VSA-based measurements for power amplifier linearity assessment

P.Medrel, J.Sombrin, J.M.Nebus, P.Bouysse, T.Reveyrand, R.Quere
XLIM-CNRS- Univ. Limoges

Paris, jeudi 23 Mars 2017

Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

Problématiques des futures liaisons haut débit

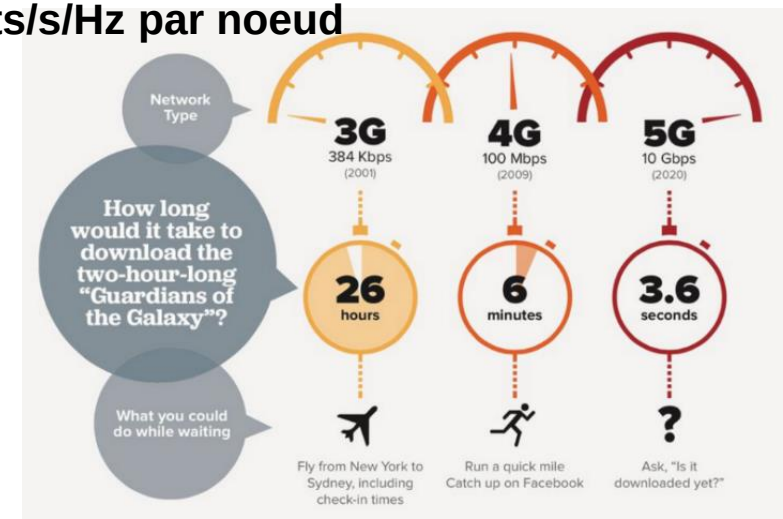
Besoins ciblés d'un système 5G par rapport à 3G/4G:

- **débit** : augmentation **100X- 1000X**
- **Latence**: (4G #15 ms) **diminuée de 15X**
- **Energie et coût**: diminution **100X** du coût en Joules et $/ bit transmis

Leviers technologiques ciblés pour l'augmentation du débit :

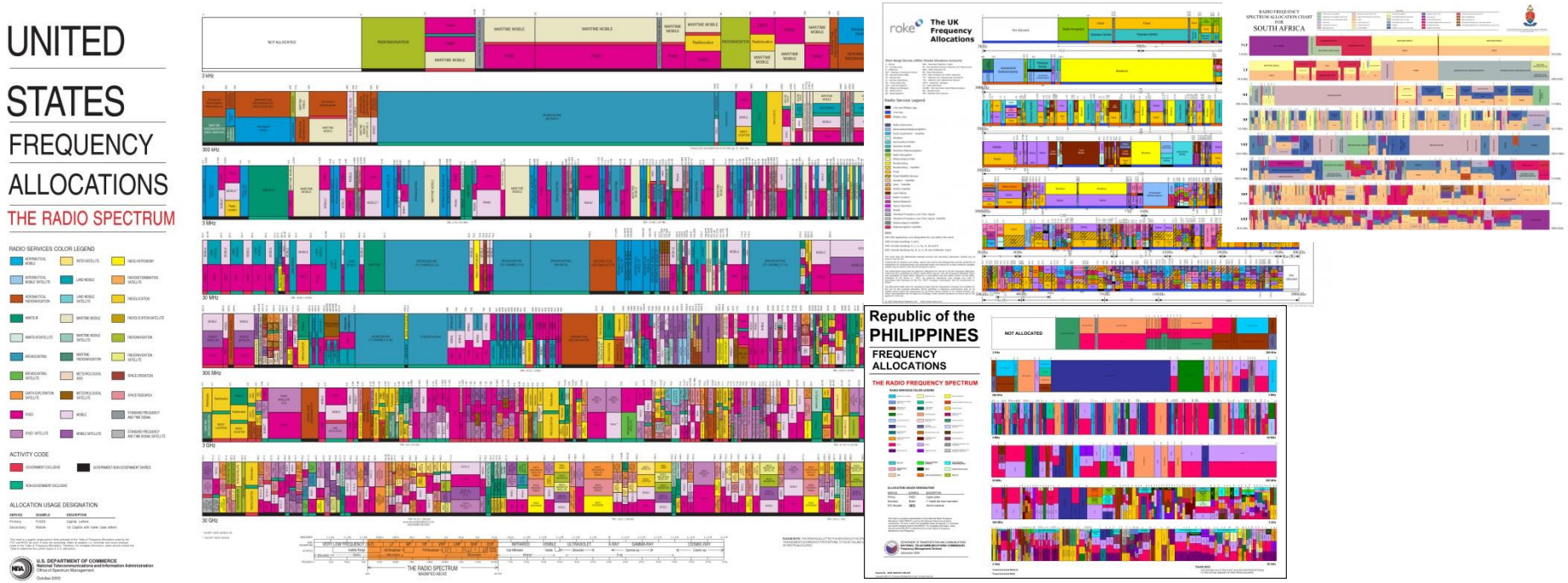
- Densification et virtualisation du réseau : **noeuds actifs par zone et par Hz**
- Augmentation forte de la bande passante : migration vers **mmW& WiFi 5GHz**
- Augmentation de l'efficacité spectrale : (massive) MIMO / emploi de formats de modulation à forte efficacité spectrale pour transmettre plus de **bits/s/Hz par noeud**

