Techniques de caractérisation en puissance

Tibault Reveyrand
reveyrand@gmail.com

SOMMAIRE

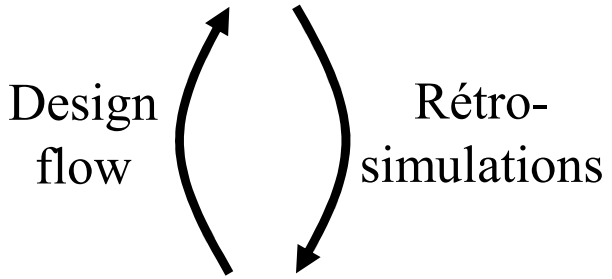
- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Pourquoi faire une caractérisation “fort signal” ?

MODULE

“Système” *Performances d’un sous-systeme nonlineaire*
Modélisation “boîte noire” d’un sous-système

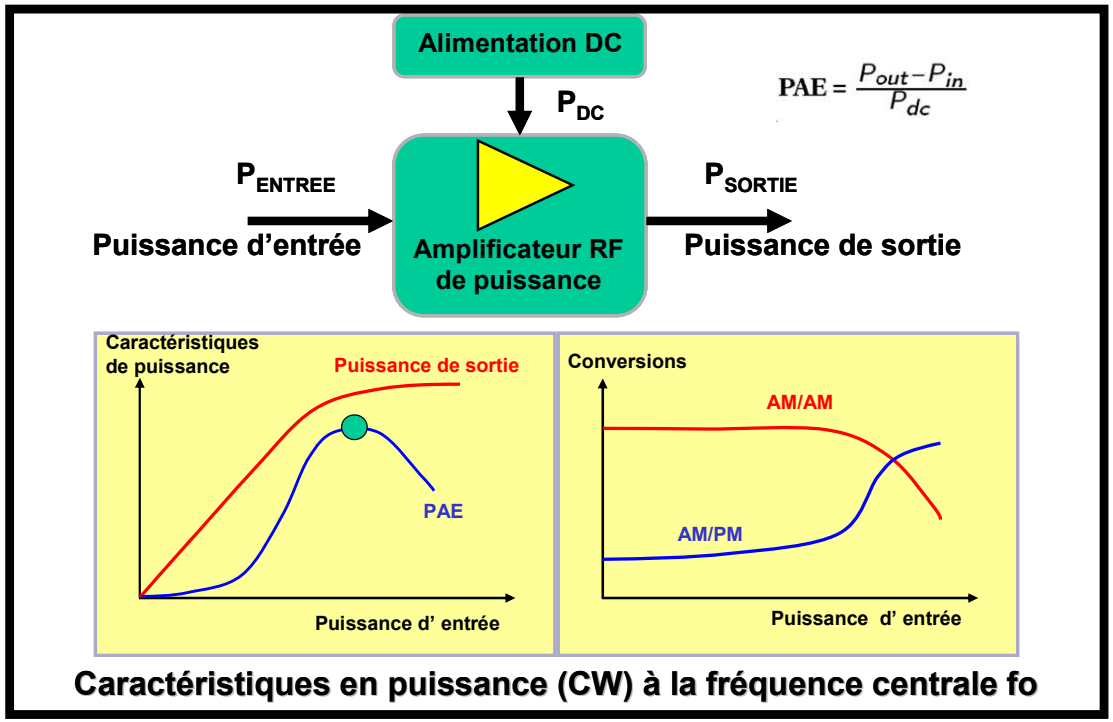
“Circuit” *Performances d’un transistor*
Modélisation “spice” d’un transistor



FONDERIE

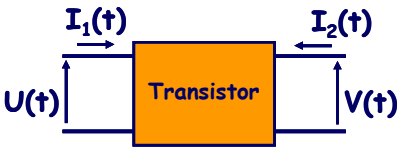
Extraire des performances

- Puissance de sortie ;
- PAE ;
- …



Caractéristiques en puissance (CW) à la fréquence centrale fo

Définitions des classes de fonctionnement



Commandes:
- Tensions U(t) et V(t)

Réponses:
- Courants $I_1(t)$ et $I_2(t)$

Non-linéarité ⇔ Génération de fréquences harmoniques:
Tensions et courants périodiques mais pas forcément sinusoïdaux

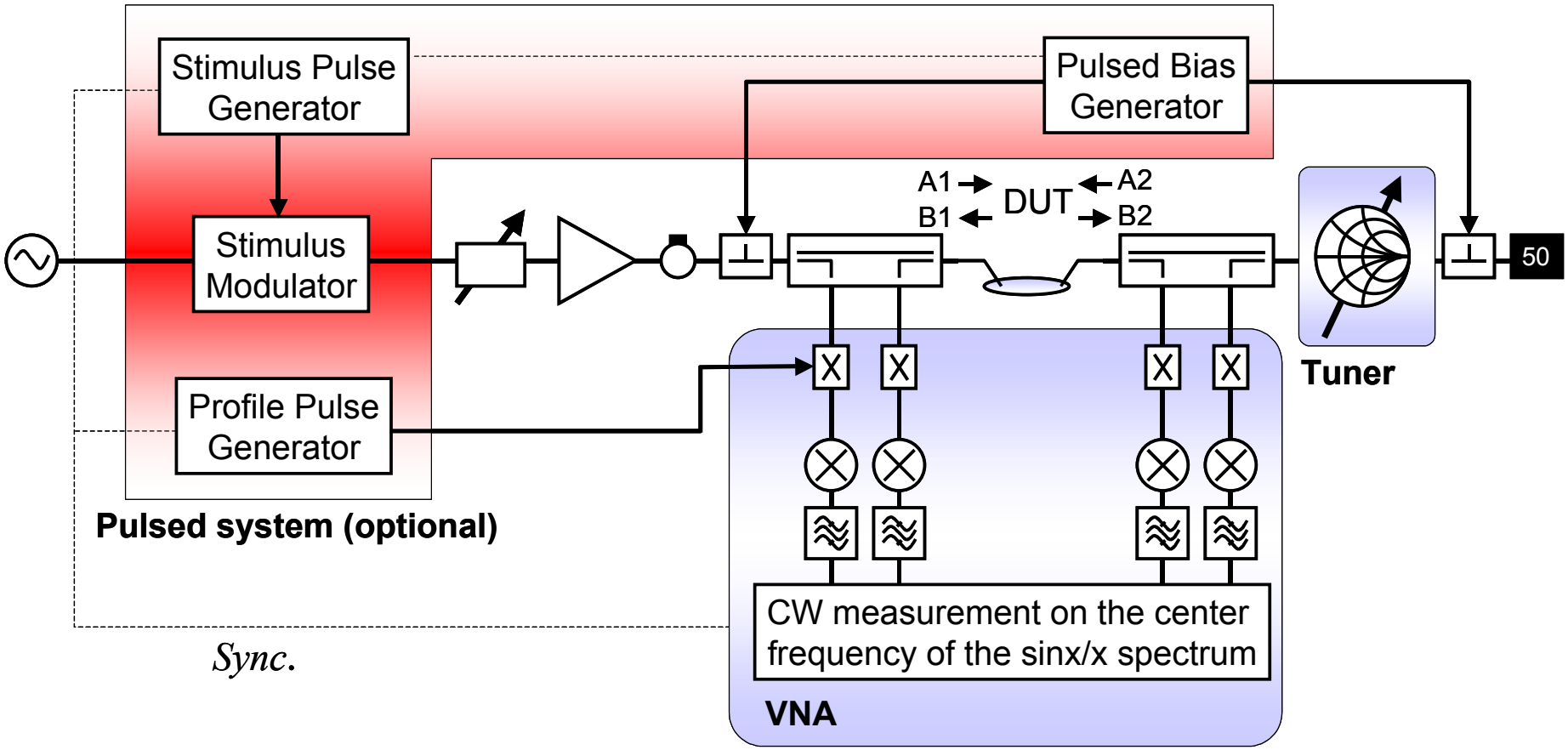
Relations temporelles générales:

$$I_1(t) = G_{NL}\big(U(t), V(t)\big)$$
$$I_2(t) = F_{NL}\big(U(t), V(t)\big)$$

Traiter des quantités physiques

TENSIONS et COURANTS aux bornes du dispositif sous test.

Un banc de caractérisation de type Load-Pull



Introduction

- Quelles sont les quantités mesurées ?
  - En simulation : V et I
  - En mesure traditionellement :

    les ondes de puissance a et b

$$a_i = \frac{v_i + Z_{ref}.i_i}{2.\sqrt{\Re\{Z_{ref}\}}}$$

$$b_i = \frac{v_i - Z_{ref}^{*}.i_i}{2.\sqrt{\Re\{Z_{ref}\}}}$$

Ondes de Kurokawa

K. Kurokawa, "Power waves and the scattering matrix," IEEE Trans. on MTT, vol. 13, no. 3, pp. 194-202, March 1965.

  - En mesure ICI : les ondes de tension a et b

$$a_i = \frac{v_i + Z_{ref}.i_i}{2}$$

$$b_i = \frac{v_i - Z_{ref}.i_i}{2}$$

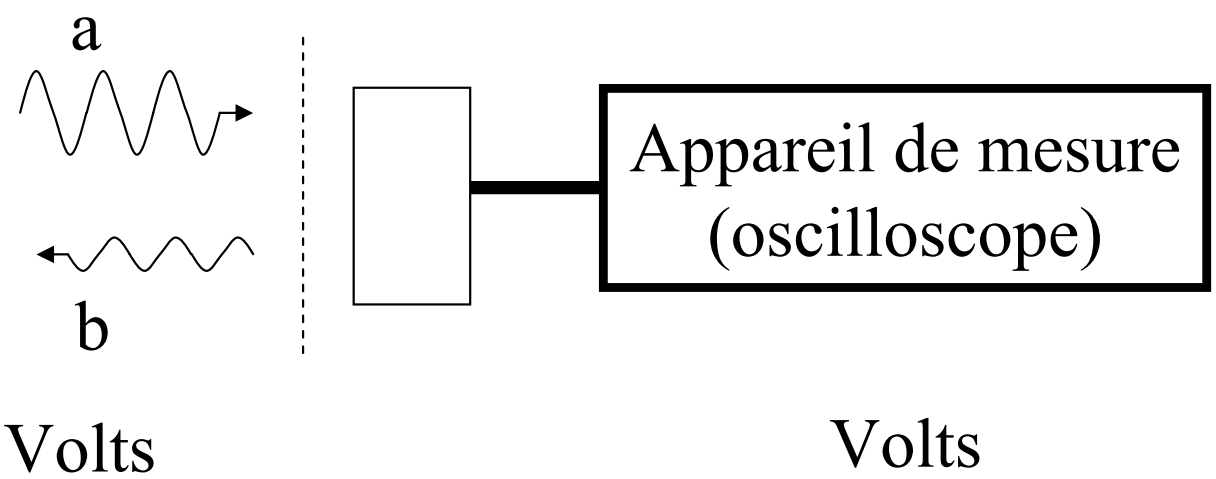
Ondes de Tension

R. B. Marks and D. F. Williams, "A general waveguide circuit theory," J. Rsrch. of the Nat. Inst. Of Stds. And Tech., vol. 97, pp. 533-561, Sept-Oct 1992.

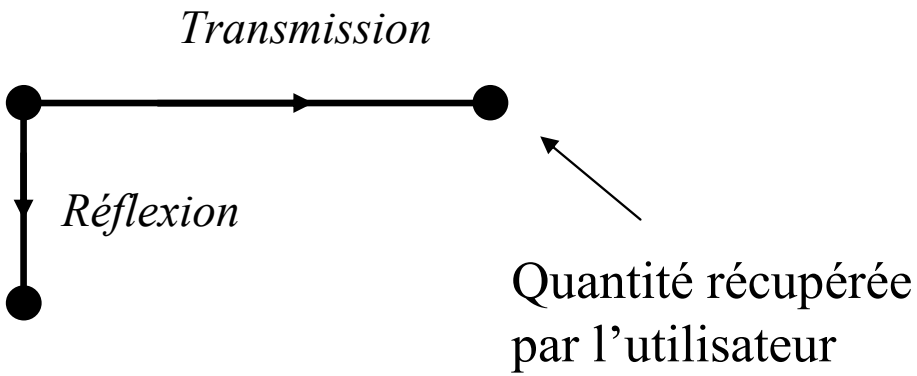
Introduction

$$v = a + b$$

$$i = \frac{a - b}{Zo}$$



Tout instrument doit être associé à un modèle d'erreur



Introduction

- Je suis perdu !!! Que dois-je utiliser ? Les ondes de puissance (comme tout le monde) ou les ondes de tension ?

Les VRAI quantités sont I et V. Ce sont ces données qui sont traitées dans tout simulateur.

Vous pouvez utiliser votre propre définition d'onde à condition de rester cohérant en V/I

- Exercice : Calculer une puissance en onde de tension

$$P = \frac{1}{2}.\Re\left\{V.I^*\right\}$$

- Exercice : Calculer un coefficient de réfléxion

$$\Gamma = \frac{b}{a}$$

- Les ondes de tension sont valides pour tout Zo complexe.
- Les ondes de puissance ne le sont que pour Zo réel.

SOMMAIRE

- Introduction
- **Les standards d'étalonnage**
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Les standards d'étalonnage

- Standards Relatifs
  - Charge 50 Ohms
  - SHORT
  - OPEN
  - LIGNES d'impedance caractéristique connue

- Standards Absolus
  - Le Wattmètre
  - Le générateur multiharmonique

Chaque standard possède un modèle et des caractéristiques qui lui sont propre.

