

WORKSHOP SIMULATION GLOBALE :

Développement d'un environnement ouvert de simulation système pour des applications RADAR

F.X.Estagerie, A. Bennadji, T.Reveyrand, S.Mons, R.Quéré

*XLIM UMR CNRS n°6172 – Université de Limoges
123 Avenue A. Thomas, 87060 Limoges Cedex, France*

estagerie@xlim.fr

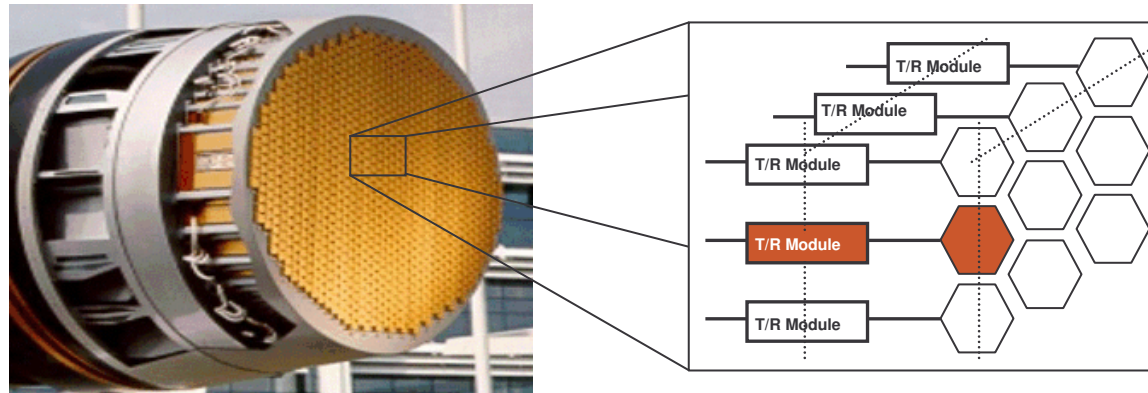
L. Constancias, P. Le Helleye

*DGA/CELAR
BP 7419 – 35147 Bruz Cedex, France*

- Contexte général : Antennes Actives
- Objectifs
- Principes du modèle comportemental d'amplificateurs de puissance
- Modèle comportemental des Non Linéarités
- Application du modèle topologique
- Modèle amélioré des Non Linéarités
- Présentation de l'environnement de simulation système
- Application du modèle de *paramètres S fort signal*
- Conclusions & Perspectives

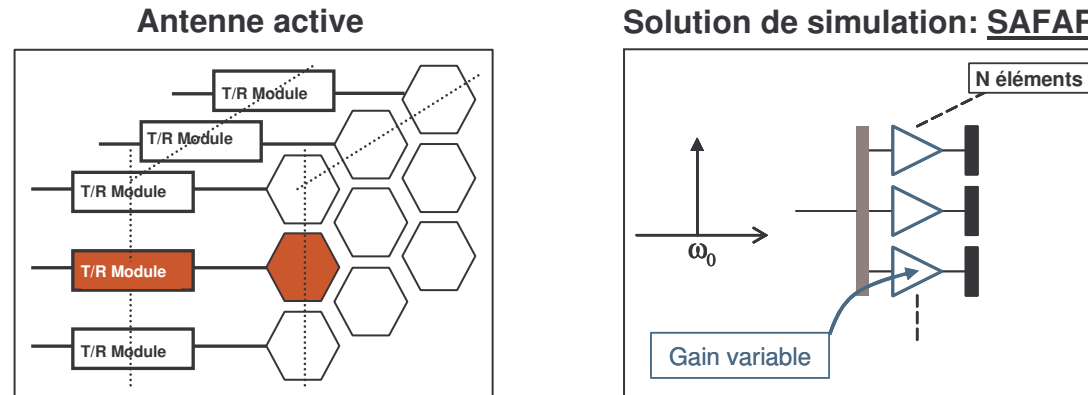
□ Principe des antennes actives (radar à balayage électronique)

- Combinaison d'un très grand nombre (*plusieurs centaines – milliers*) d'antennes élémentaires constituant une antenne réseau.
- Chaque cellule élémentaire possède sa propre fonction d'alimentation : **T/R module**.
- Contrôle de l'amplitude/phase du signal émis et reçu.



- Permet de modifier la forme et la direction du faisceau en quelques μs .
- Applications :
 - ⇒ Militaires : détection aéroportée, veille active.
 - ⇒ Civiles : communications spatiales.

□ Outil de simulation d'un antennes actives



- Simulation d'un problème de grande taille (*jusqu'à un millier de cellules élémentaires*)
- Outil de simulation système d'antennes actives : **SAFAR** (TAS - DGA/CELAR)
 - Permet de simuler des diagrammes de rayonnement.
 - Description simple des antennes actives sous forme de blocs
 - Différents composants en bibliothèque : *éléments rayonnants, diviseurs, atténuateurs n bits, amplificateurs (gain), modules actifs T/R (fichiers citifiles).*
 - Simulations dans le domaine fréquentiel (version actuelle).

□ **Problématique :**

- Description de la partie analogique des antennes actives peu précise :
 - Description sommaire des T/R modules.
 - Pas de prise en compte du caractère non linéaire de la partie d'émission:
 - ⇒ Effets de mémoire Basses et Hautes Fréquences.
 - ⇒ Effets de la thermique.
 - Outil système unilatéral:
 - ⇒ Pas de prise en compte de la désadaptation de charge du T/R module.

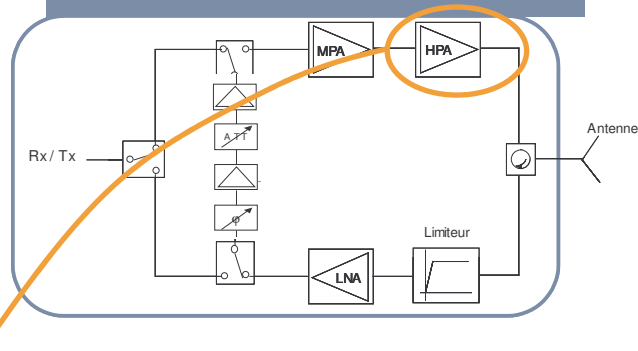
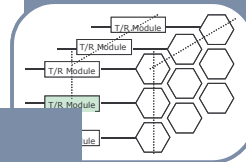
□ **Objectifs pour les concepteurs d'antennes actives et designers de composants:**

- Avoir une bonne connaissance de l'ensemble des éléments pour ne pas sur-spécifier chacun des éléments à designer.
- Pouvoir impacter l'influence de chaque composant sur le fonctionnement global des antennes actives.