« What Will 5G Be ?» Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V. Hanly, Angel Lozano, Anthony C. K. Soong, andJianzhong Charlie Zhang IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL.32, NO.6, JUNE 2014



→ évolutions nécessaires des technologies RF/hyperfréquences du frontal RF pour supporter l'explosion de la capacité des liaisons attendue

Problématiques des futures liaisons haut débit

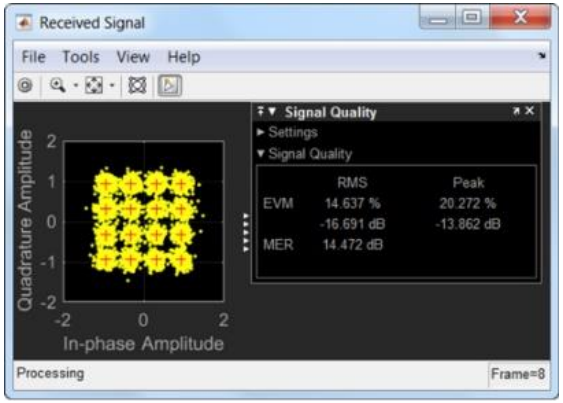


- Fort morcellement et congestion dans la bande ISM ‘**beachfront spectrum**’ (qq 100MHz – qqGHz)

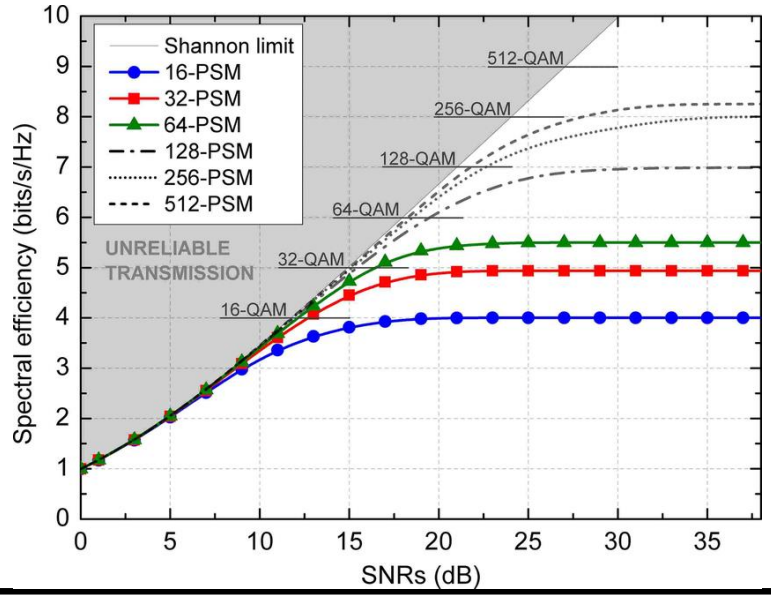
- **Bande passante instantanée pour transmettre de plus en plus limitée et régulée**