Les standards relatifs

- Paramètres d'un CALKIT

Ex : CALKIT HP 85050D

http://na.tm.agilent.com/pna/caldefs/PNA/85050D.htm

Paramètres du modèle polynomial décrivant les standards relatifs

85050D APC 7 Calibration KitDownload 85050D.ckt

Std. No.	Label	Description	Connector	Sex	C0 F(e-15)	C1 F(e-27)/Hz	C2 F(e-36)/Hz^2	C3 F(e-45)/Hz^3	Fmin (MHz)	Fmax (MHz)	Delay (Sec)	Loss (Gohm/Sec)	Z0 (Ohm)
2	OPEN	APC 7 open	APC 7	NONE	90.4799	763.303	-63.8176	6.4337	0	999000	0.00E+00	0.7	50

Std. No.	Label	Description	Connector	Sex	L0 H(e-12)	L1 H(e-24)/Hz	L2 H(e-33)/Hz^2	L3 H(e-42)/Hz^3	Fmin (MHz)	Fmax (MHz)	Delay (Sec)	Loss (Gohm/Sec)	Z0 (Ohm)
3	SHORT	APC 7 short	APC 7	NONE	0.3566	-33.392	1.7542	-0.0336	0	999000	0.00E+00	0.7	50

Std. No.	Label	Description	Connector	Sex	Fixed/Sliding	Arbitary Imp	Offset Load	Fmin (MHz)	Fmax (MHz)	Delay (Sec)	Loss (Gohm/Sec)	Z0 (Ohm)
1	BROADBAND	APC 7 broadband load	APC 7	NONE	FIXED	OFF	OFF	0	999000	0.00E+00	0.7	50

Std. No.	Label	Description	Connector Port1	Sex Port1	Connector Port2	Sex Port2	Fmin (MHz)	Fmax (MHz)	Delay (Sec)	Loss (Gohm/Sec)	Z0 (Ohm)
4	THRU	Insertable thru standard	APC 7	NONE	APC 7	NONE	0	999000	0.00E+00	0.7	50

Connector	Description	Sex	Media	Min Freq(MHz)	Max Freq(MHz)	Cutoff Freq(MHz)	7
APC 7	APC 7	NONE	COAX	0	999000	0	7

Ressource pour les CALKITs Agilent :
http://na.tm.agilent.com/pna/caldefs/stddefs.html

- Modèle des CALKIT (SOLT)

Les termes apparaissent sur les pointes ou les kit d'étalonnage

Les termes du polynôme donne la capacité effective de l'OPEN ainsi que la self inductance du SHORT

$$C_{eff} = C_0 + C_1.f + C_2.f^2 + C_3.f^3$$

$$L_{eff} = L_0 + L_1.f + L_2.f^2 + L_3.f^3$$

Calcul des coefficients de réflexion

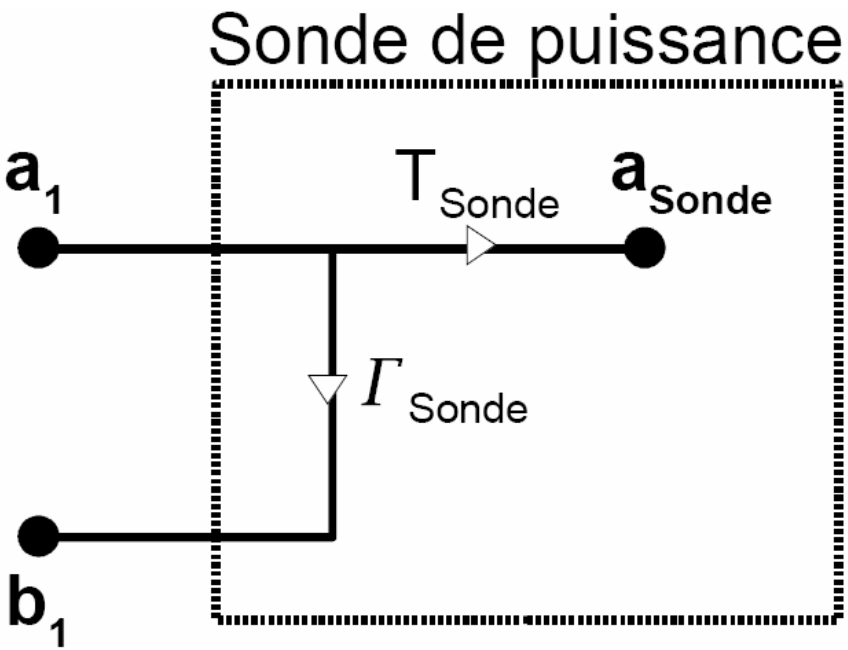
$$\Gamma_{Load} = 0$$

$$\Gamma_{Open} = \left[e^{\frac{-\tau}{Z_0}.Loss_{(1\,GHz)}.\sqrt{\frac{f}{10^9}} - j.2.\pi.f.2.\tau} \right] . \frac{1 - j.Z_0.2.\pi.f.\left(C_0 + C_1.f + C_2.f^2 + C_3.f^3\right)}{1 + j.Z_0.2.\pi.f.\left(C_0 + C_1.f + C_2.f^2 + C_3.f^3\right)}$$

$$\Gamma_{Short} = -\left[e^{\frac{-\tau}{Z_0}.Loss_{(1\,GHz)}.\sqrt{\frac{f}{10^9}} - j.2.\pi.f.2.\tau} \right] . \frac{1 - \frac{j}{Z_0}.2.\pi.f.\left(L_0 + L_1.f + L_2.f^2 + L_3.f^3\right)}{1 + \frac{j}{Z_0}.2.\pi.f.\left(L_0 + L_1.f + L_2.f^2 + L_3.f^3\right)}$$

- Le wattmètre

Un wattmètre étalonné fournit la puissance sur une impédance idéale de 50 ohms.



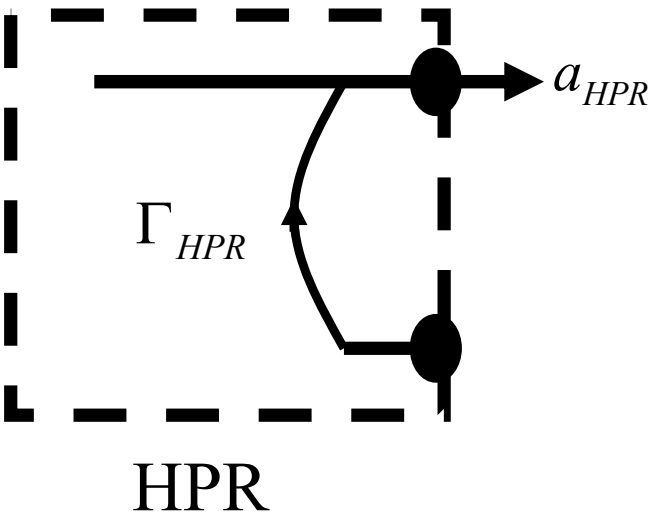
Le coefficient de réflexion est fournit avec la sonde (Rho). Dans notre cas, il est mesuré.

Le coefficient de transmission est égal à 1 une fois le wattmètre calibré. La dépendance en fréquence de la sonde est assurée par un CALfactor.

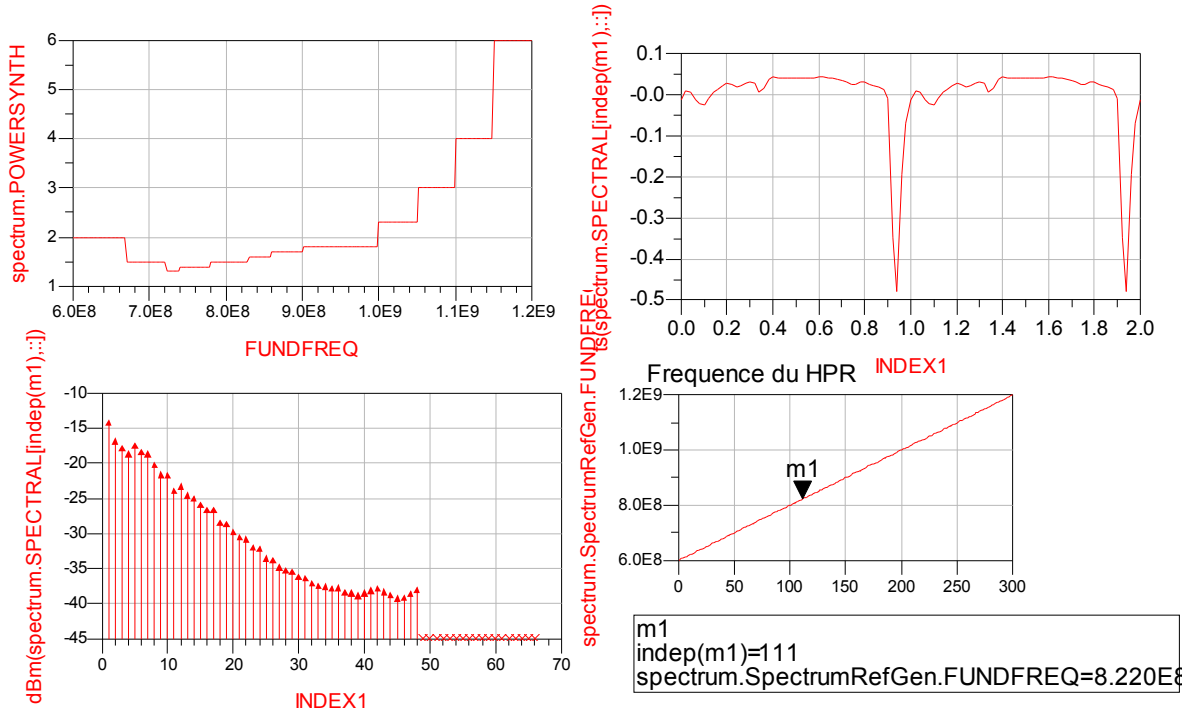
$$a_{Sonde} = 10^{\left(\frac{P_{dBm} - 10}{20}\right)}$$

Les standards absolus

- Le générateur multiharmonique (LSNA)



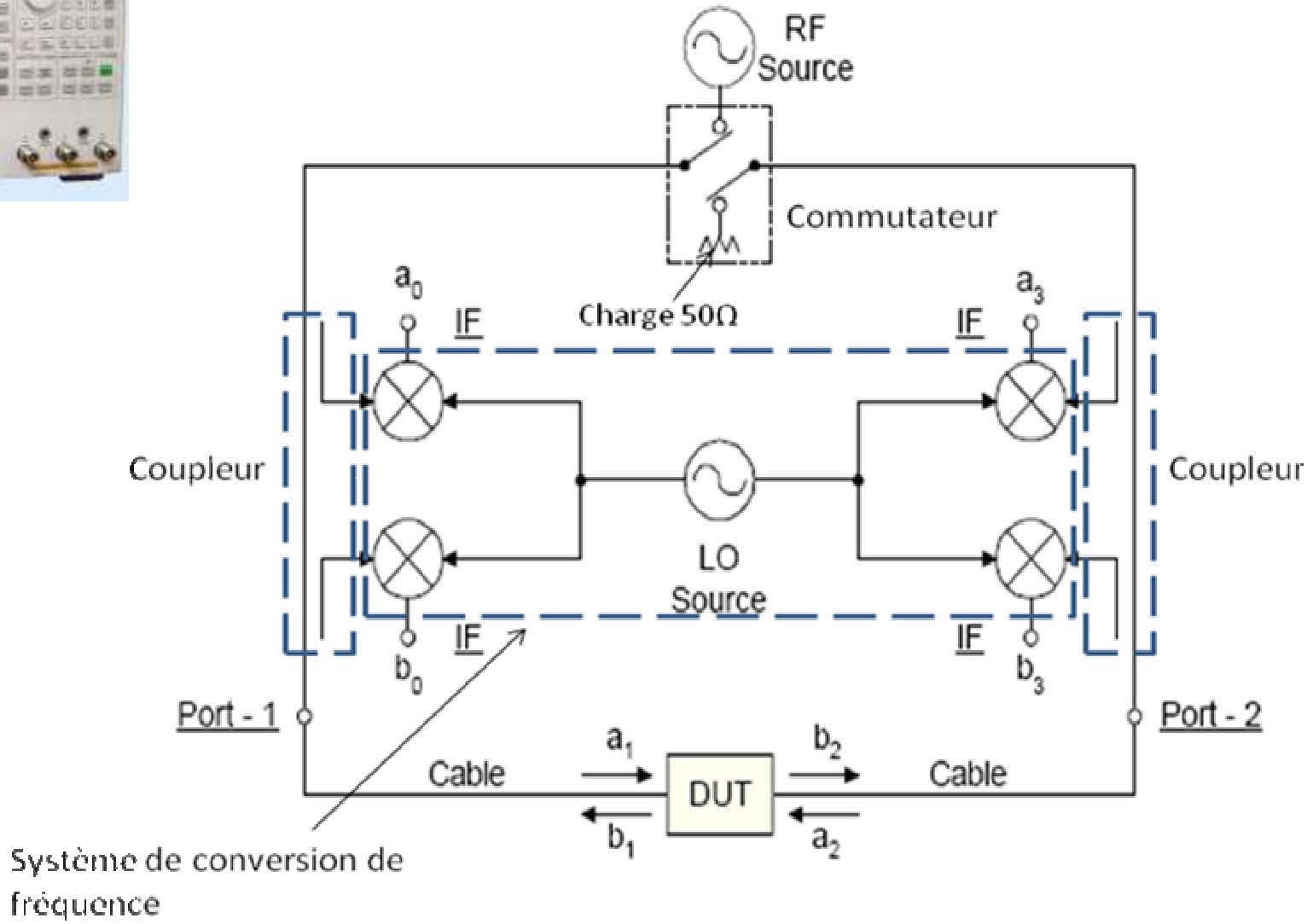
Les deux paramètres sont fournis lors de la caractérisation de l'étalon