Simulation de diagramme de rayonnement d'antenne active:
(SAFAR - ASTRAD – outils DGA-CELAR)



Simulation système:
(SCILAB / SCICOS)



Système de grande taille

Impact des T/R modules sur le diagramme de rayonnement

Impact du HPA sur le T/R module

Circuit

Travail de thèse

- Modélisation comportementale fine de l'amplificateur de puissance (HPA):
 - Désadaptation de la charge (objectif souhaité TOS 2 toutes phases)
 - Effet de mémoire (HF)
- Intégration du modèle dans un environnement ouvert de simulation temporelle

- Contexte général: Modélisation d'antennes actives
- Objectifs
- Principes du modèle comportemental d'amplificateurs de puissance
- Modèle comportemental des Non Linéarités
- Application du modèle topologique
- Modèle amélioré des Non Linéarités
- Présentation de l'environnement de simulation système
- Application du modèle de *paramètres S fort signal*
- Conclusions & Perspectives

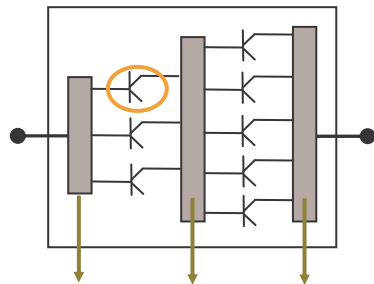
Développement et validation du modèle effectué dans l'environnement circuit ADS d'Agilent technologies.

□ Modèle comportemental « TOPOLOGIQUE » :

- Connaissance du design (topologie) de l'amplificateur.
- Traitement séparé des **parties Actives** (transistors) et **Passives** (filtres, circuits de polarisation).
- Permet de dissocier les effets non linéaires présents dans l'amplificateur.
- Modèle comportemental simple des transistors : **modèle AM/AM - AM/PM bilatéral**.
- Modèle comportemental simple des éléments passifs (prise en compte de la mémoire HF):
 - ⇒ *Simulateur circuit* : Description des circuits passifs par des boites de paramètres S.
 - ⇒ *Simulateur système temporel* : Description en pôles et zéros.

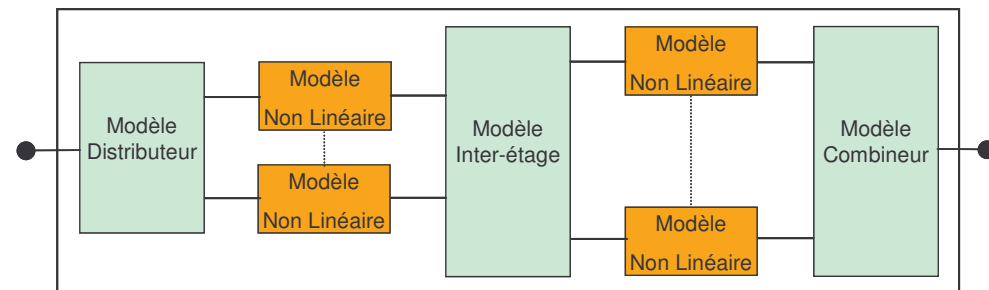
Amplificateur de puissance

Modèles Non-linéaires : Transistors



Modèles linéaires: éléments passifs

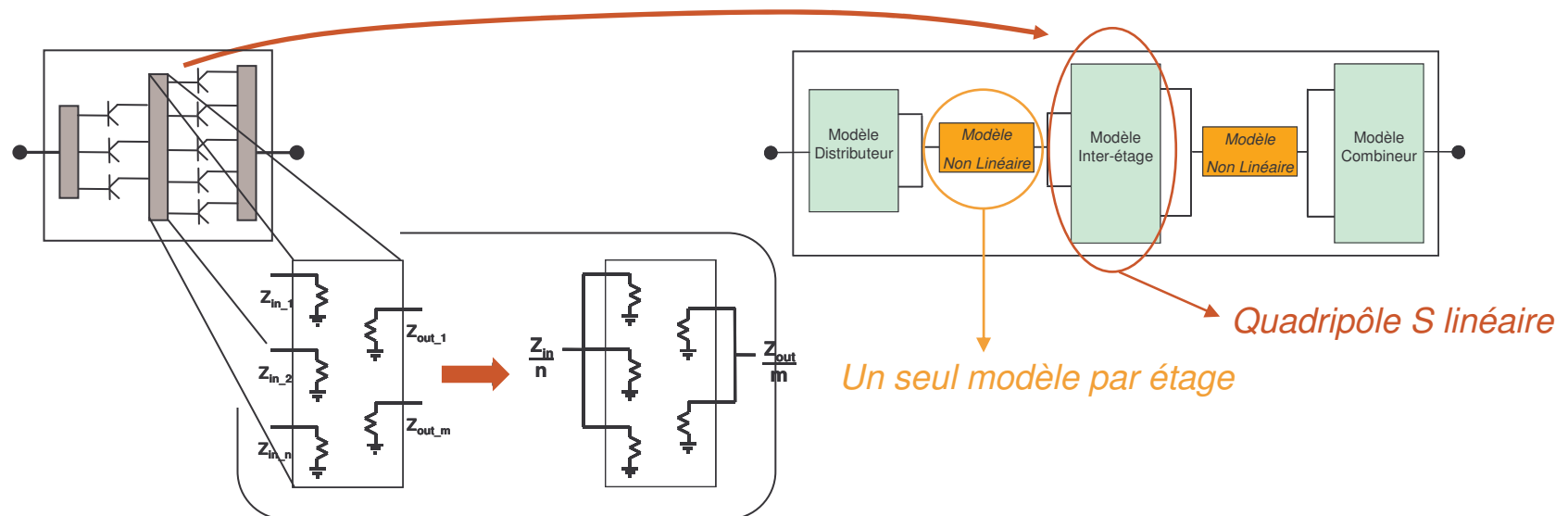
Modèle topologique



□ Hypothèse :

Dans le même plan, les \neq impédances présentées aux transistors sont proches :

- Simplification du modèle des éléments passifs.
- Réduction du nombre des modèles de non-linéarités.



□ Avantages :

- Conserve la notion de bilatéralité.
- Moins de modèles à extraire.
- Simulateur circuit : Moins de nœuds à équilibrer (résolution plus rapide).
- Simulateur système : topologie simplifiée, moins difficile à mettre en œuvre.
- Conserve la possibilité d'identification de l'origine des effets de mémoire.

□ Choix du modèle des Non-linéarités

Prise en compte de la charge vue par l'amplificateur => modèles bilatéraux.