Problématiques des futures liaisons haut débit

- utilisation de modulations à fortes efficacités spectrales (3 voire 5, e.g QAM, techniques OFDM…)
  signaux utiles = formes d'ondes complexes à forts PAPR



- Densification des constellations
- Pour un rapport C/N donné : dégradation du BER

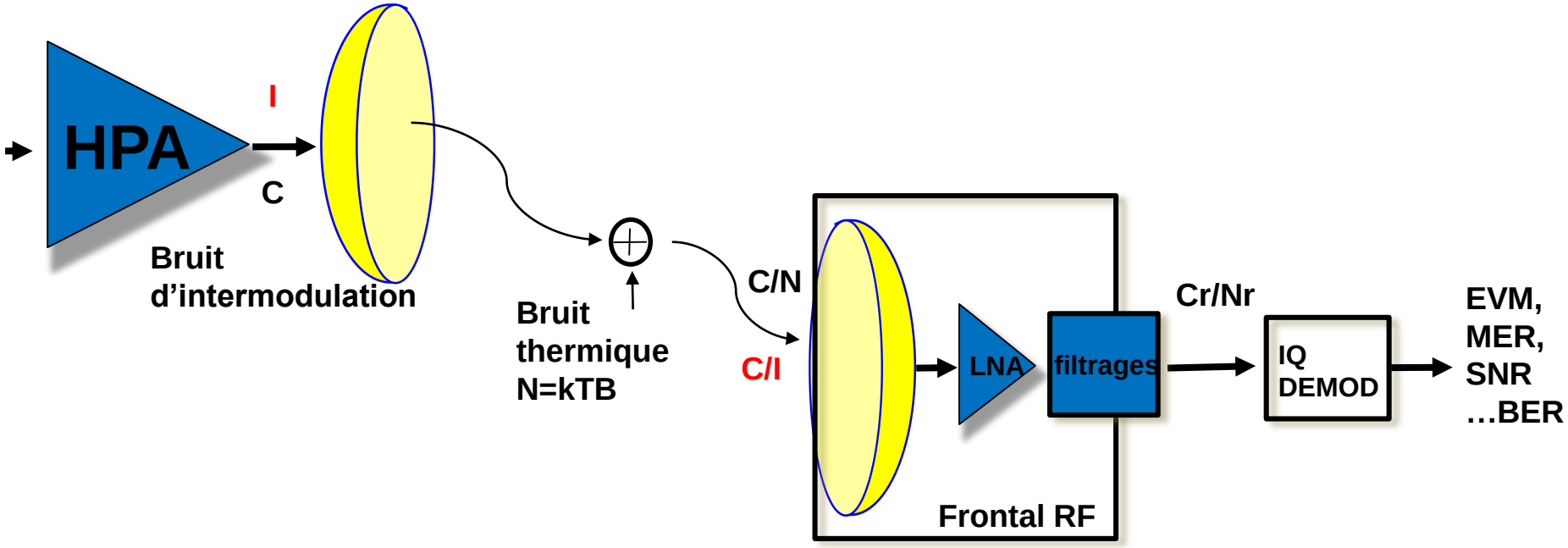


Capacités des liaisons limitées par le SNR requis au niveau du démodulateur

Problématiques des futures liaisons haut débit

Solution classique : augmentation de la puissance moyenne d'émission

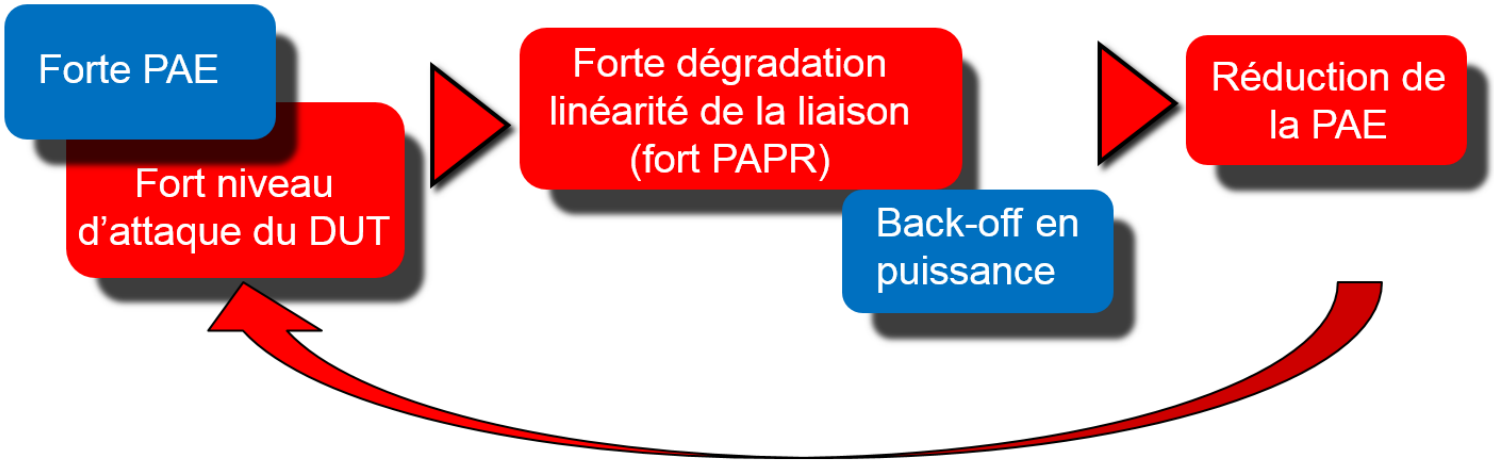
…mais, augmentation important du C/I, combiné au C/N , le SNIR est très fortement dégradé



- Fort niveau de linéarité nécessaire
- PA surdimensionné / recul en puissance
- **Effet catastrophique sur la consommation globale**

Conclusion :

- **fortes contraintes reportées sur le frontal RF**