SOMMAIRE

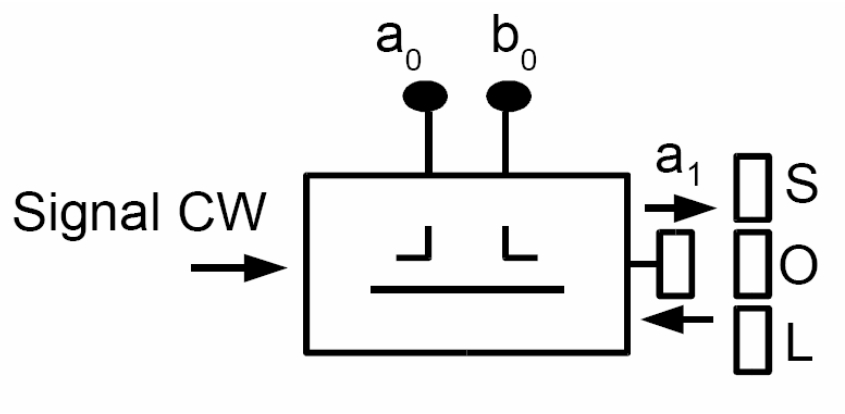
- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

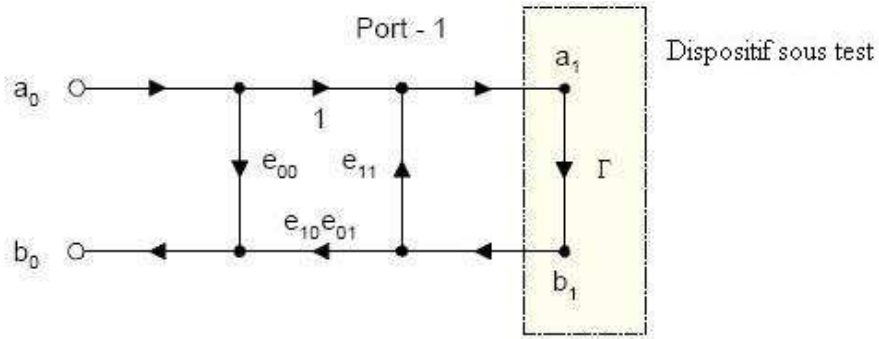
L'analyseur de réseau vectoriel



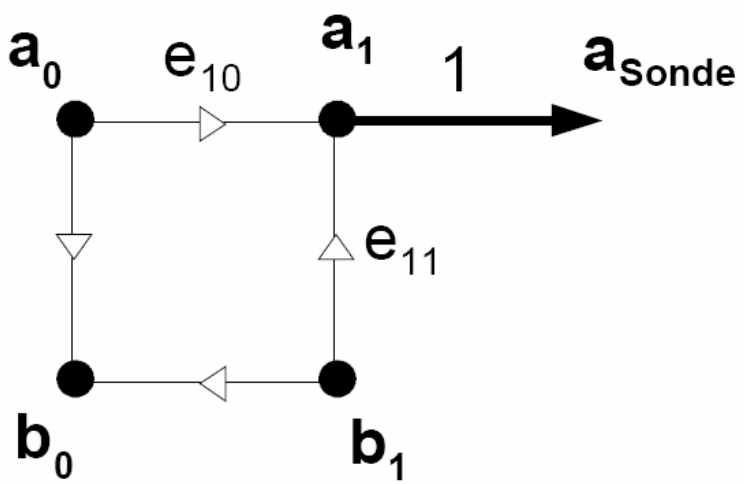
L'analyseur de réseau vectoriel

- Étalonnage 1 port relatif



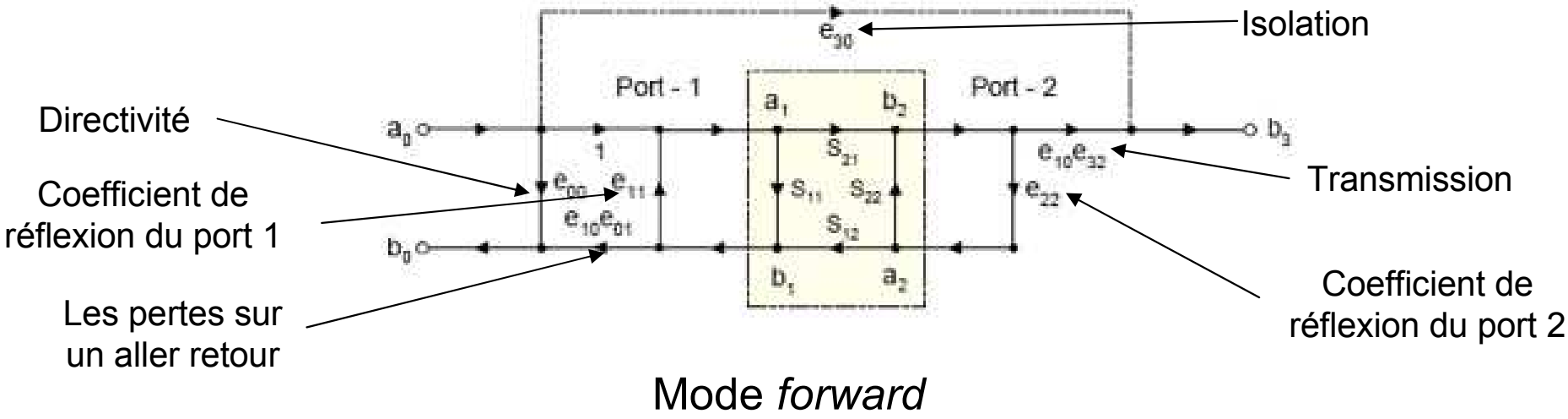


- Étalonnage 1 port absolu

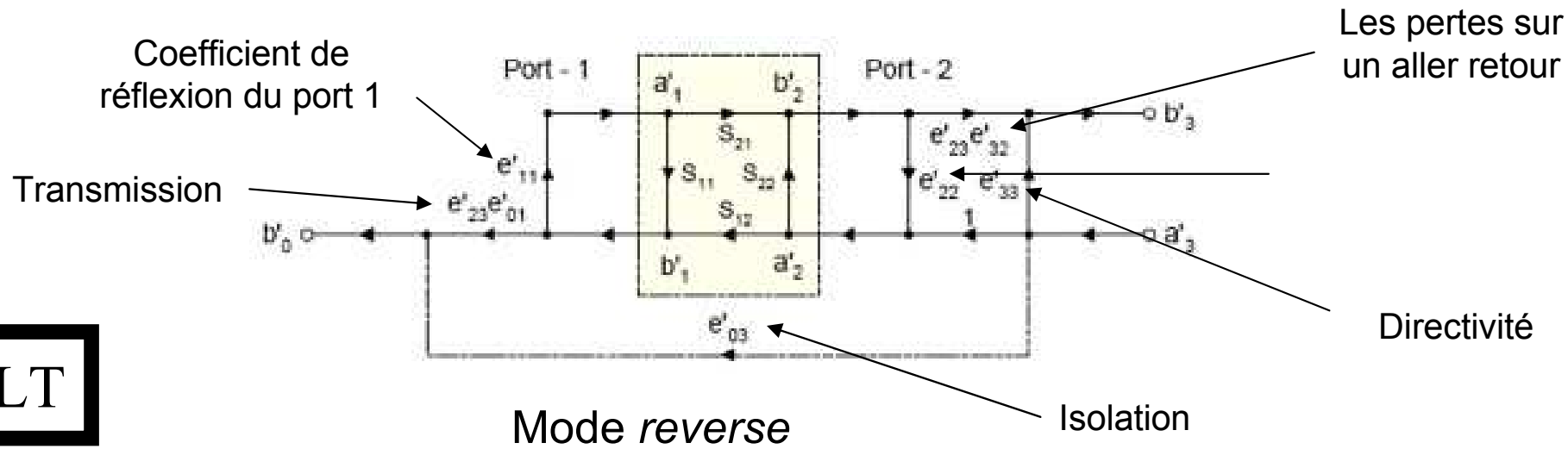


$$|e_{10}| = \frac{|a_{Sonde}|}{\left|a_0\left(1 + \left(\frac{e_{11}}{e_{01}\,.\,e_{10}}\right).\left(\frac{b_0}{a_0} - e_{00}\right)\right)\right|}$$