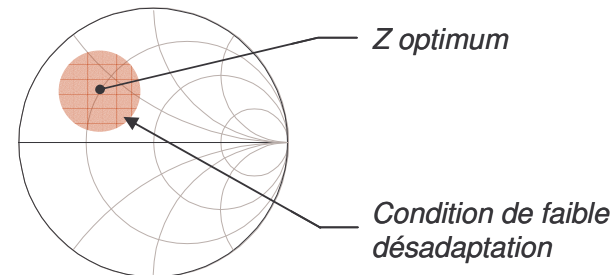
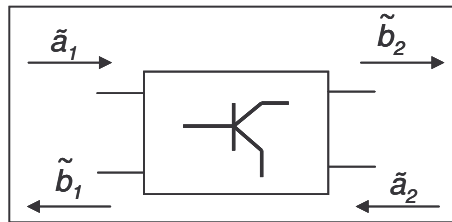
- Réseaux de neurones (utilisation complexe).
- Paramètres S fort signal*.

*J.Verspecht «Scattering Function for Nonlinear Behavioral Modeling in Frequency Domain», IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June 2003.

□ Principe du modèle S fort-signal *statique*

Hypothèse : Amplificateur ne fonctionne pas dans des conditions de très fortes désadaptations.

L'onde a_2 est très faible devant a_1 .



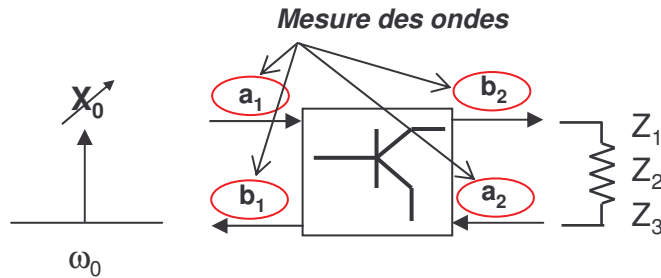
Un quadripôle non-linéaire est caractérisé par : $\tilde{b}_i = f_{NL} \{ \Re(\tilde{a}_1), \Im(\tilde{a}_1), \Re(\tilde{a}_2), \Im(\tilde{a}_2) \}$ avec $i=1,2$

Un développement en série de Taylor au 1er ordre conduit à :

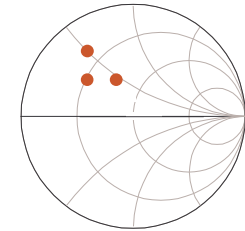
$$\begin{pmatrix} \tilde{b}_1 \\ \tilde{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}(|\tilde{a}_1|) & S_{12}(|\tilde{a}_1|) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{12}^\Delta(|\tilde{a}_1|) \\ S_{21}(|\tilde{a}_1|) & S_{22}(|\tilde{a}_1|) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{22}^\Delta(|\tilde{a}_1|) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \tilde{a}_2^* \end{pmatrix}$$

Principe d'extraction

Extraction des I-V dans le plan des transistors pour 3 conditions de charge différentes :

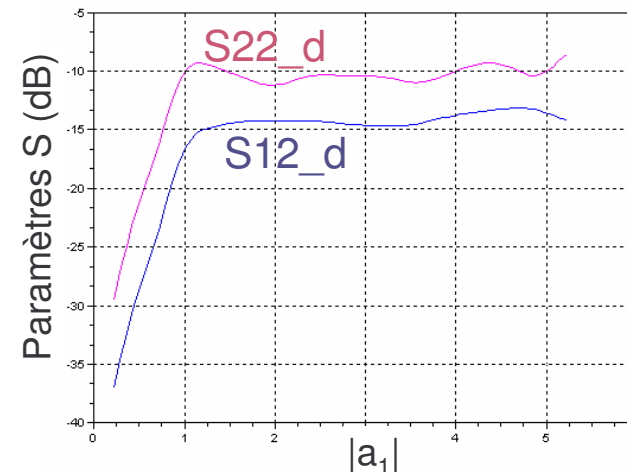
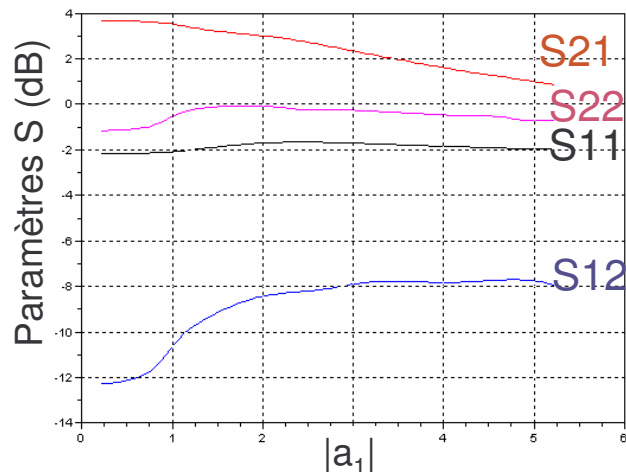


- $Z1 = Z_{\text{optimum}} (\Gamma = 0)$
- $Z2 \Rightarrow \Gamma = 0.2 \cdot \exp(j \cdot 0)$
- $Z3 \Rightarrow \Gamma = 0.2 \cdot \exp(j \cdot \pi/2)$



- *Extraction simple et rapide* : Simulation du circuit en H.B. 1 ton
Expérimental : caractérisation Load-Pull - VNA des transistors
- *Structure du modèle simple* : un seul modèle de transistor extrait par étage