- **fonction HPA levier fort pour l'optimisation des performances des émetteurs RF/hyper**

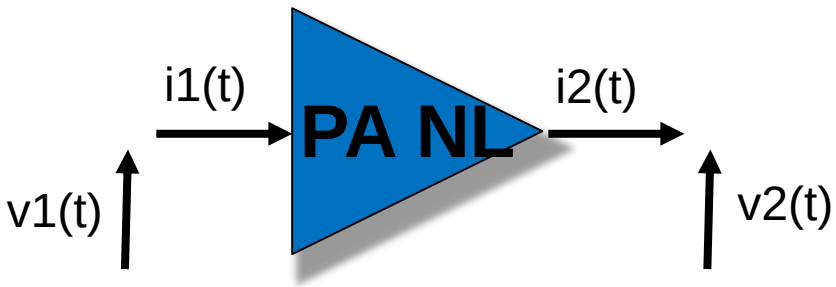


- Déploiement de solutions d'amplification **sobres en énergie, 'adaptatives'** (BW signal, consommation, puissance…)
- Caractérisations rendement/linéarité du DUT NL **proches des conditions finales d'utilisation**
- **Solutions de test & mesure dédiées**

Plan

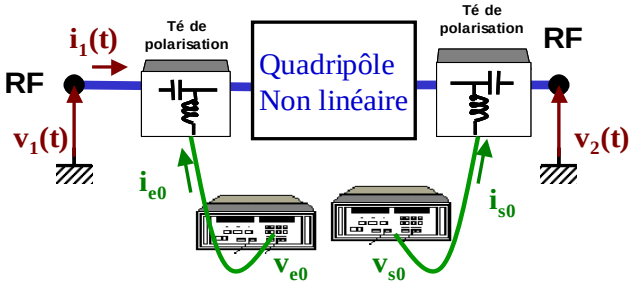
- Problématiques des futures liaisons haut débit
- **caractérisation des dispositifs non linéaires**
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

caractérisation des dispositifs non linéaires



$$v_{1\,DUT(t)} = V_{eO} + v_1(t)$$

$$i_{1\,DUT(t)} = I_{eO} + i_1(t)$$



$$v_{2\,DUT(t)} = V_{sO} + v_2(t)$$

$$i_{2\,DUT(t)} = I_{sO} + i_2(t)$$

→ **Objectif (idéal): connaissance des relations entre les réponses et les excitations**