- Étalonnage 2 ports sur un modèle à 12 termes d'erreur



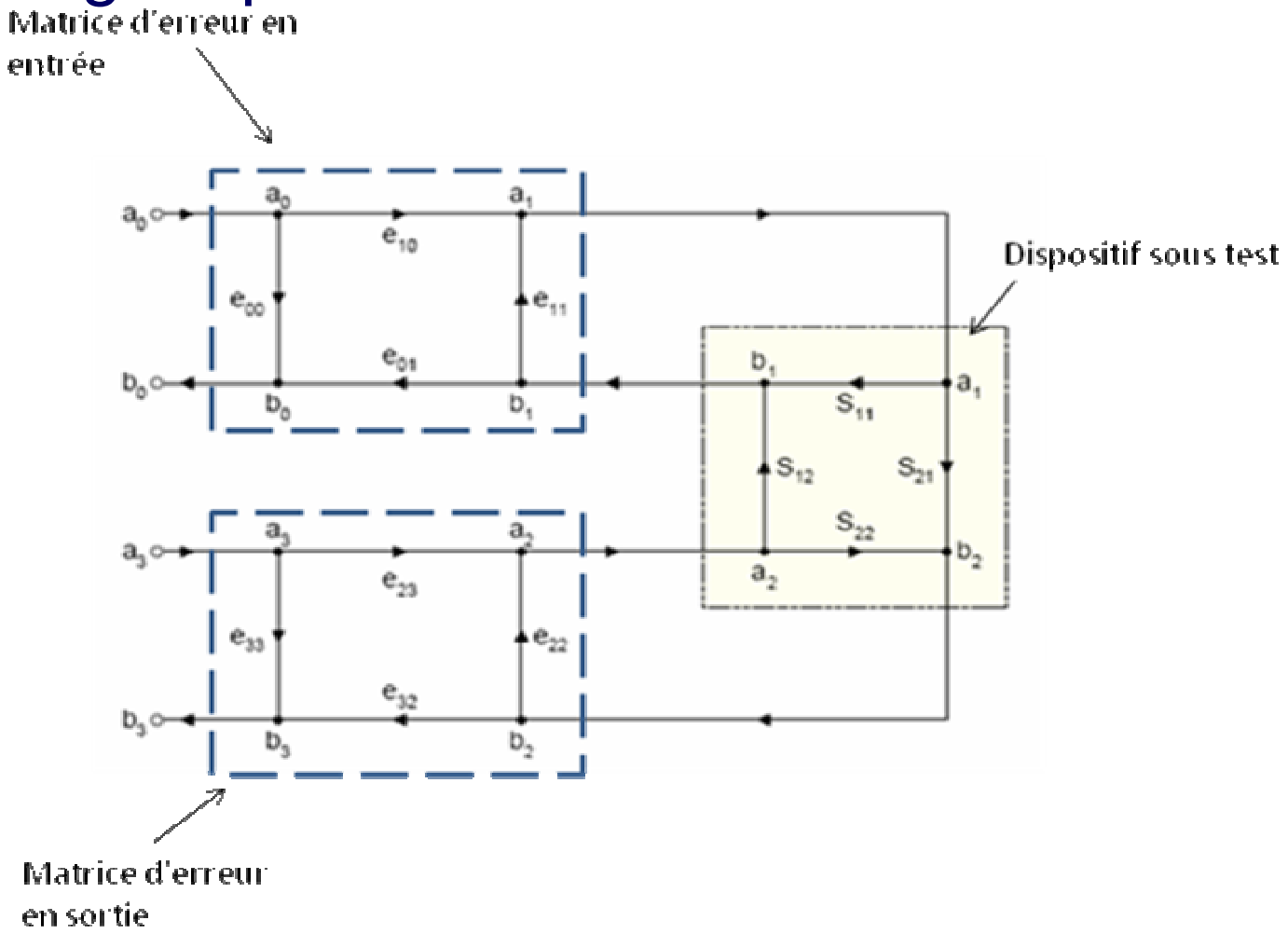
Mode *forward*



Mode *reverse*

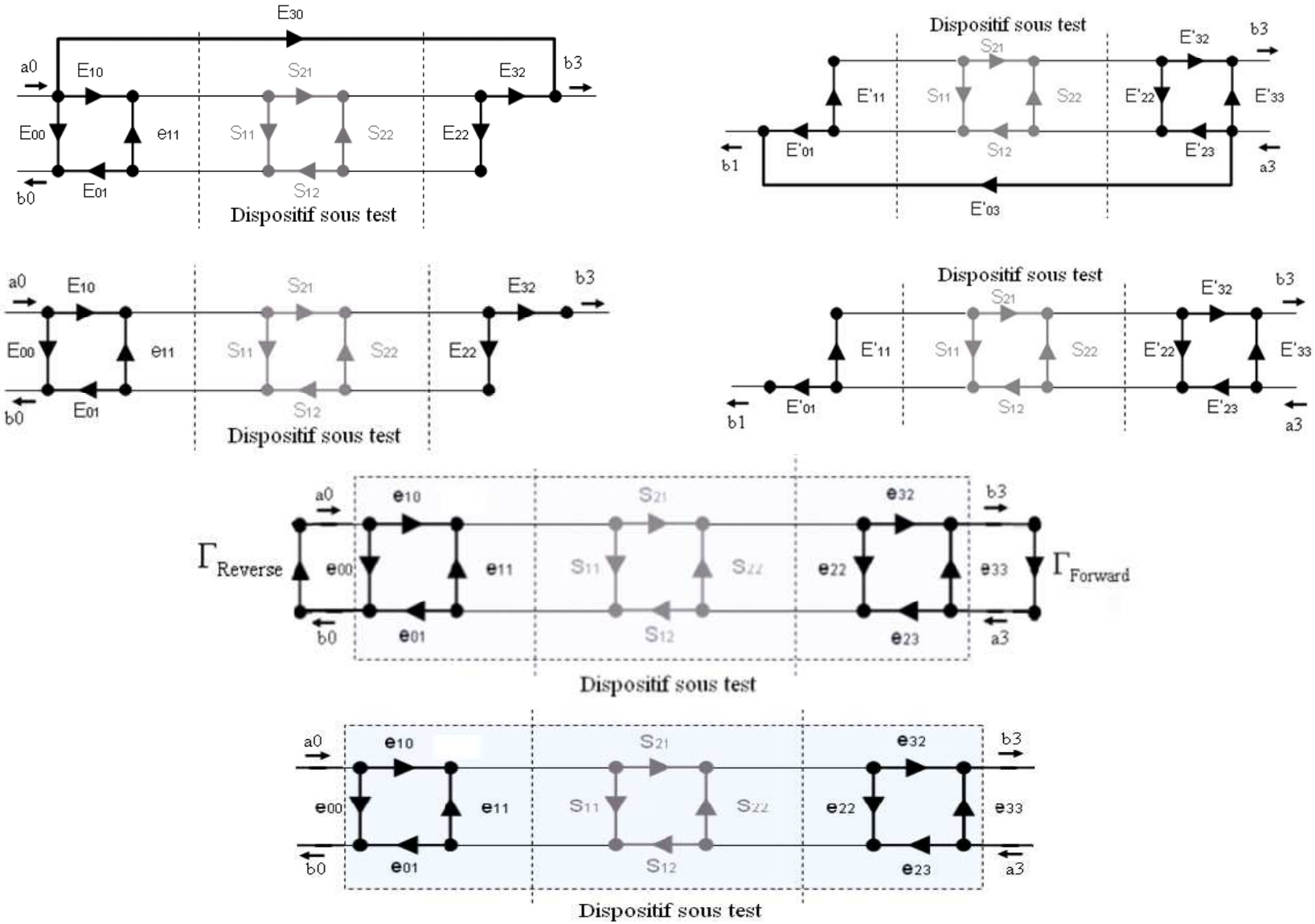
SOLT

- Étalonnage 2 ports sur un modèle à 8 termes d'erreur



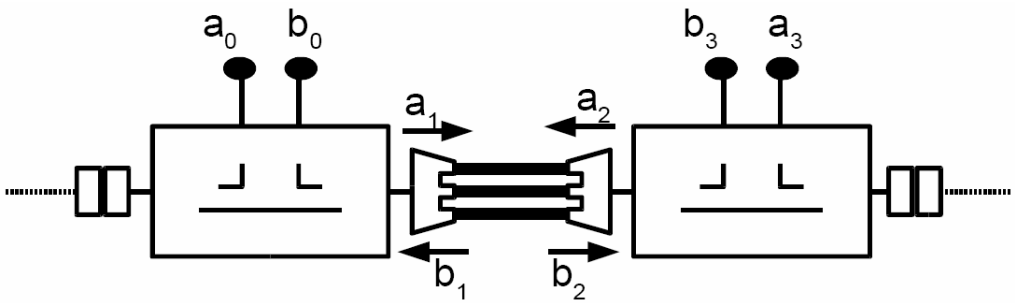
TRL, Multiline, TRM, …

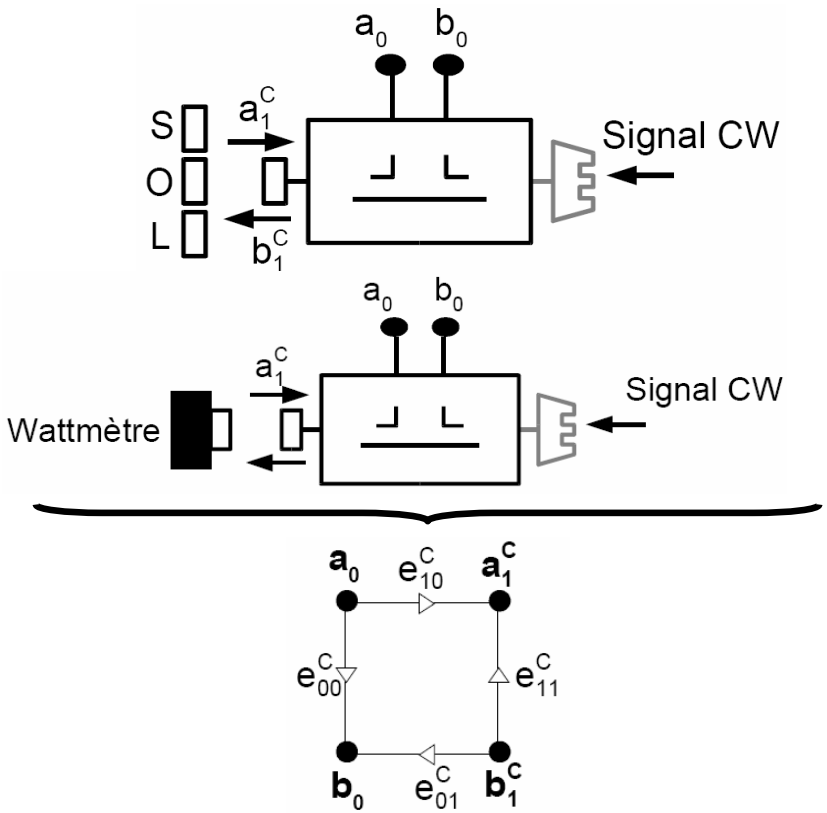
Modèle à 8 ou 12 termes ?

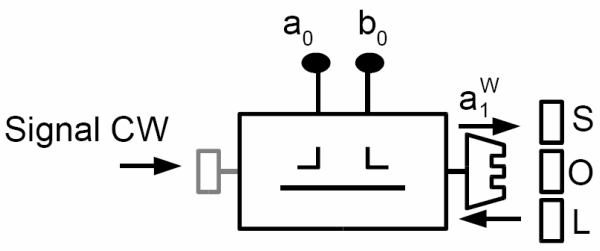


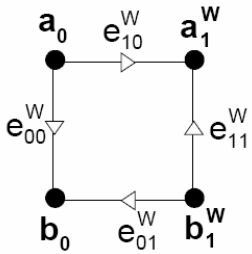
L'analyseur de réseau vectoriel

- Étalonnage absolu sous pointes









$$S_{12} = S_{21}$$

$$|e_{10}^W| = \left|\sqrt{\frac{(e_{01} \cdot e_{10})^W}{(e_{01} \cdot e_{10})^C}}\right| \cdot |e_{10}^C|$$

SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- **Le de-embedding**
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

De-embedding

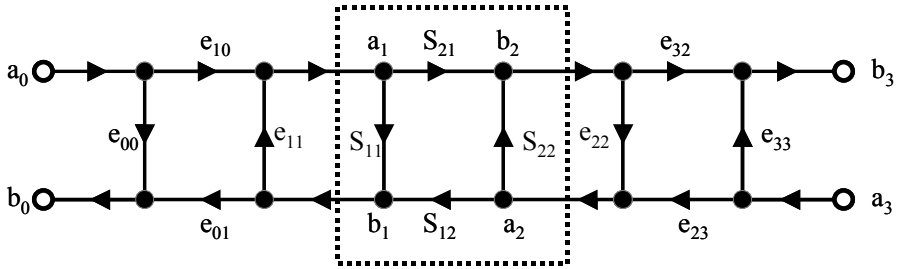
- Toutes les méthodes d'étalonnage à 8 termes sont basées sur un de-embedding des ports de mesure.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

$$[T] = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} S_{12}.S_{21} - S_{11}.S_{22} & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{bmatrix}$$

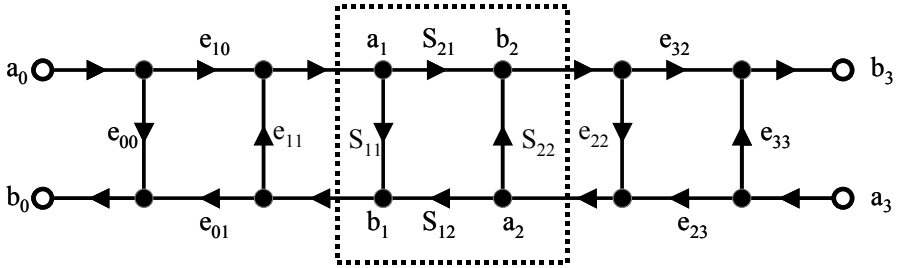
$$[S] = \frac{1}{T_{22}} \begin{bmatrix} T_{12} & T_{11}.T_{22} - T_{12}.T_{21} \\ 1 & -T_{21} \end{bmatrix}$$



$$[T_M] = [T_X].[T].[T_Y]$$

De-embedding

De-emdedding d'un pied de test connu sur des paramètres [S]



$$[T_M] = [T_X].[T].[T_Y] \longrightarrow [T_X]^{-1}.[T_M].[T_Y]^{-1} = [T] \longrightarrow [S]$$

De-emdedding à partir de mesures d'ondes a1, b1…

Par définition,

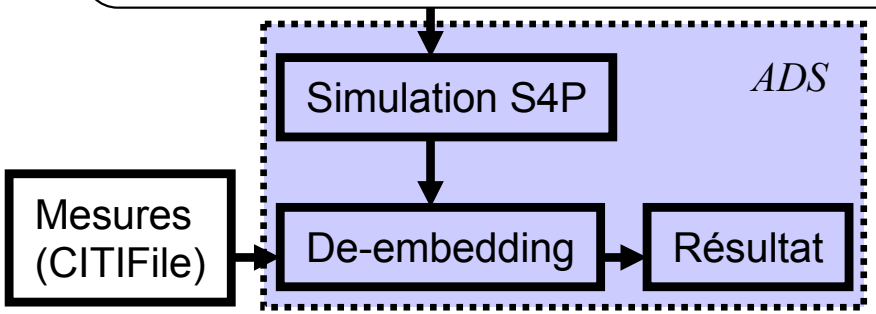
$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

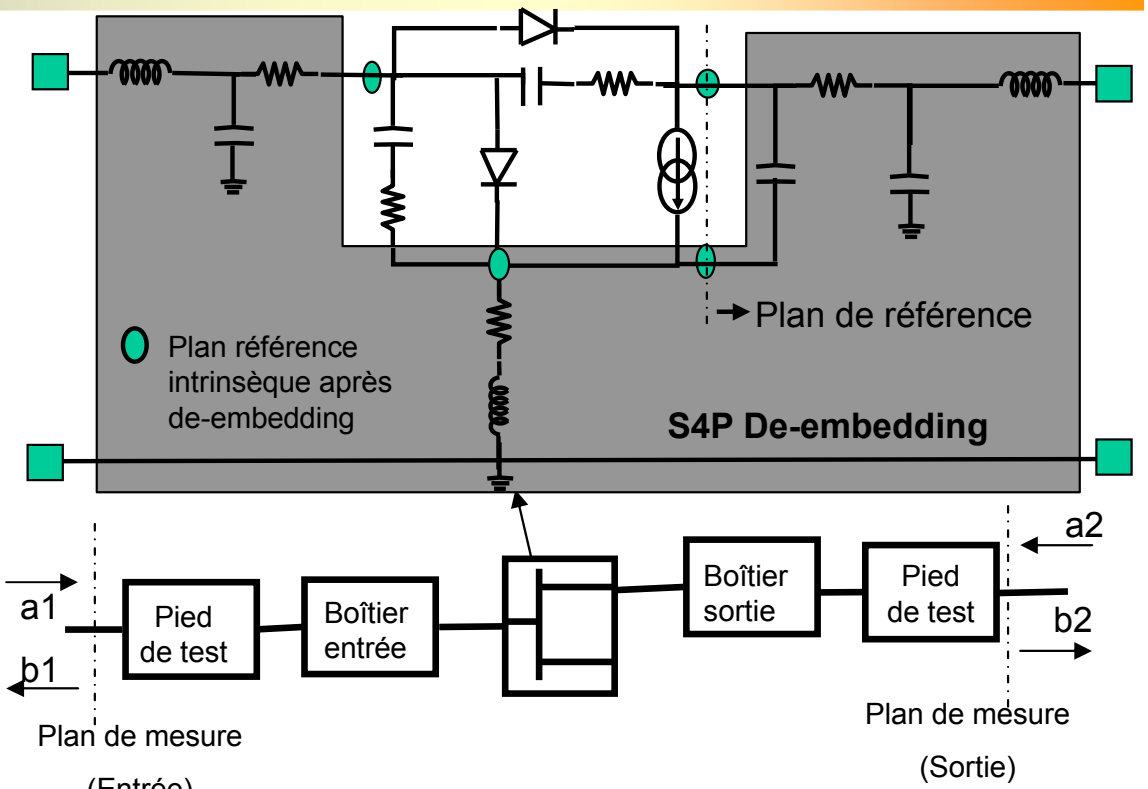
Calcul des ondes directement avec les matrices [T] ou leurs inverse.

