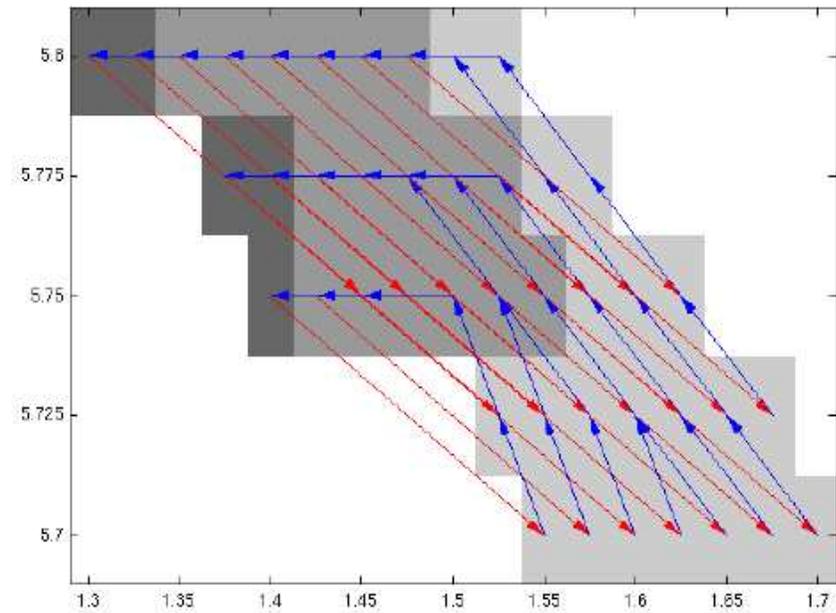
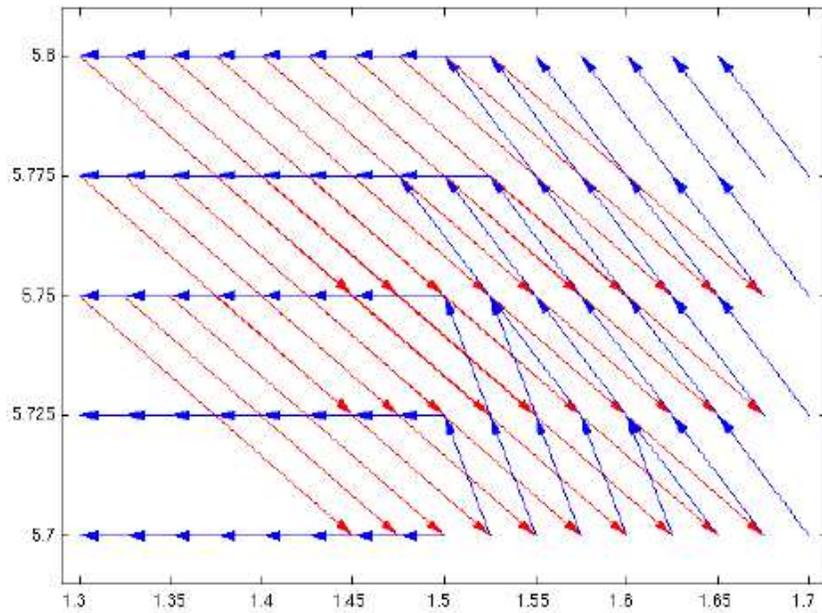
Réguler l'intensité i_l
entre 1.3 et 1.7

[Girard, Pola, Tabuada; soumis 2007]

- Synthèse d'un contrôleur :
 - Calcul off-line d'un modèle symbolique
 - Contrôle par supervision du modèle symbolique
 - Dérivation d'un contrôleur pour le circuit