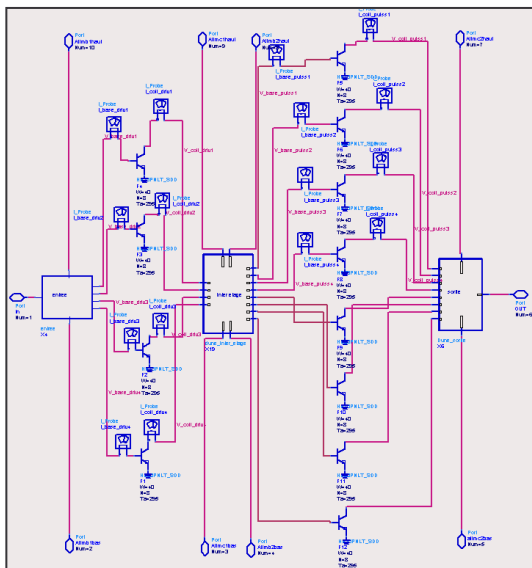
Exemple : Paramètres S fort-signal



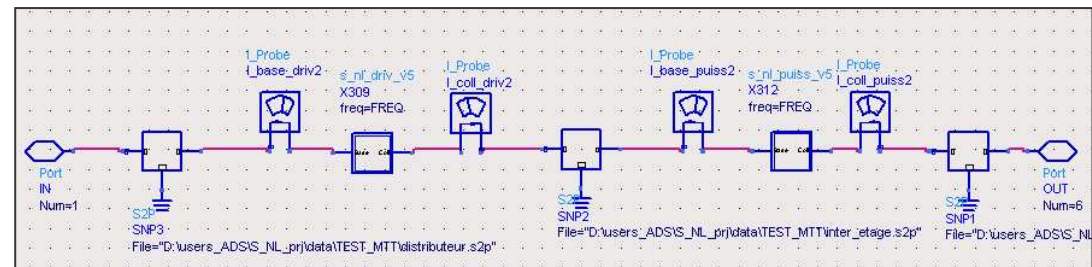
□ Implémentation du modèle topologique dans l'environnement ADS

- Description des parties passives : blocs de paramètres S
 - ⇒ Permet la prise en compte de la mémoire HF de l'amplificateur.
- Description des parties actives: utilisation de l'outil FDD (Frequency-Domain Defined Device).
- Application du modèle topologique à un amplificateur de puissance:
 - ⇒ Bande X (10GHz).
 - ⇒ Transistors HBT – UMS HB20P.
 - ⇒ Amplificateur à 2 étages (4 transistors au driver et 8 à l'étage de puissance).

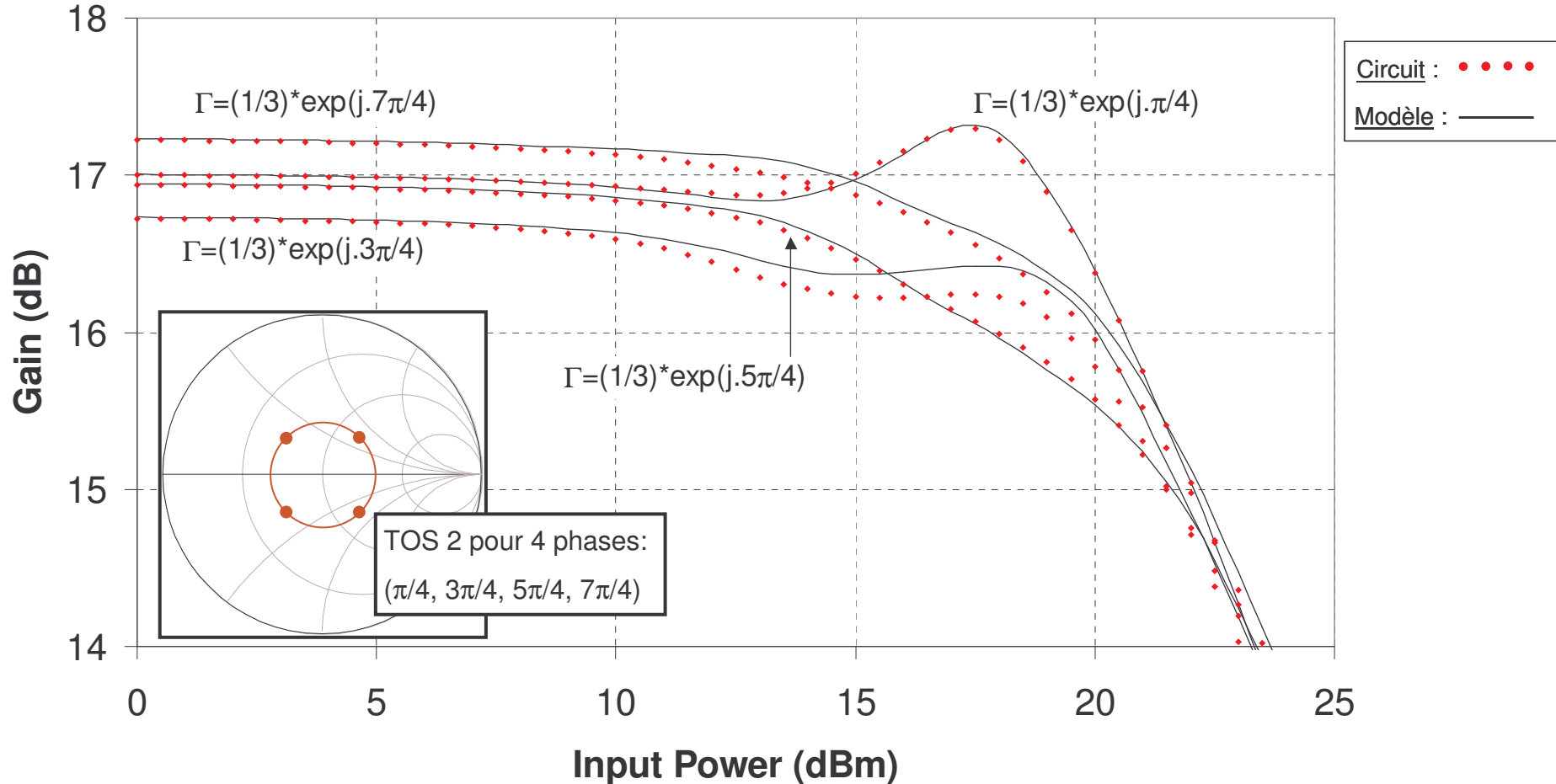
Design de l'amplificateur (ADS)



Modèle topologique (ADS)