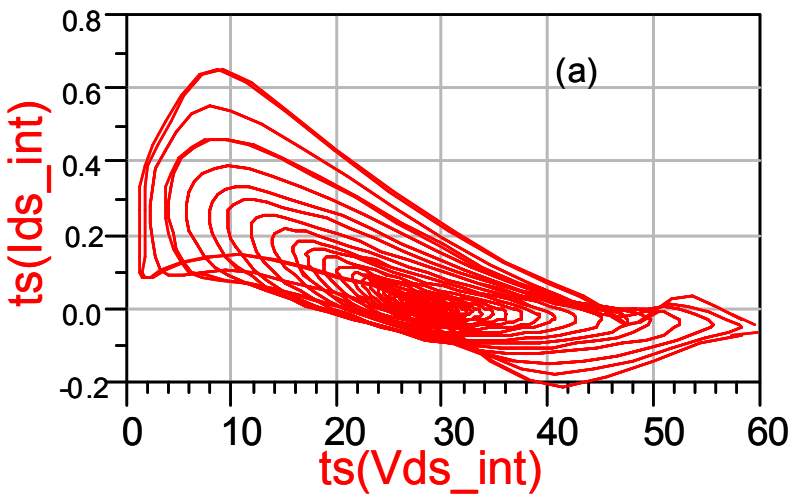
De-embedding

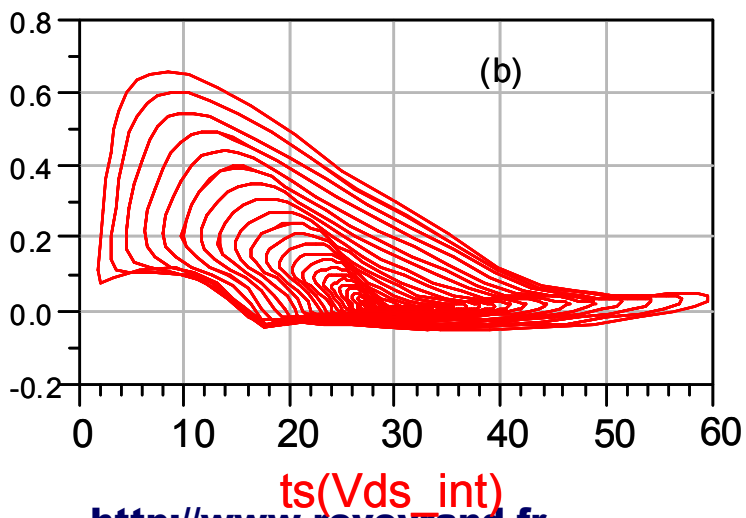
De-embedding au plus proche de la source de courant

- Éléments du pied de test (S2P) ;
- Éléments localisés du modèle de boîtier ;
- Éléments extrinsèques du transistors ;





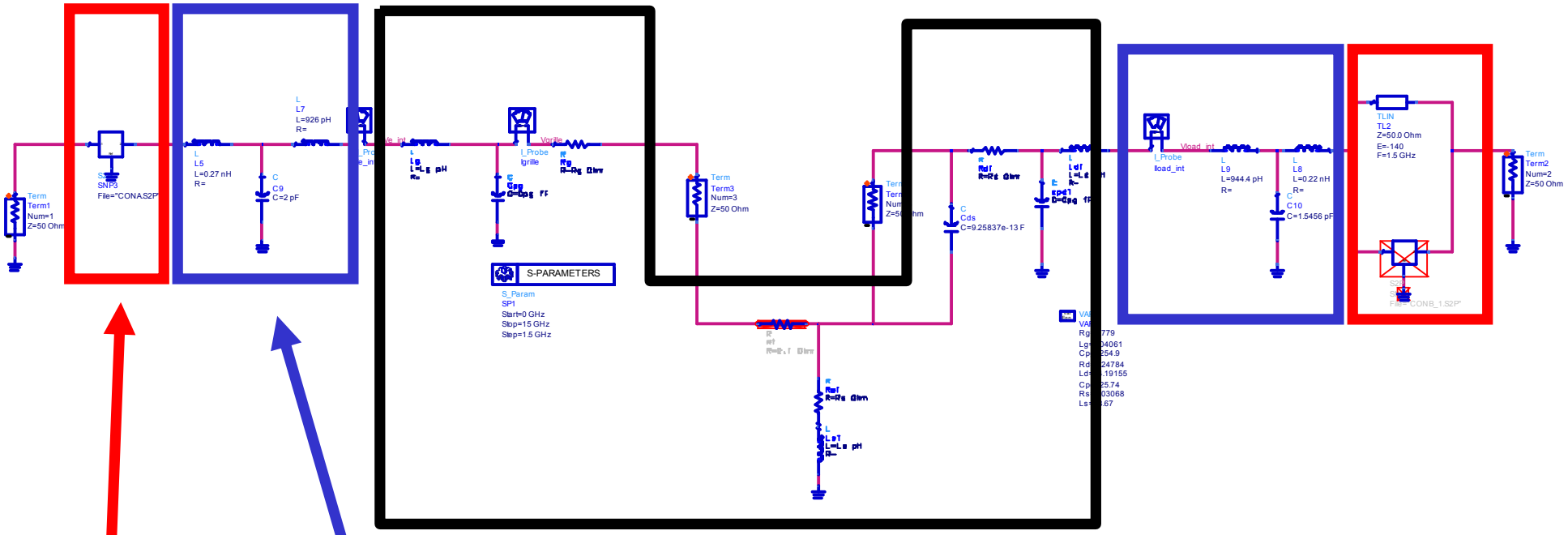




a : mesure
b : simulation

De-embedding

Simulation en S4P pour de-embedding…

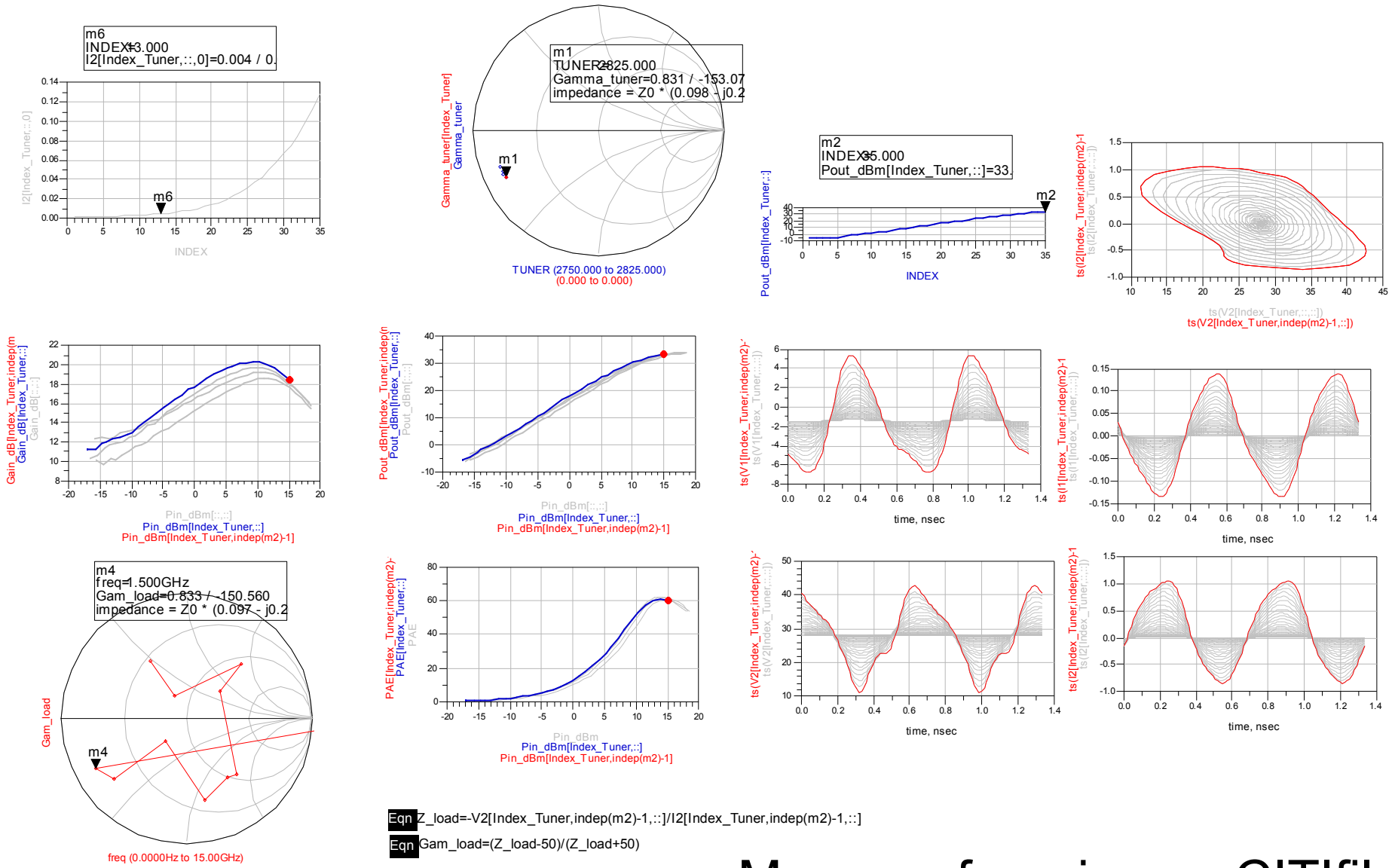


Pied de test

Boitier du transistor

Extrinsèques du transistor

De-embedding



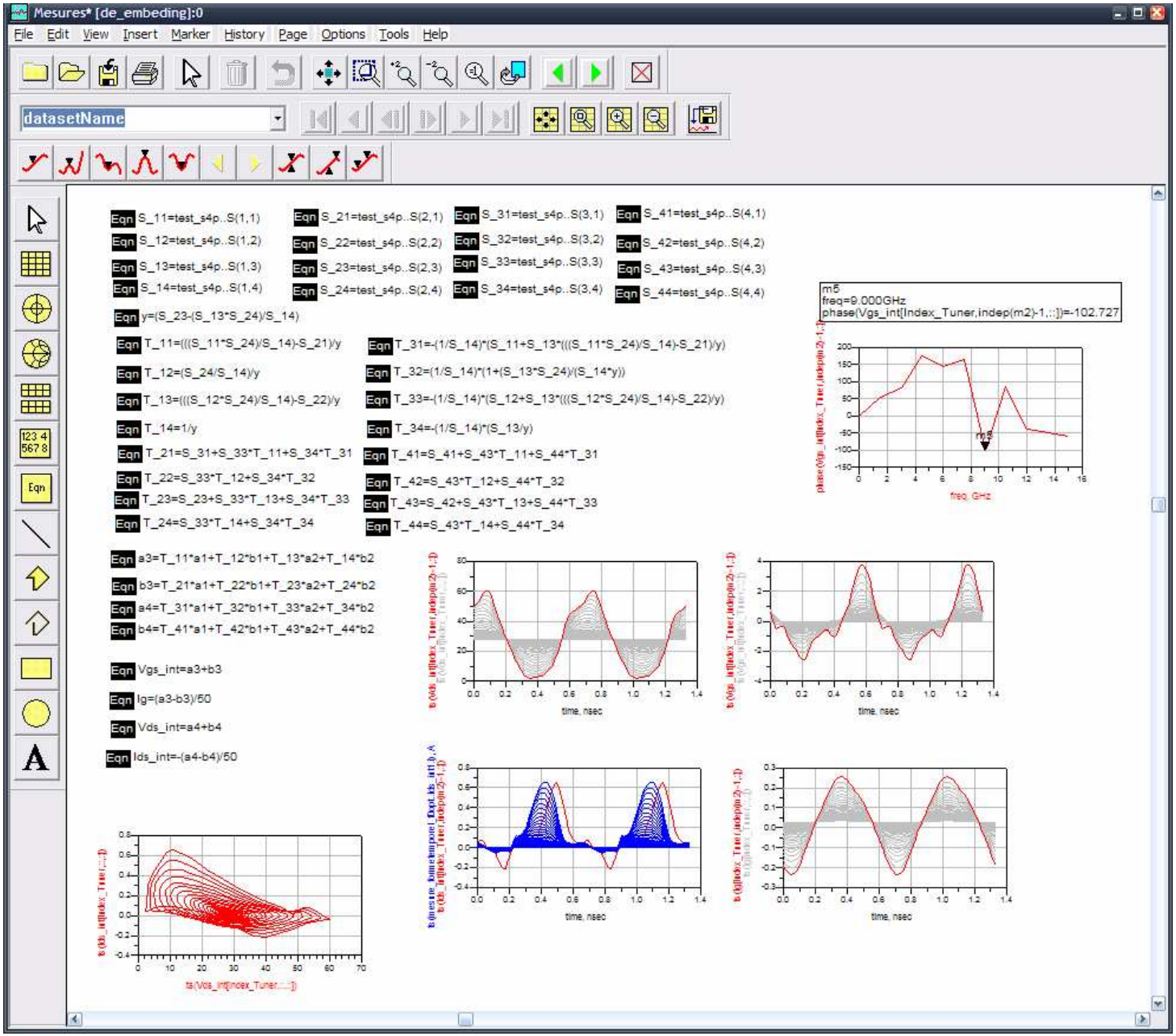
Eqn Z_load=-V2[Index_Tuner,indep(m2)-1,::]/I2[Index_Tuner,indep(m2)-1,::]

Eqn Gam_load=(Z_load-50)/(Z_load+50)

Mesures fournies en CITIfile

De-embedding

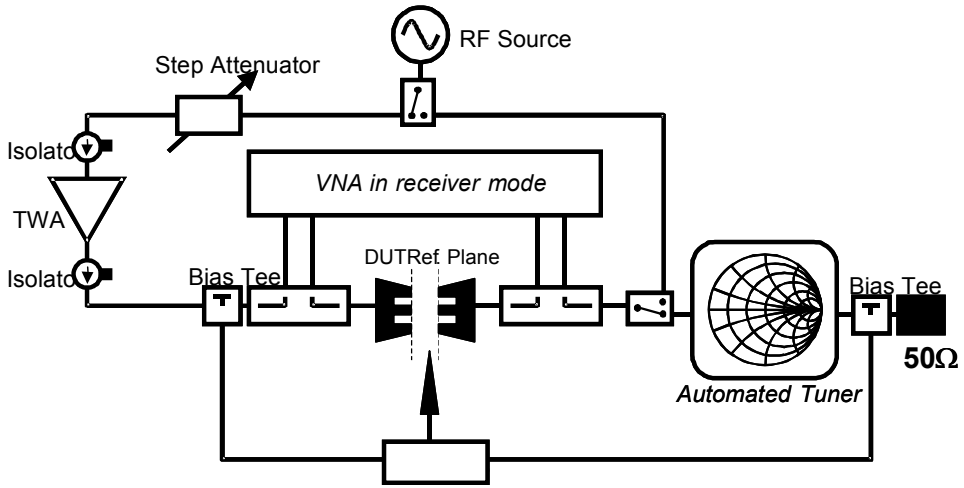
Le De-embedding est rentré en équation dans un data-display.