$$\boldsymbol{i_1(t) = f_{NL}\big(v_1(t), v_2(t)\big)}$$

$$\boldsymbol{i_2(t) = f_{NL}\big(v_1(t), v_2(t)\big)}$$

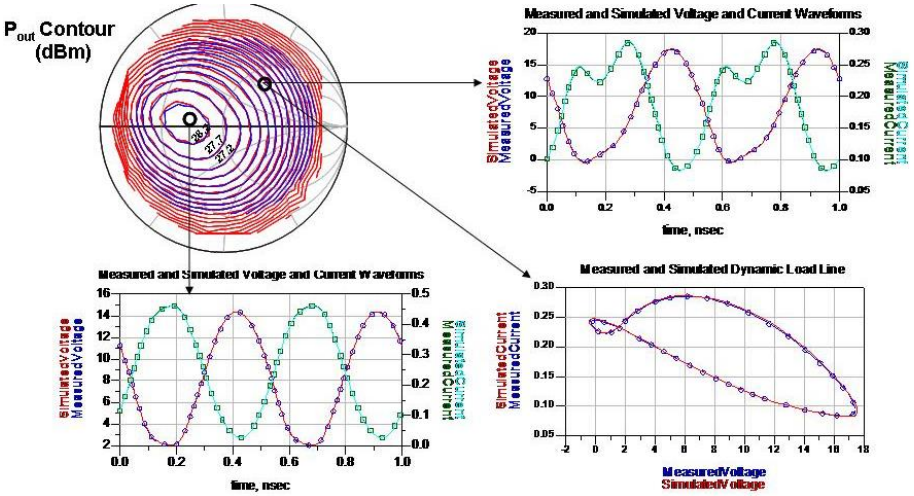
→ **Nécessite la connaissance absolue des 4 ondes a1(t),b1(t),a2(t) et b2(t) (mesure « full spectrum »)**

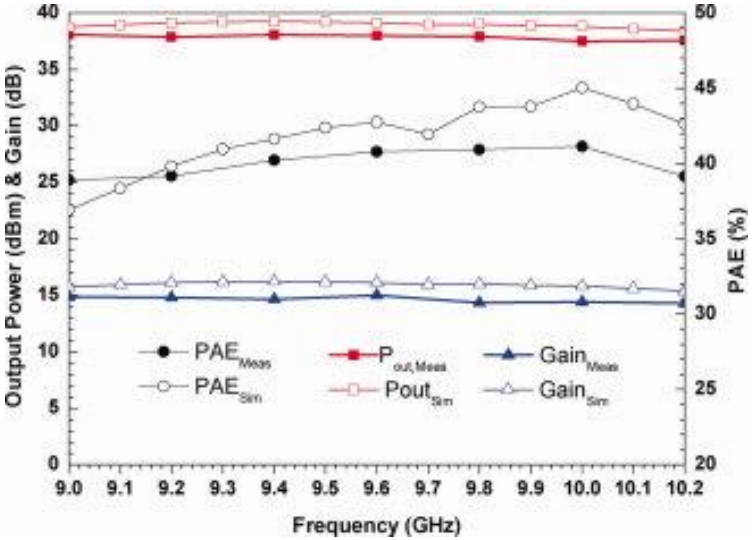
❑ caractérisation statique CW de puissance du DUT NL

→ Caractérisation en puissance moyenne (fréquentiel)

LP/SP balayées dans la bande utile (e.g. gain, puissance, PAE…)

→ + mesures des formes d'ondes temporelles





Validation d'étapes de conception , validation d'un modèle NL CAO
Pas de prise en compte des effets dynamiques, mesures en régime établi uniquement
–> extrapolation des performances du DUT en condition réelles d'utilisation ?