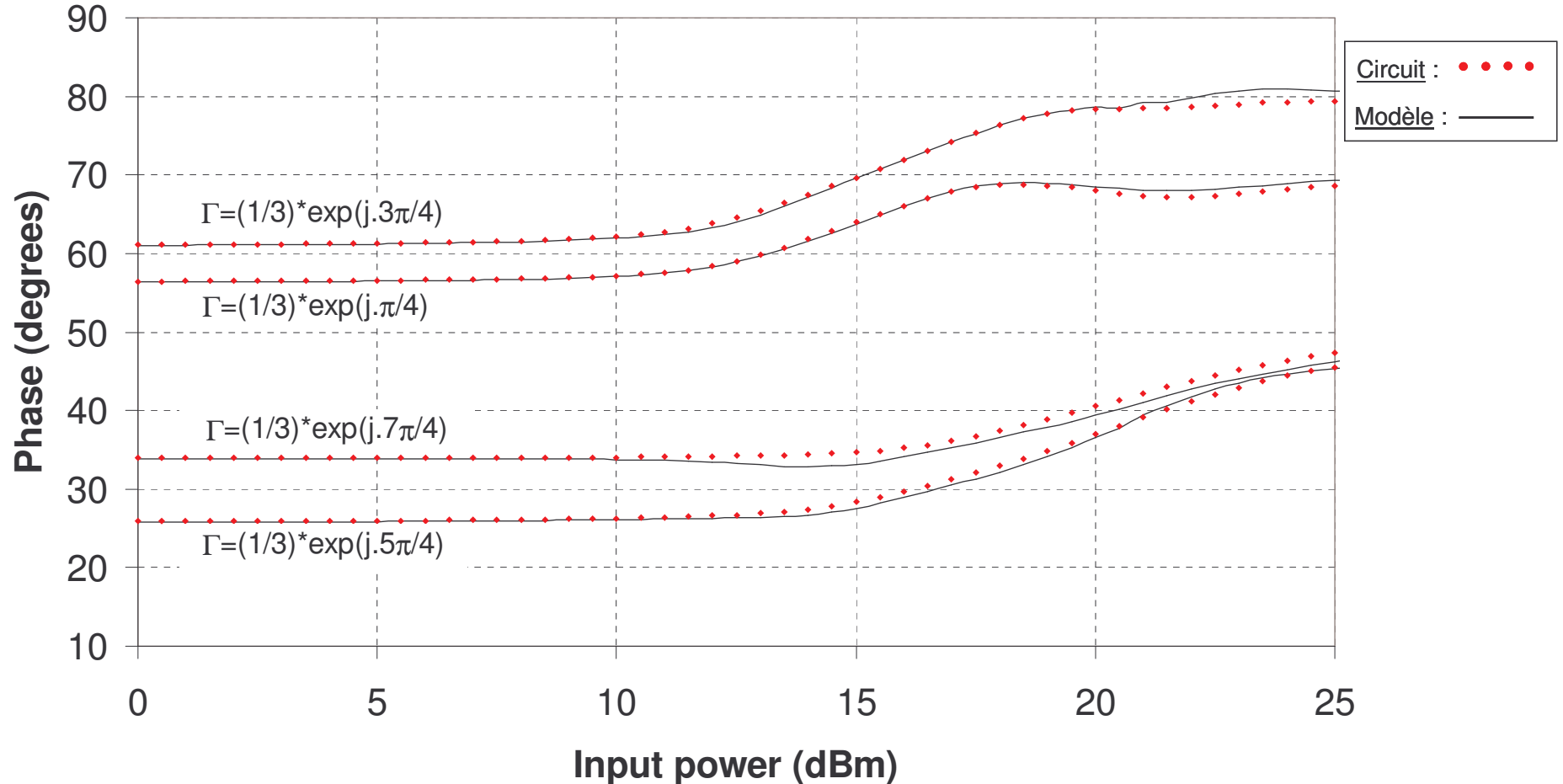


□ Comparaison Circuit/Modèle du Gain pour des impédance de TOS 2 à f_0



- Dépendance importante de la charge sur le fonctionnement de l'amplificateur.
- Très bonnes prédictions quelle que soit la charge de l'amplificateur.

□ Comparaison Circuit/Modèle de la phase pour des impédance de TOS 2 à f_0



- Dépendance importante de la charge sur le fonctionnement de l'amplificateur.
- Très bonnes prédictions quelle que soit la charge de l'amplificateur.

- Contexte général: Modélisation d'antennes actives
- Objectifs
- Principes du modèle comportemental d'amplificateurs de puissance
- Modèle comportemental des Non Linéarités
- Application du modèle topologique
- Modèle amélioré des Non Linéarités
- Présentation de l'environnement de simulation système
- Application du modèle de *paramètres S fort signal*
- Conclusions & Perspectives

Modélisation non exploitable dans l'environnement circuit ADS

□ Prise en compte de la dépendance fréquentielle des transistors

Introduction de la fréquence dans l'équation caractéristique des non-linéarités :

$$\begin{pmatrix} \tilde{b}_1 \\ \tilde{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & S_{12}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{12}^\Delta(|\tilde{a}_1|, \Omega) \\ S_{21}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & S_{22}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{22}^\Delta(|\tilde{a}_1|, \Omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \tilde{a}_2^* \end{pmatrix}$$

□ Principe d'extraction

- Principe d'extraction identique qu'au modèle statique (à f_0).
- Répété pour plusieurs fréquences appartenant à la bande passante de l'amplificateur.

□ Implémentation dans un simulateur

Décomposition des paramètres S_{ij} en fonctions rationnelles :

- Approximations polynomiales : $S_{ij}(|\tilde{a}_1(t)|, \Omega) = \sum_{n=0}^N \alpha_n(|\tilde{a}_1(t)|) \cdot \Omega^n$
- Simple à implémenter.
- Suffisamment précise compte tenue des variations des S_{ij} en fonction la fréquence.

□ Environnement de simulation système : SCILAB/SCICOS



- **Scilab** est un logiciel libre de calcul numérique développé par l'INRIA & ENPC.
- **Scicos** est une boîte à outils de **Scilab** qui permet la simulation de systèmes hybrides.
- Scilab/Scicos est l'équivalent gratuit open-source de **Matlab/Simulink**.
- Scilab/Scicos seul ne permet pas l'implémentation d'un système implicite (bilatéral):

⇒ *Simulateur de type Data Flow*

- Intégration des solveurs numériques ODE (LSODAR) et **DAE (DASKR)**:

⇒ *Solveur DAE (Differential Algebraic Equation) permet de résoudre les systèmes implicites.*

- Interfaçage avec **Modelica** permet de construire des systèmes implicites dans Scicos.