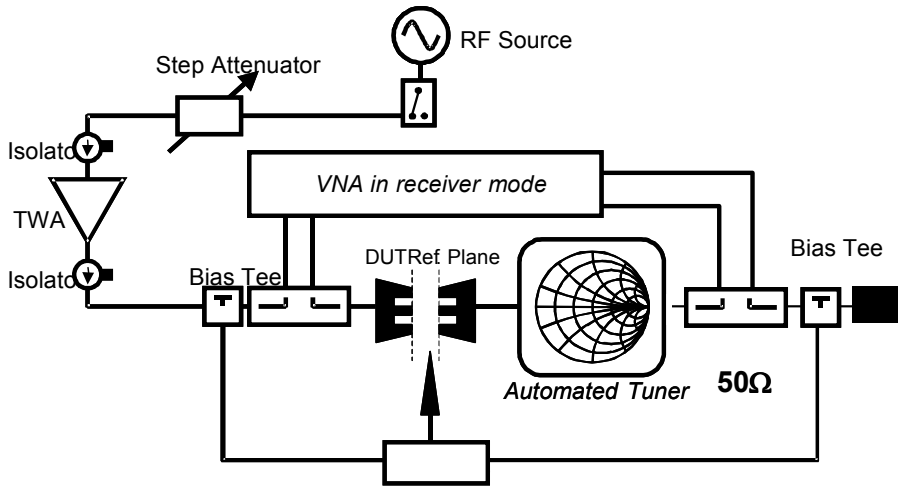


SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- **Différentes structures de banc Load-pull**
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Bancs de Load-Pull





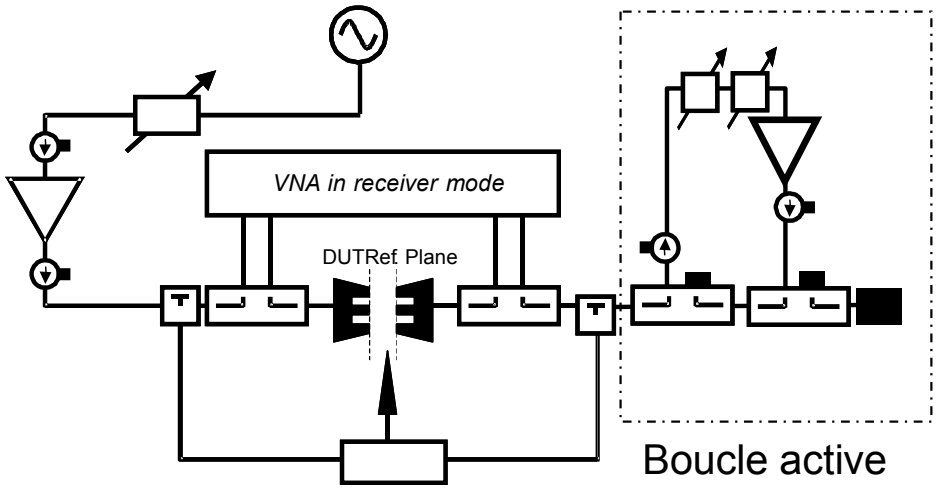
Bancs de Load-Pull PASSIFS avec mesure des ondes absolues

Avantage(s) ?

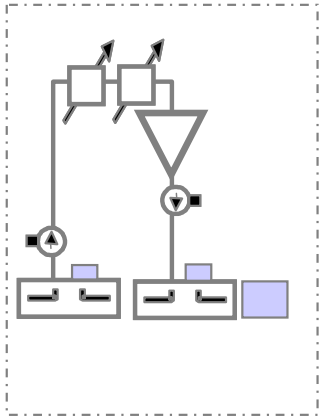
Désavantage(s) ?

Bancs de Load-Pull

Bancs de Load-Pull ACTIFS



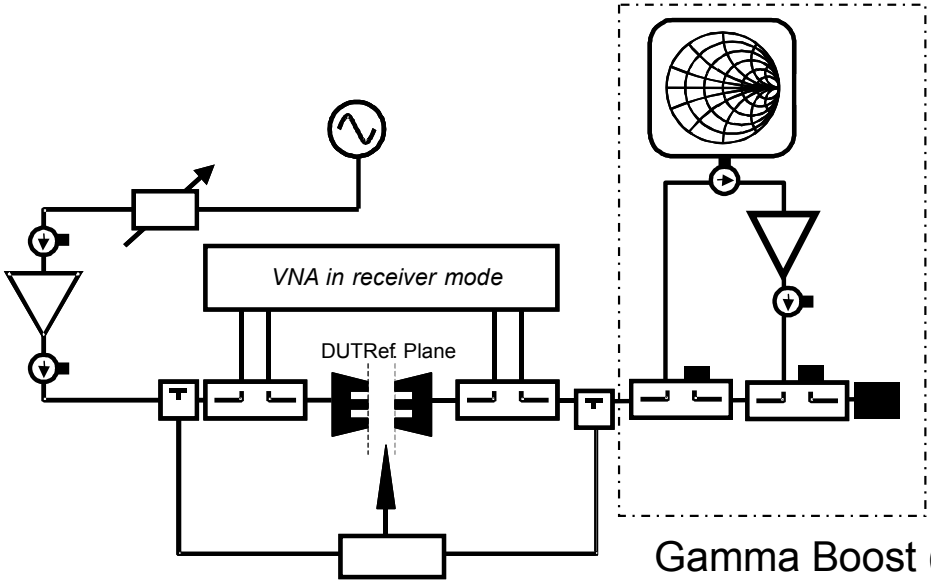
Boucle active



Boucle active #2

Avantage(s) ?

Désavantage(s) ?

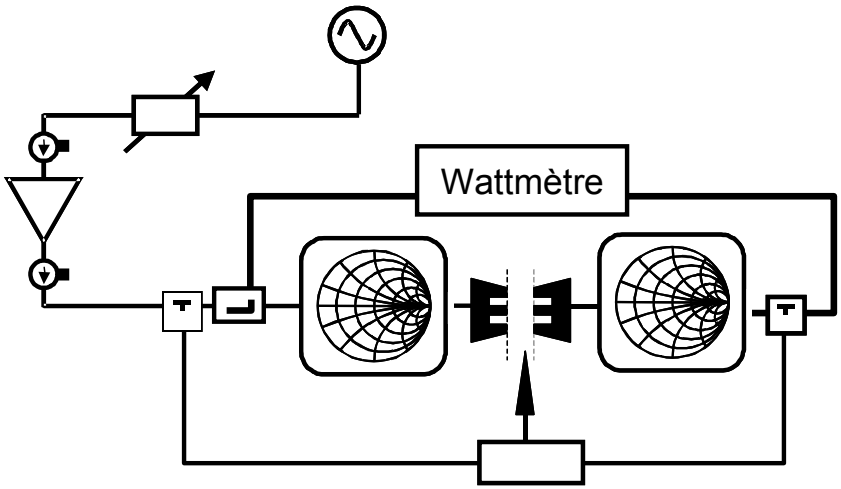


Gamma Boost (2eme tuner dans ce cas)

⚠ S'assurer que le signal est correctement filtré dans les boucles sinon oscillations assurées.

Bancs de Load-Pull

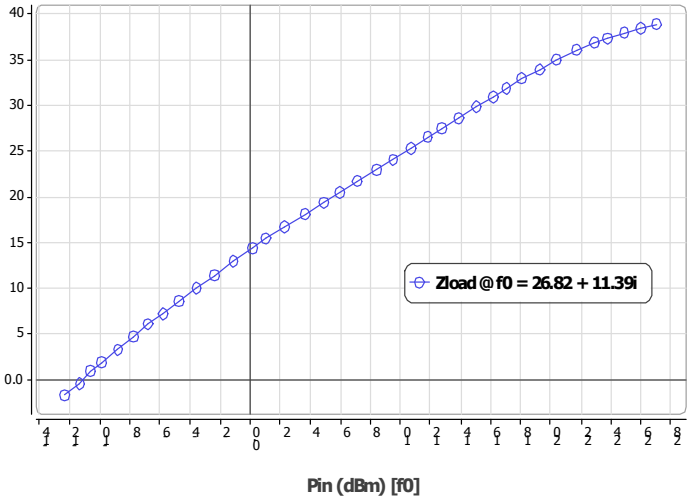
Banc de Load-Pull PASSIFS avec mesure au wattmetre



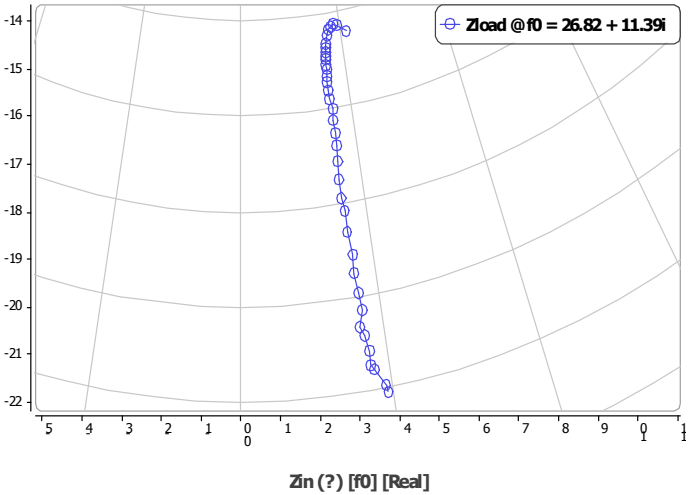
Avantage(s) ?

Désavantage(s) ?

Ps/Pe sur 1 impedance



Variation du Zin (polaire)



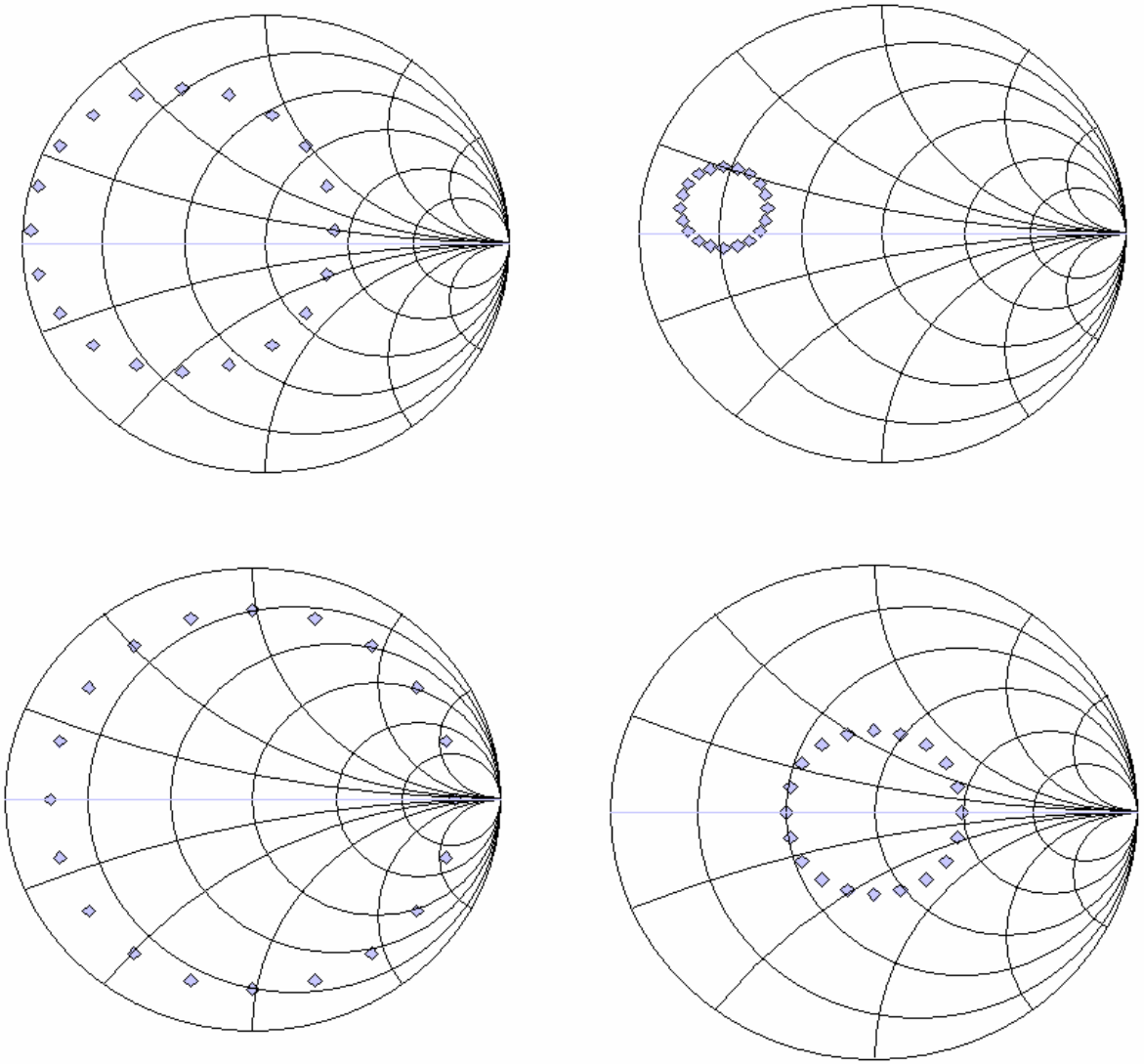
SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- **Mesures à TOS constant**
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Mesures à TOS constant

$$\Gamma_0 = 0.7e^{j.170°}$$

$$\Gamma_0 = 0$$



VSWR = 10

VSWR = 2

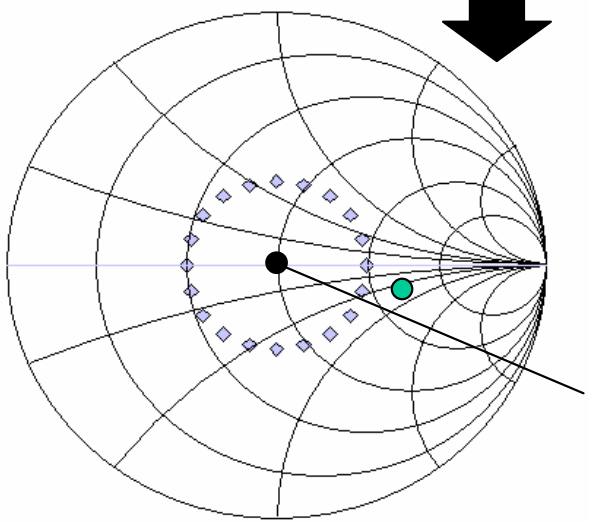
Mesures à TOS constant

- Comment calculer le TOS ?

$$\Gamma\Big|_{Zo=Zopt} = \frac{Z - Z^*_{opt}}{Z + Z_{opt}}$$

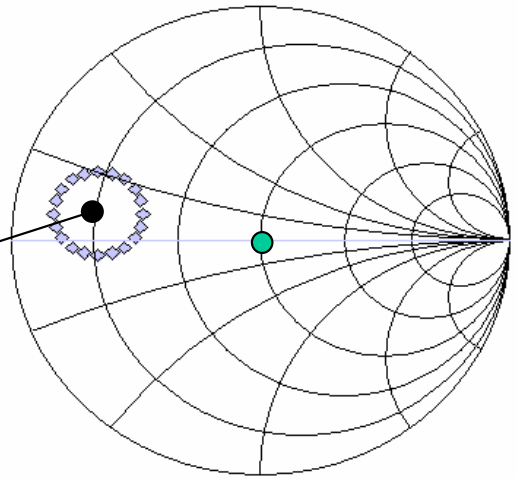
Le TOS est calculé pour une impédance optimale.