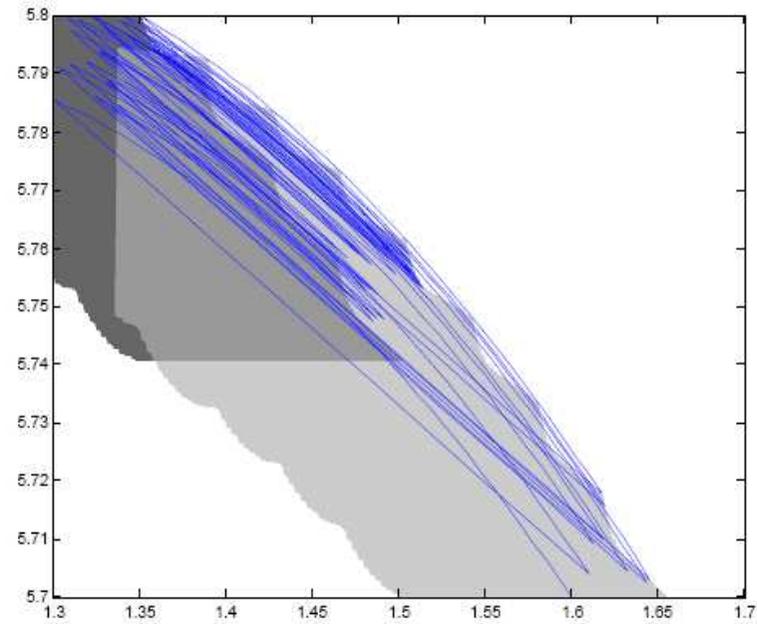
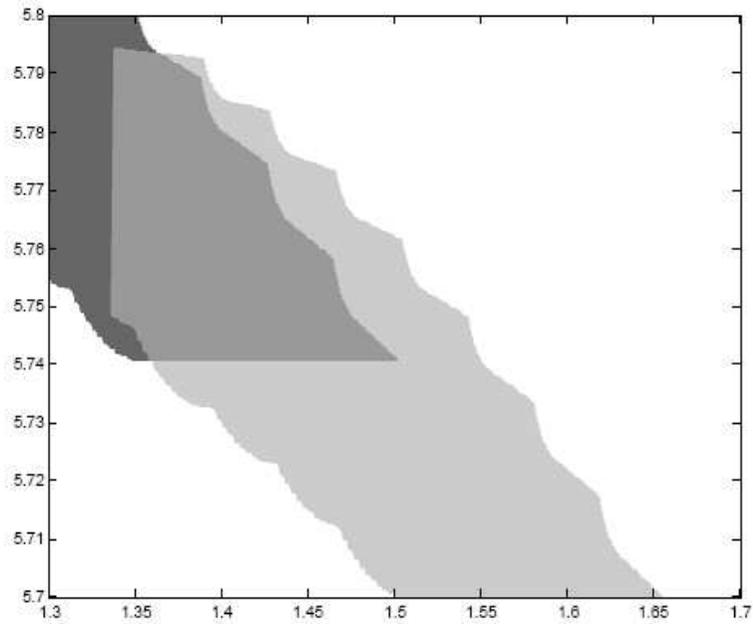
Synthèse de Contrôleur (2)

- Modèle symbolique à 85 états (précision médiocre) :



Synthèse de Contrôleur (3)

- Modèle symbolique à 642001 états (précision bonne) :



Perspectives pour 2008

- **Mise en équation automatique des circuits électriques :**
 - Modéliser automatiquement le circuit comme un système de complémentarité
 - Utilisation du parser spice pour lire les fichiers netlist
 - Adapter la méthode de la « Modified Nodal Analysis » :
 - Minimiser le nombre d'inconnues
 - Choisir les équations à prendre en compte
- **Méthodes de test :**
 - Observabilité partielle
 - Imprécision des capteurs et actuateurs
 - Connexion de l'outil HTG et du simulateur SICONOS.
- **Modèles symboliques :**
 - Modèles symboliques multi-échelles
 - Construction de modèles symboliques de systèmes de complémentarité :
 - Calcul de fonction de Lyapunov
 - Calcul de modèles symbolique basé sur le simulateur SICONOS