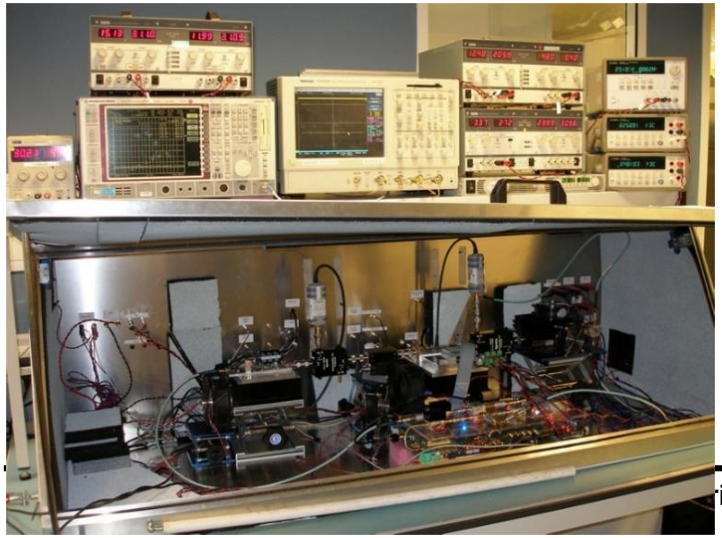
caractérisation des dispositifs non linéaires

❑ **Caractérisation avec le signal utile modulé :** mesures des dégradations apportées sur la modulation (EVM/MER … BER)

- Caractérisation des **performances fonctionnelles** du DUT NL **dans les conditions réelles de fonctionnemen**t (porteuses modulées /mutliplex, codage, précodage, DPD…) – **meilleures performances linéarisées du DUT (caractérisation/extraction/inversion/application)**

- Nécessité de générer et mesurer les modulations numériques (**appareils couteux spécifiques**)

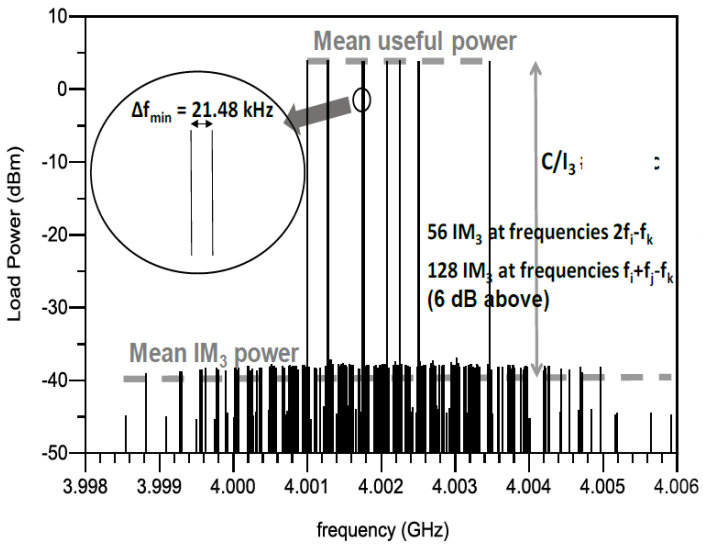
- Correspond à l'évolution conjointe des problématiques d'utilisation des modèles NL CAO **(simulation d'enveloppe de modèles comportementaux)**

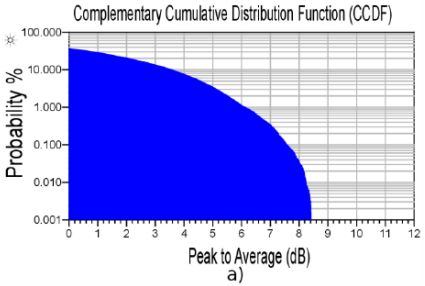


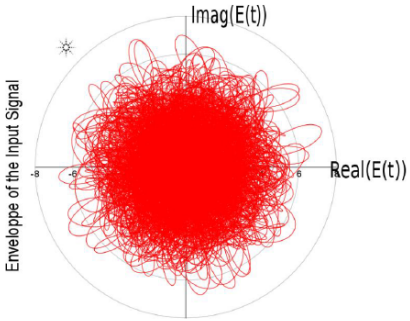
Instruments utilisés :
- **Générateurs de signaux arbitraires (AWG /DAC)**
- **Oscilloscopes (ADC)**
- **VSA et VSG**
- **Coupleurs**
- **Alimentations DC**
- **PC et logiciels dédiés**