Le cercle est retracé sur un abaque référencé sur 50 ohms afin de connaître le coefficient de réflexion à réclamer au tuner.

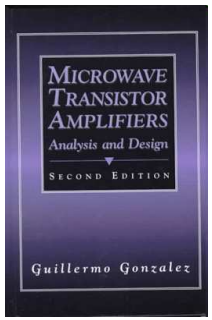


Abaque normalisé sur Zopt

Zopt



Abaque normalisé sur 50Ω



Guillermo Gonzalez, "Microwave transistor amplifiers – Analysis and design," Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jeffrey 07458, section 1. 7, pp. 45-55, August 1999.

SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- **Traitement des données de mesure**
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Visualisation des résultats

L'export des mesures se fait dans un format texte (ASCII)

`*.CST`

Format de mesure pour le lecteur IV-CAD de AMCAD Engineering. Ce lecteur requière un fichier de licence GRATUIT. Il suffit de se référencer sur le site de AMCAD.

http://www.amcad-engineering.fr/

`*.MDF`

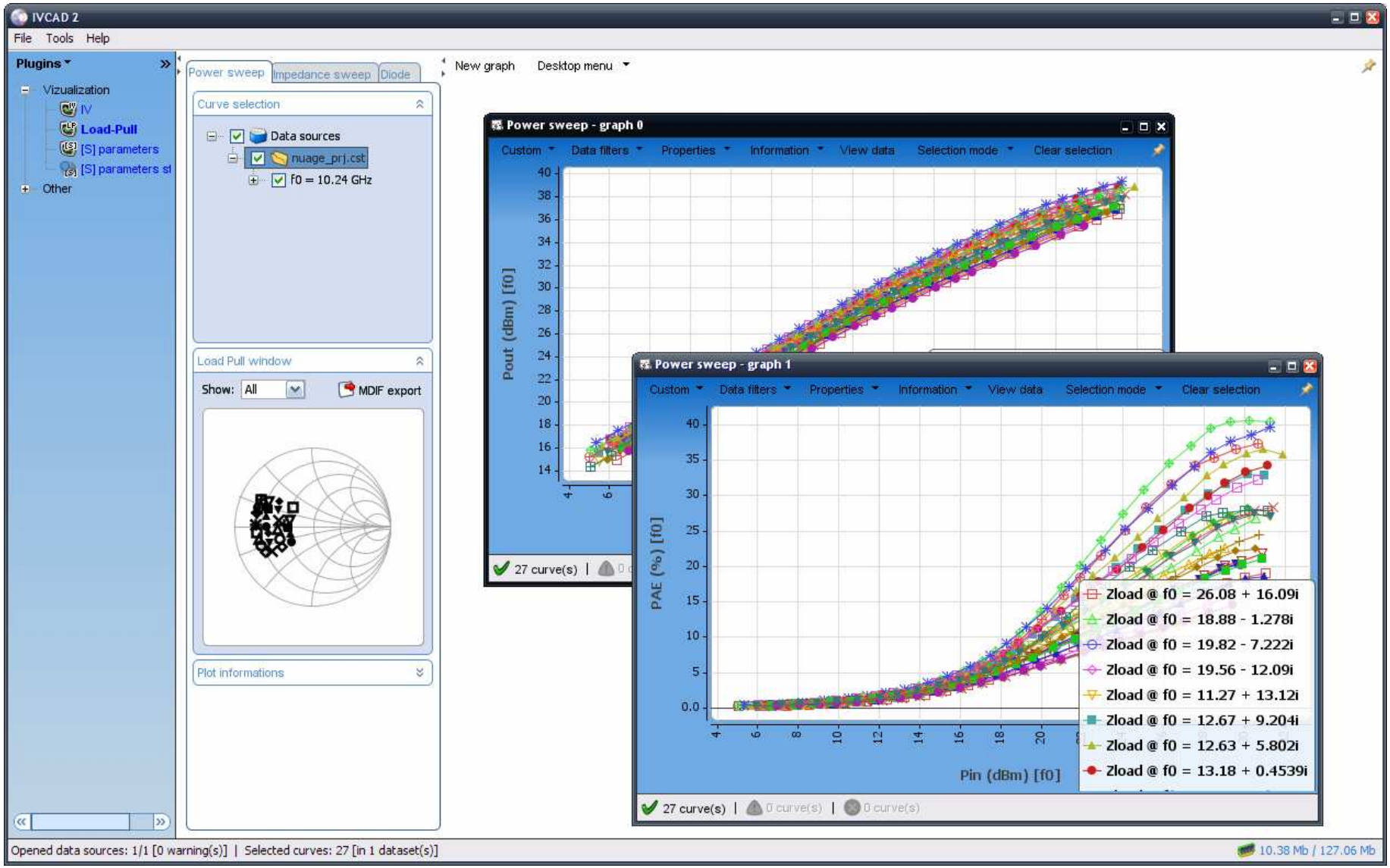
Format de mesure pour une feuille « design » de ADS.

`*.citi`

Format de mesure pour une feuille « display » de ADS.

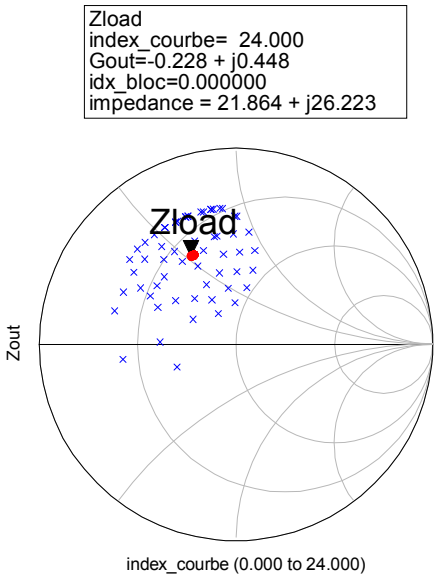
Visualisation des résultats

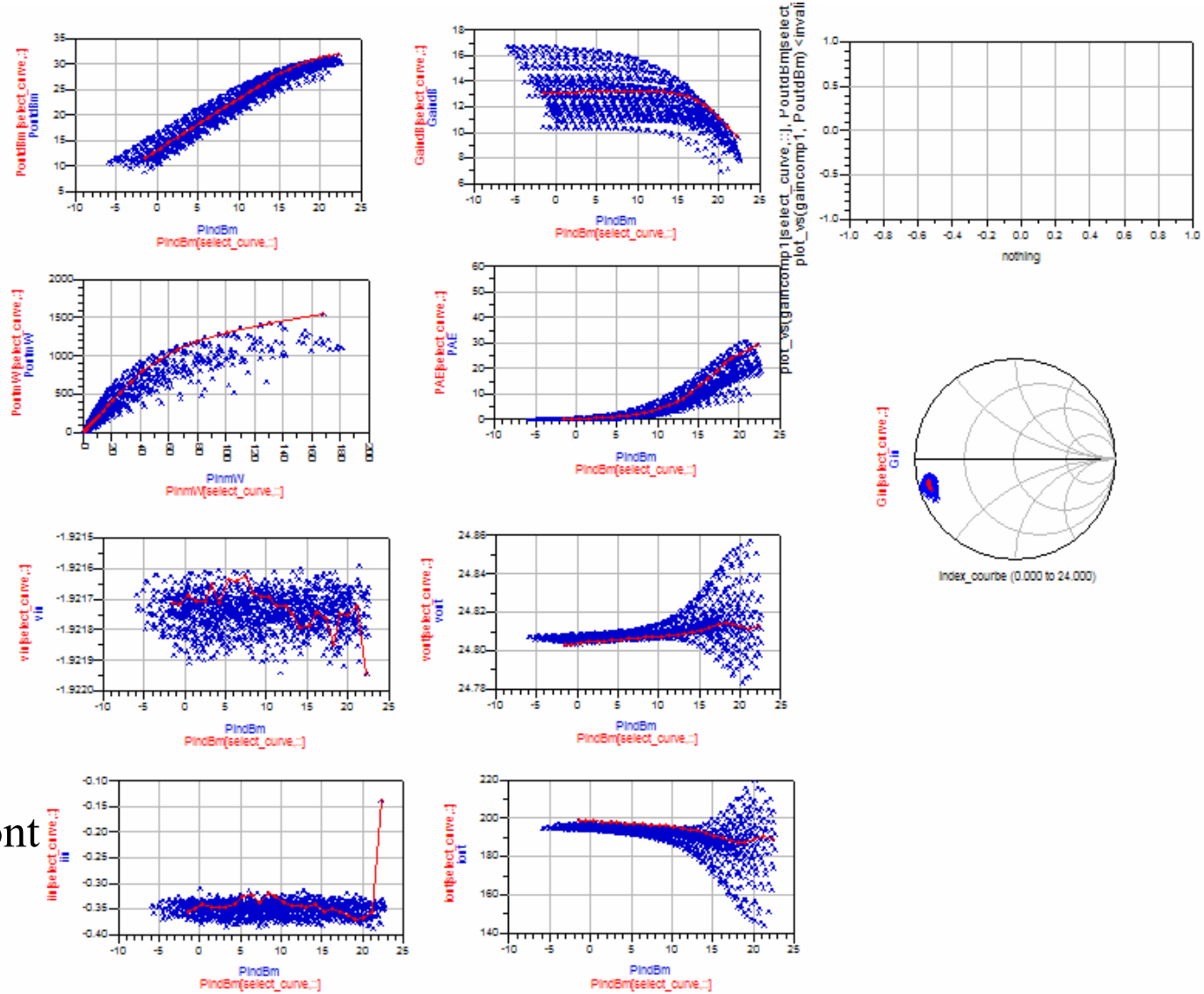
- Sous IV-CAD (Gratuit)



Visualisation des résultats

- Sous ADS (fichier MDF)





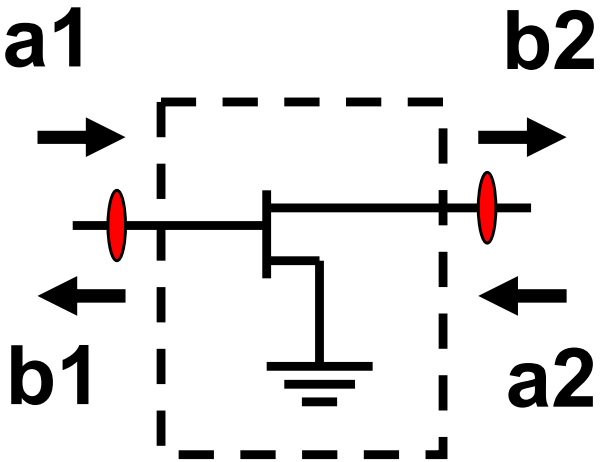
KORRIGAN

Les modèles pour HPA sont fournis avec ce type de mesure sous ADS

SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Smart Load-Pull



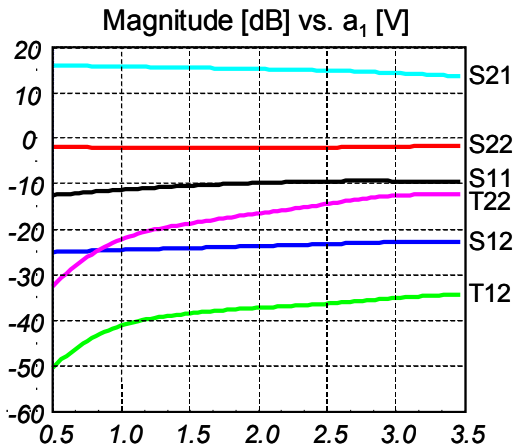
$$b_i = f_{NL}\left(a_1, a_2\right)$$

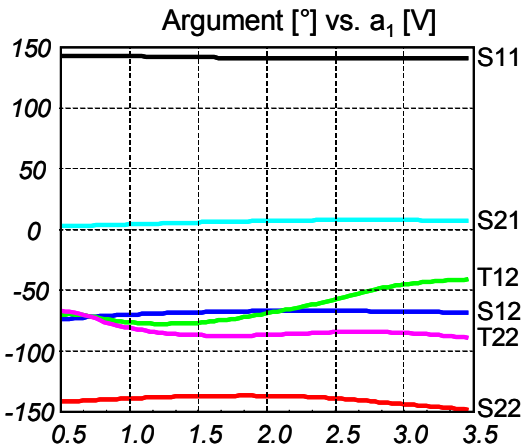
Développement de Mc Laurin ($a_2 \approx 0$)

$$b_i = S_{i1}\left(\left|a_1\right|\right).a_1 + S_{i2}\left(\left|a_1\right|\right).a_2 + T_{i2}\left(\left|a_1\right|\right).a_2^*$$

$$I_{DC\,i}\left(\left|a_1\right|\right)\Big|_{a2\approx 0} = J_i^0\left(\left|a_1\right|\right) + J_i^{1R}\left(\left|a_1\right|\right).\Re\left\{a_2\right\} + J_i^{1I}\left(\left|a_1\right|\right).\Im\left\{a_2\right\}$$

3 impédances nécessaires pour identifier les paramètres du modèle à chaque niveau de puissance.