- <http://www.modelica.org>

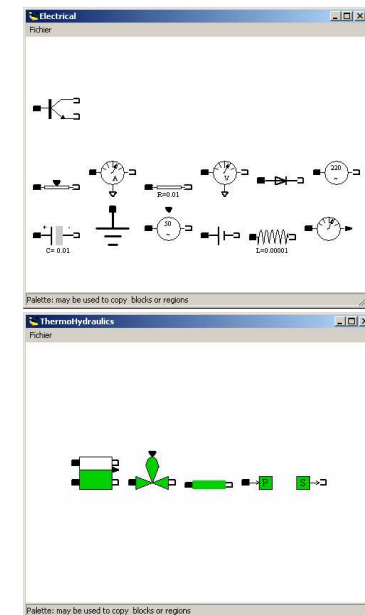
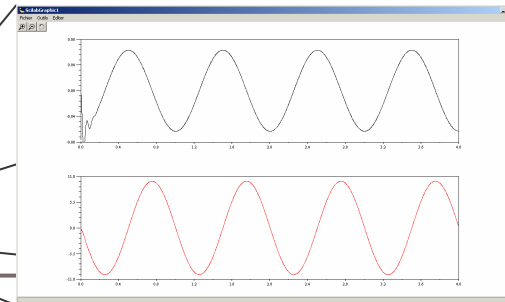
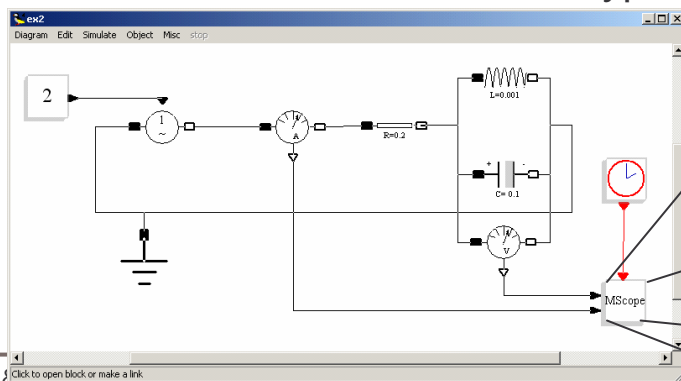


□ Présentation de Modelica :

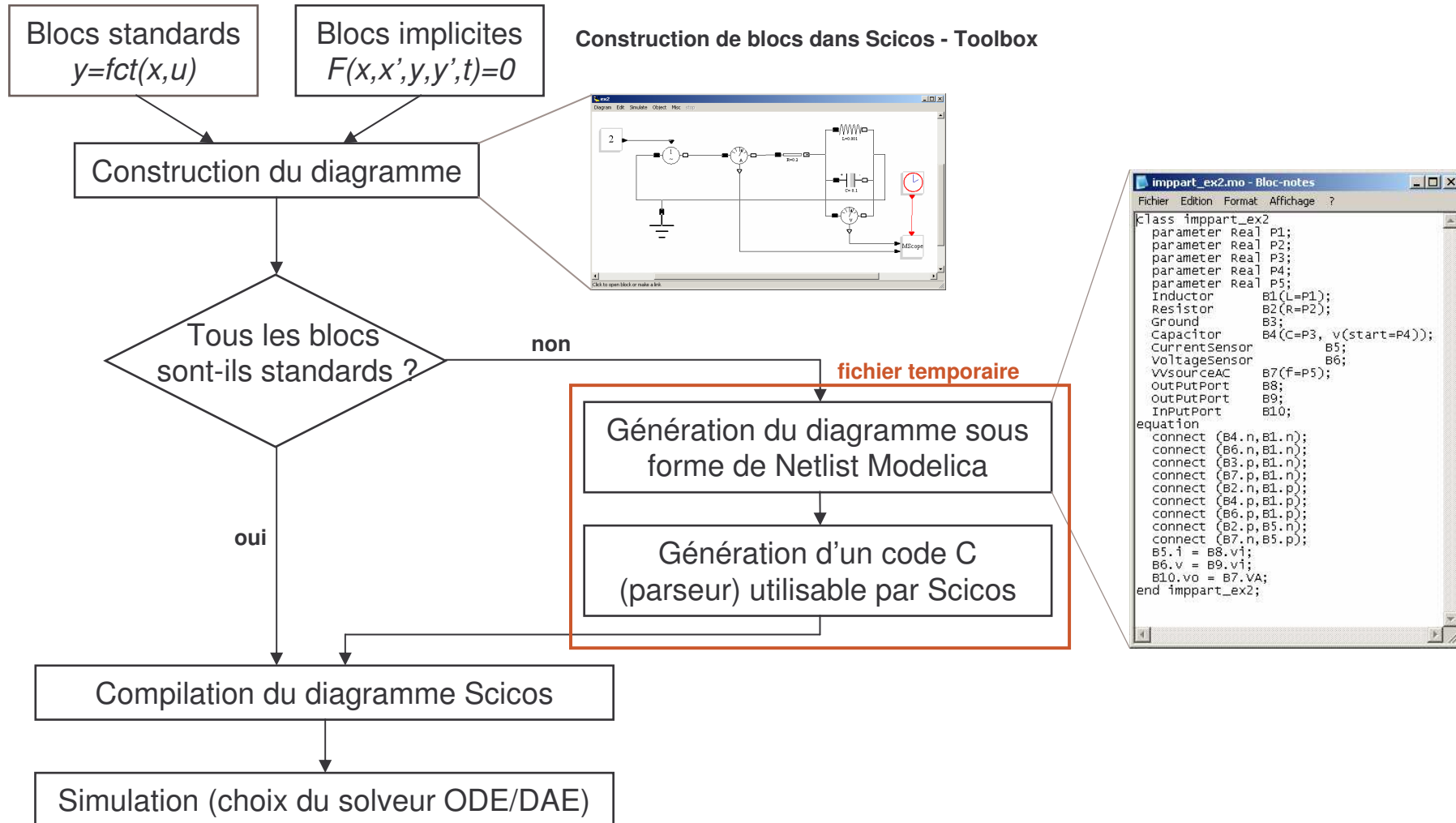
- Langage libre de modélisation orienté-objet dédié à la résolution de problèmes physiques.
- L'utilisateur développe ses propres fonctions en langage Modelica : *program.mo*.
- **Modelicac** permet la compilation de *program.mo* et permet la génération de code:
 - ⇒ parseur de Modelica vers code C.
- Possibilité d'appeler des codes externes en C ou Fortran 77 depuis le code Modelica.