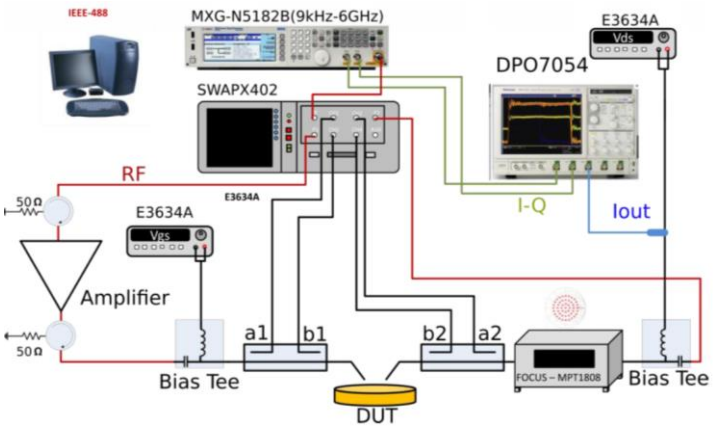
❑ …développement de méthodes de caractérisation ‘génériques’ et flexibles

- Génération de signaux multitons, **maturation du concept initial de mesures d’intermodulations**
- Émulation des propriétés statistiques du signal utile complexe, gestion des effets dynamiques BF/LF - « golden signal »
- Mesures orientées composant / modules / sous système
- **sujet de recherche encore amont**









Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- **Définition et mesure de l'enveloppe complexe**
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

Définition et mesure de l'enveloppe complexe

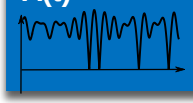
- **Enveloppe complexe** = signal qui contient l'information utile, pour lequel il faut veiller aux éventuelles distorsions - **fixe les caractéristiques de la forme d'onde émise**

Signal modulé e(t) :
écriture générale :
$e(t)=A(t)\cos(\omega_o t+\varphi(t))$

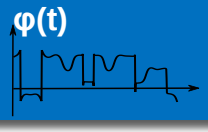
$e(t)=\mathrm{Re}\,\{A(t)e^{j\varphi(t)} \cdot e^{j\omega_o t}\}$

enveloppe complexe $\tilde{e}(t)$

A(t)



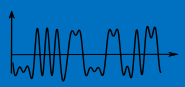
φ(t)



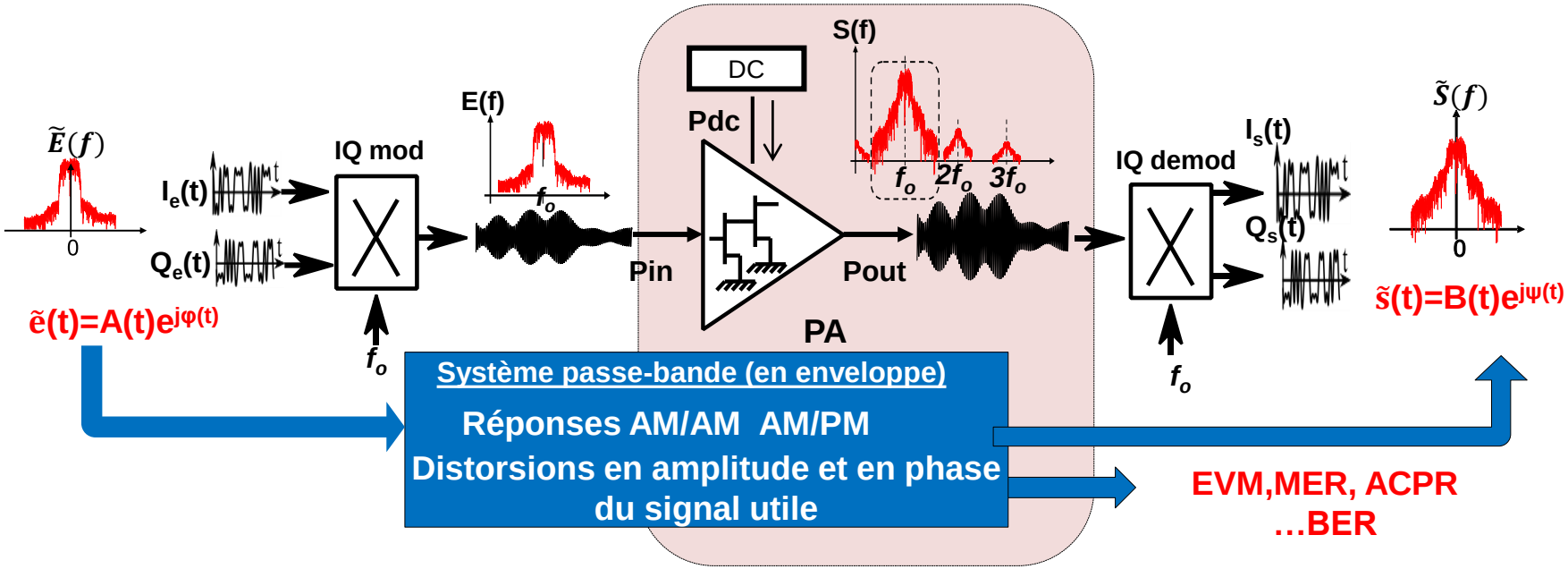
$\tilde{e}(t)=A(t)\cos\varphi(t) + j\,A(t)\sin\varphi(t)$