Les ondes a et b sont définies ARBITRAIREMENT afin de rendre nulle a2 sur l'impédance désirée Zref

$$a_i = \frac{v_i + Z_{ref}.i_i}{2} \qquad b_i = \frac{v_i - Z_{ref}.i_i}{2}$$

Smart Load-Pull

- Une fois le modèle identifié, pour a1 et gamma donné, on a :

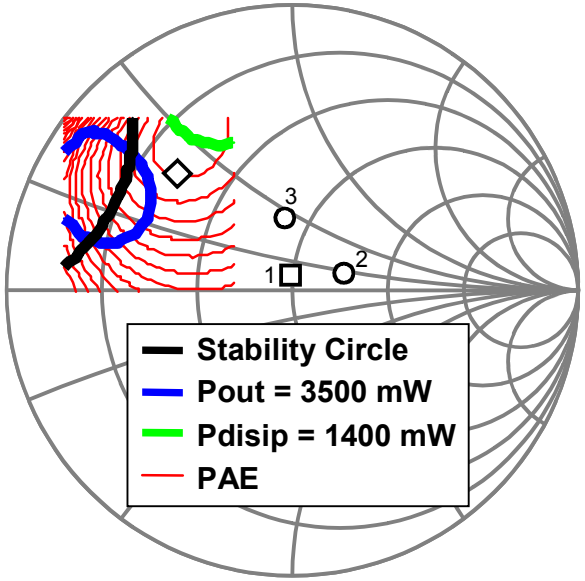
$$b_2 = \frac{\left[\left(1 - S_{22}^{*}.\Gamma_{Load}^{*}\right).S_{21}\right].a_1 + \left[T_{22}.\Gamma_{Load}{}^{*}.S_{21}^{*}\right].a_1^{*}}{\left(1 - S_{22}^{*}.\Gamma_{Load}^{*}\right).\left(1 - S_{22}.\Gamma_{Load}\right) - \left|T_{22}\right|^2.\left|\Gamma_{Load}\right|^2}$$

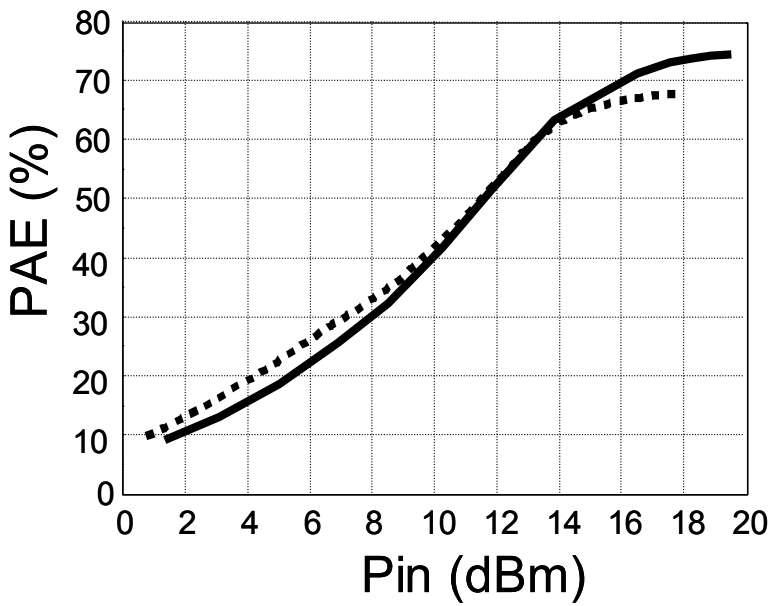
$$a_2 = \Gamma_{Load}.b_2$$

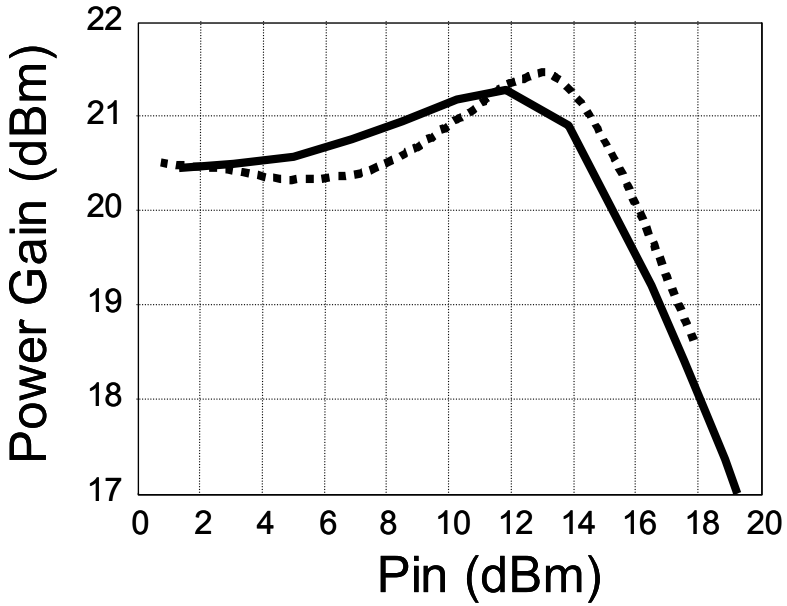
$$b_1 = S_{11}.a_1 + S_{12}.a_2 + T_{12}.a_2^{*}$$

Smart Load-Pull

- Itération 1 : Identification sur 50 Ohms

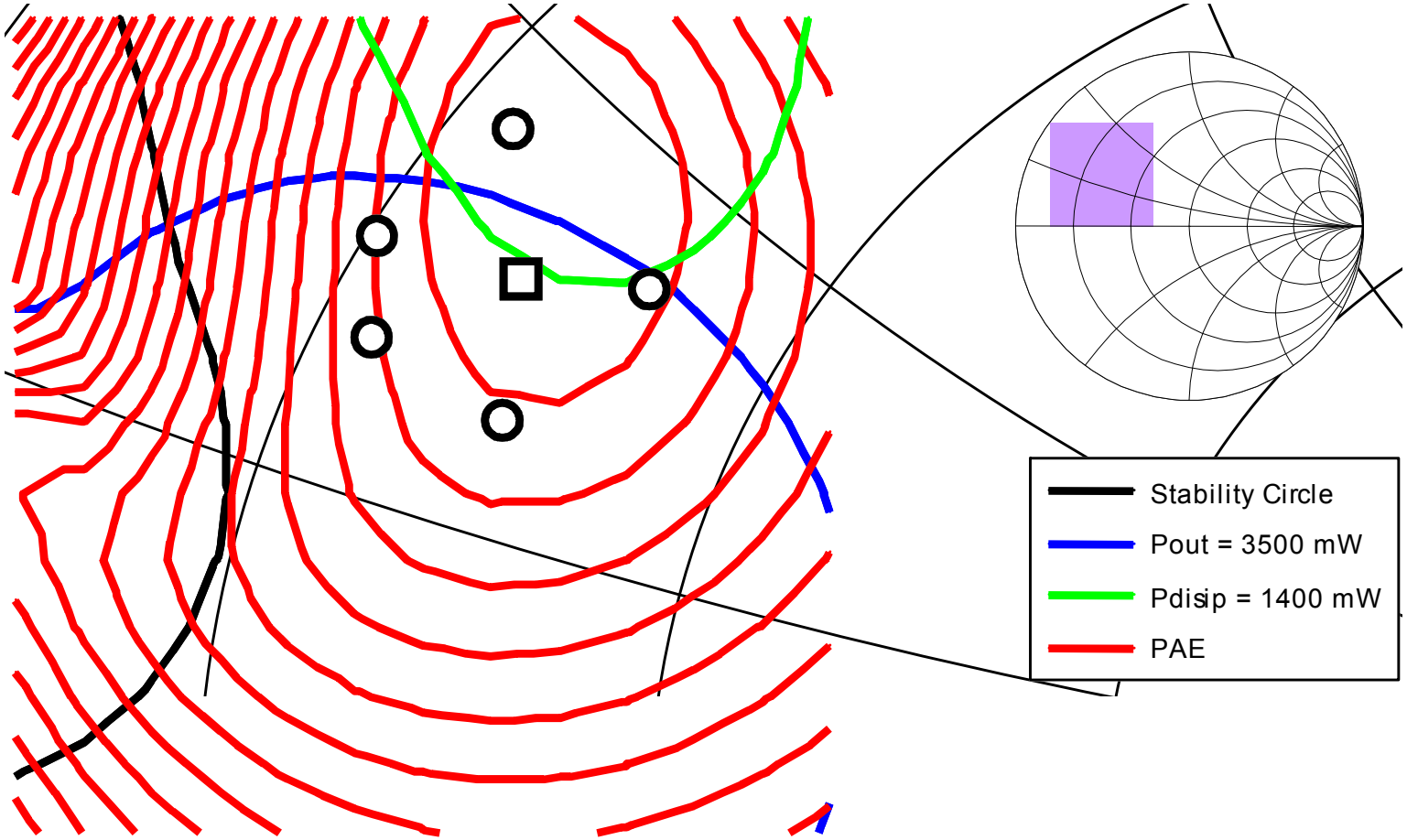






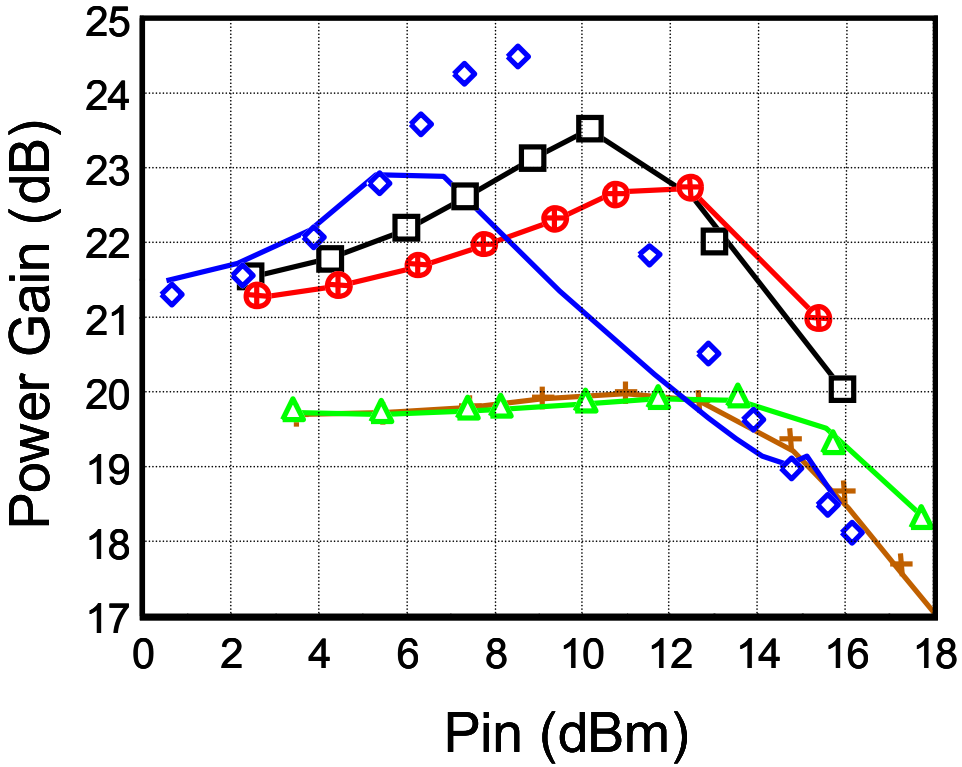
Smart Load-Pull

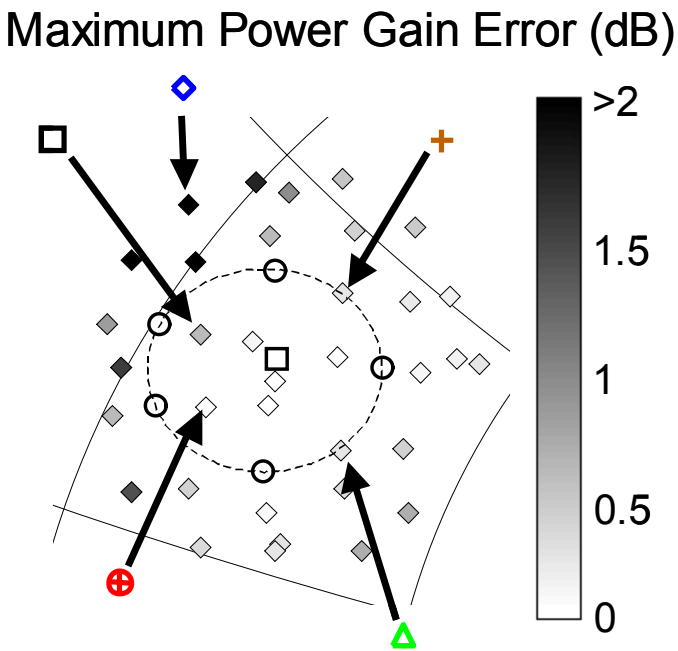
- Itération 2 : Identification sur une charge optimale



Smart Load-Pull

- Résultats pour la seconde itération





SOMMAIRE

- Introduction
- Les standards d'étalonnage
- L'analyseur de réseau vectoriel
- Le de-embedding
- Différentes structures de banc Load-pull
- Mesures à TOS constant
- Traitement des données de mesure
- Le « Smart Load-Pull »
- Conclusion

Conclusion

- Étalons relatifs
- Étalons absolus
- Étalonnage du banc – 8 et 12 termes d'erreurs
- Méthodes de de-embedding de mesures S2P et S4P
- Structures possibles pour un banc de load-pull
- Visualisation des résultats
- Méthode de recherche de Zopt

That' s all

Merci de votre attention