□ Modelica dans l'environnement Scicos :

- Les Blocs Scicos codés en Modelica présentent des ports non orientés:
 - ⇒ *Permet l'utilisation de modèles physiques.*
- 2 Toolbox intégrées à Scicos : Electrical & ThermoHydraulic.
- Dans un même schéma : Blocs typés Scicos et blocs typés Modelica



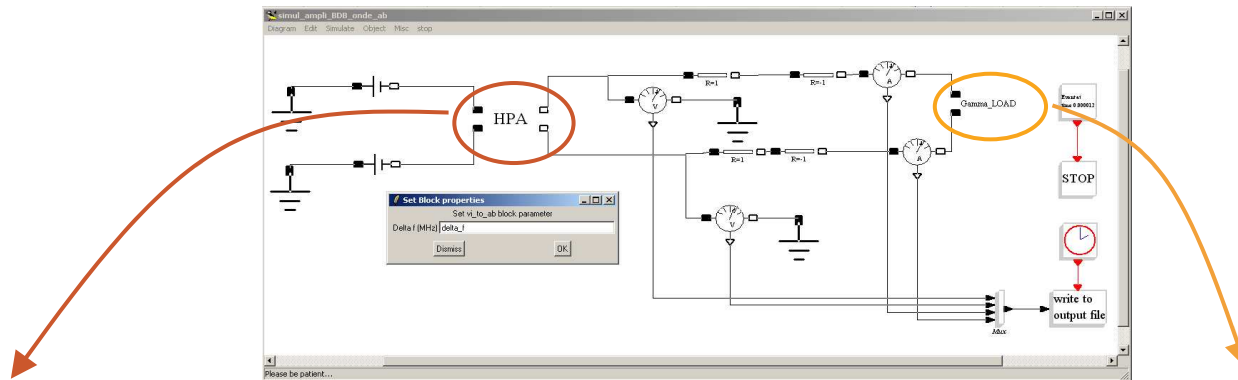
Principe de fonctionnement : Interface Scilab/Scicos - Modelica



Application du **modèle comportemental bilatéral des non linéarités** (**Paramètres S fort-signal paramétré en fréquence**) à un amplificateur de puissance:

- Bande S (2GHz).
- Transistors HBT – UMS (4 transistors).

□ Implémentation dans l'environnement système Scicos



- Bloc *amplificateur*.
- Paramétrage en fonction de la fréquence du signal.
- Codé en Modelica => Appel à une routine en C.
- La routine C permet de implémenter l'équation :
- Bloc *charge* (charge présentée à l'amplificateur)
- Codé en Modelica.

$$\begin{pmatrix} \tilde{b}_1 \\ \tilde{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & S_{12}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{12}^\Delta(|\tilde{a}_1|, \Omega) \\ S_{21}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & S_{22}(|\tilde{a}_1|, \Omega) & e^{j \cdot 2 \cdot \varphi(\tilde{a}_1)} \cdot S_{22}^\Delta(|\tilde{a}_1|, \Omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \tilde{a}_2^* \end{pmatrix}$$

□ Comparaison Circuit (ADS) / Modèle Système (Scicos)

Fréquence: f_0

$$Z1 = 50 \Omega$$

$$\Gamma=0$$

$$Z2 = (40+j*30) \Omega$$

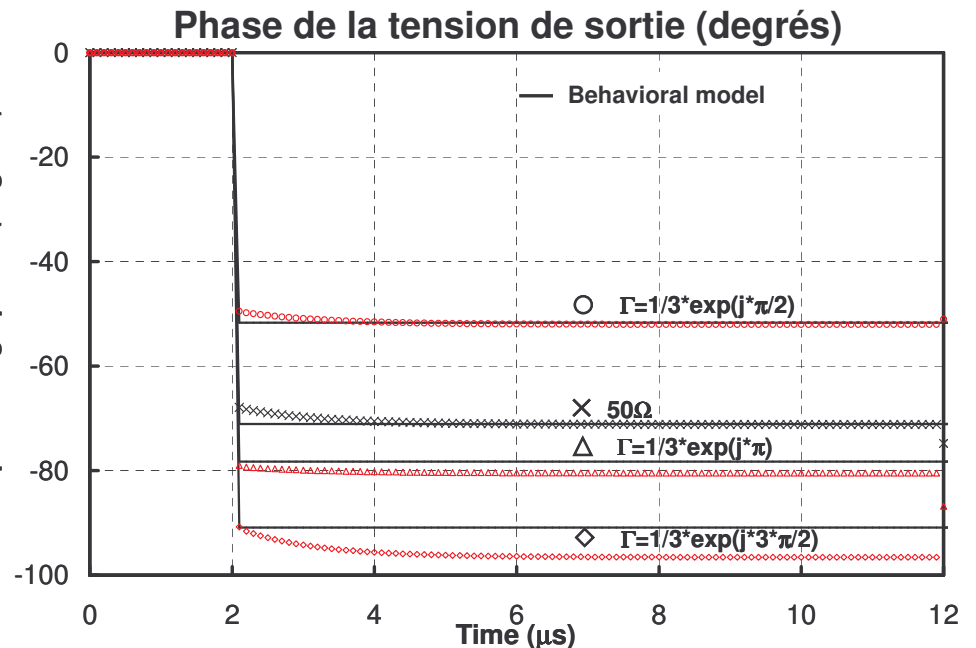
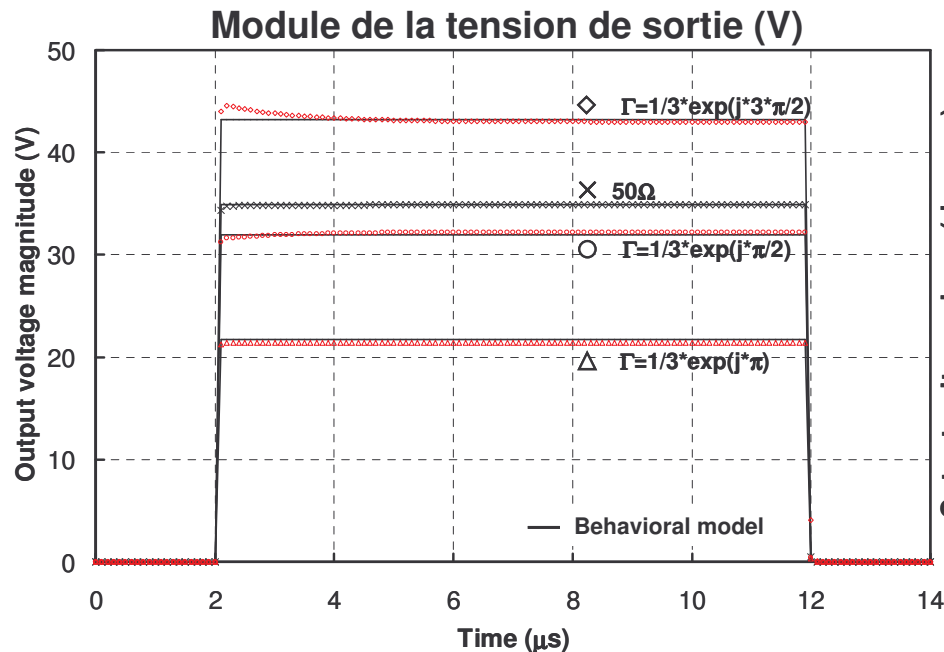
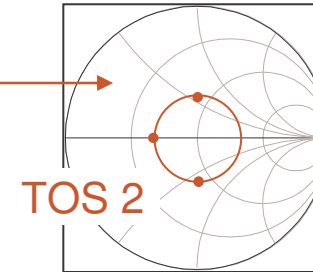
$$\Gamma=1/3.\exp(j*\pi/2)$$

$$Z3 = (40-j*30) \Omega$$

$$\Gamma=1/3.\exp(j*3\pi/2)$$

$$Z4 = 25 \Omega$$

$$\Gamma=1/3.\exp(j*\pi)$$



- Dépendance importante de la charge sur le fonctionnement de l'amplificateur.
- Très bonnes prédictions quelle que soit la charge de l'amplificateur.

□ Comparaison Circuit (ADS) / Modèle Système sur la bande de l'amplificateur

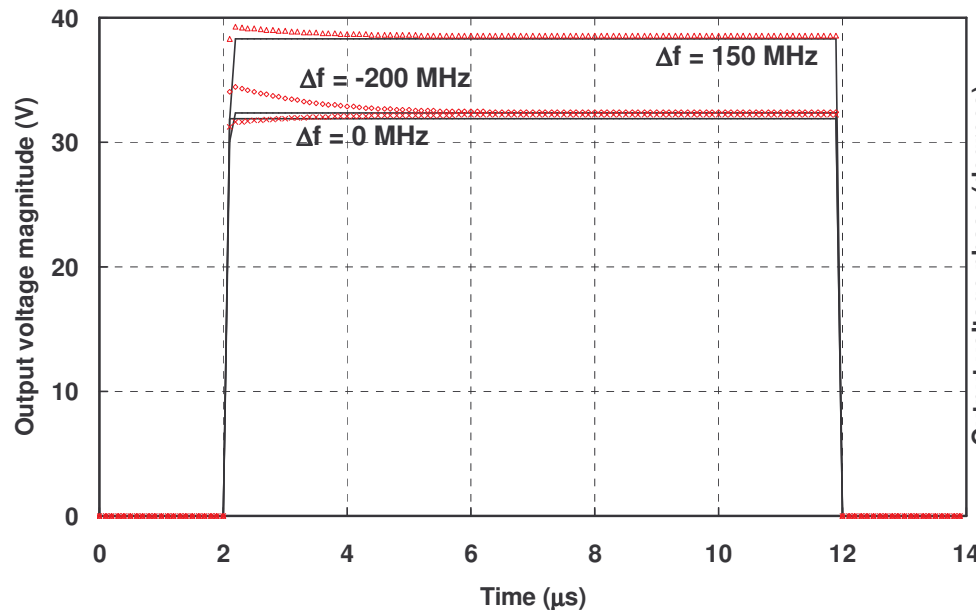
Fréquences: $f = f_0 - 200 \text{ MHz}$

$f = f_0$

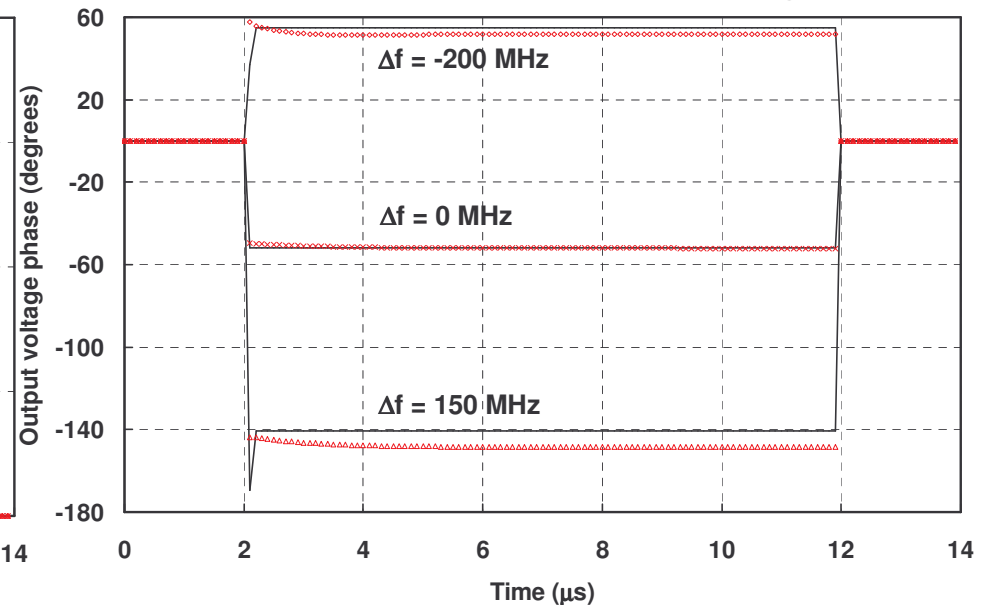
$f = f_0 + 150 \text{ MHz}$

$Z = (40 + j \cdot 30) \Omega \Rightarrow (\text{TOS } 2)$

Module de la tension de sortie (V)



Phase de la tension de sortie (degrés)



- Dépendance importante de la mémoire HF sur le fonctionnement de l'amplificateur.
- Très bonnes prédictions quelle que soit la fréquence d'utilisation de l'amplificateur.

- La charge et la fréquence de travail ont une forte influence sur le comportement des amplificateurs de puissance.
- Impact fort des amplificateurs sur les T/R modules et donc sur l'antenne active.
- Développement et validation d'un modèle comportemental bilatéral « topologique ».
- Basé sur le design des amplificateurs: Séparation des parties actives et passives.
- Très bonne prédiction du comportement des amplificateurs quelle que soit la charge (jusqu'à TOS 2) à sa fréquence centrale.
- Intérêt pour les concepteurs de circuits : prototype « virtuel » des amplificateurs :
=>Permet de dimensionner au mieux les performances des amplificateurs
- *Environnement de simulation limité pour nos applications.*
- *Simulations de type « Enveloppe » des amplificateurs: convergence difficile.*

- Implémentation du modèle des non linéarités dans l'environnement système Scicos.
- Utilisation d'un solveur DAE: permet la résolution de systèmes implicites.
- Utilisation du langage **Modelica**.
- *Couplage Scicos / Modelica récent : faible documentation, peu de toolbox et de blocs développés dans Scicos.*
- Coût CPU du modèle est identique au modèle AM/AM AM/PM
- Implémentation du modèle « topologique » dans l'environnement système Scicos.
- Description des parties passives en pôles et zéros et implémentation sous forme de filtres.
- Prise en compte de la mémoire basse fréquence et des effets de la thermique.