I(t) *signal en phase* Q(t) *signal en quadrature*

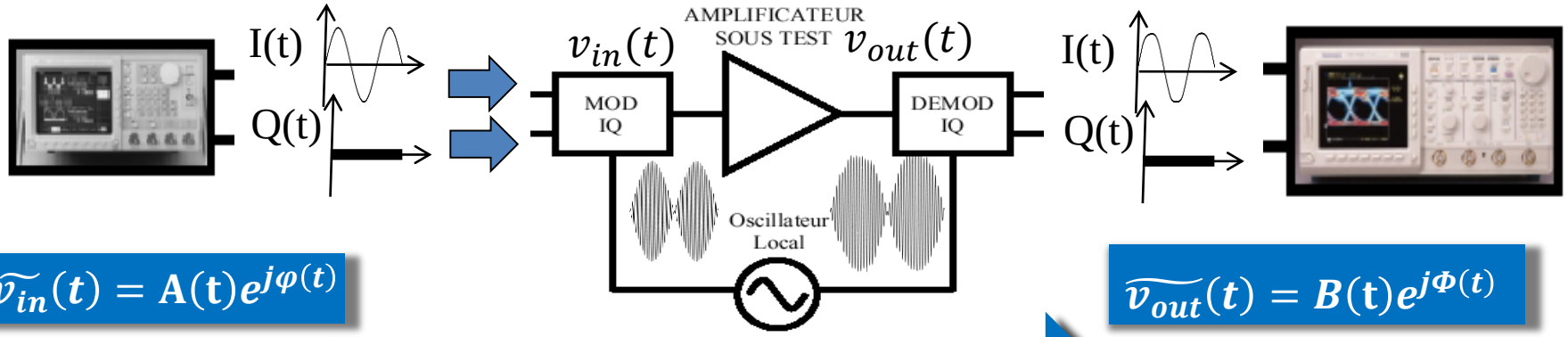
I(t)



Q(t)

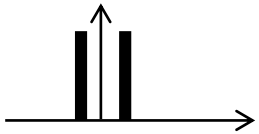


Définition et mesure de l'enveloppe complexe

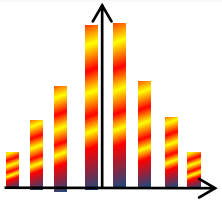


$$\widetilde{v_{in}}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}$$

$$\widetilde{v_{out}}(t) = B(t)e^{j\Phi(t)}$$



B(t)=AM/AM(A(t))=aA(t)+bA²(t)+cA³(t)…
Φ(t)=AM/PM(A(t))=a'A(t)+b'A²(t)+c'A³(t)…



→ Génération de vin(t) avec un générateur BF (AWG)
→ Moduler une porteuse avec un modulateur IQ

VSG

→ Attaquer le DUT non linéaire

→ Démoduler en sortie du DUT pour obtenir vout(t)
→ Mesurer vout(t) avec un oscilloscope (en temporel)

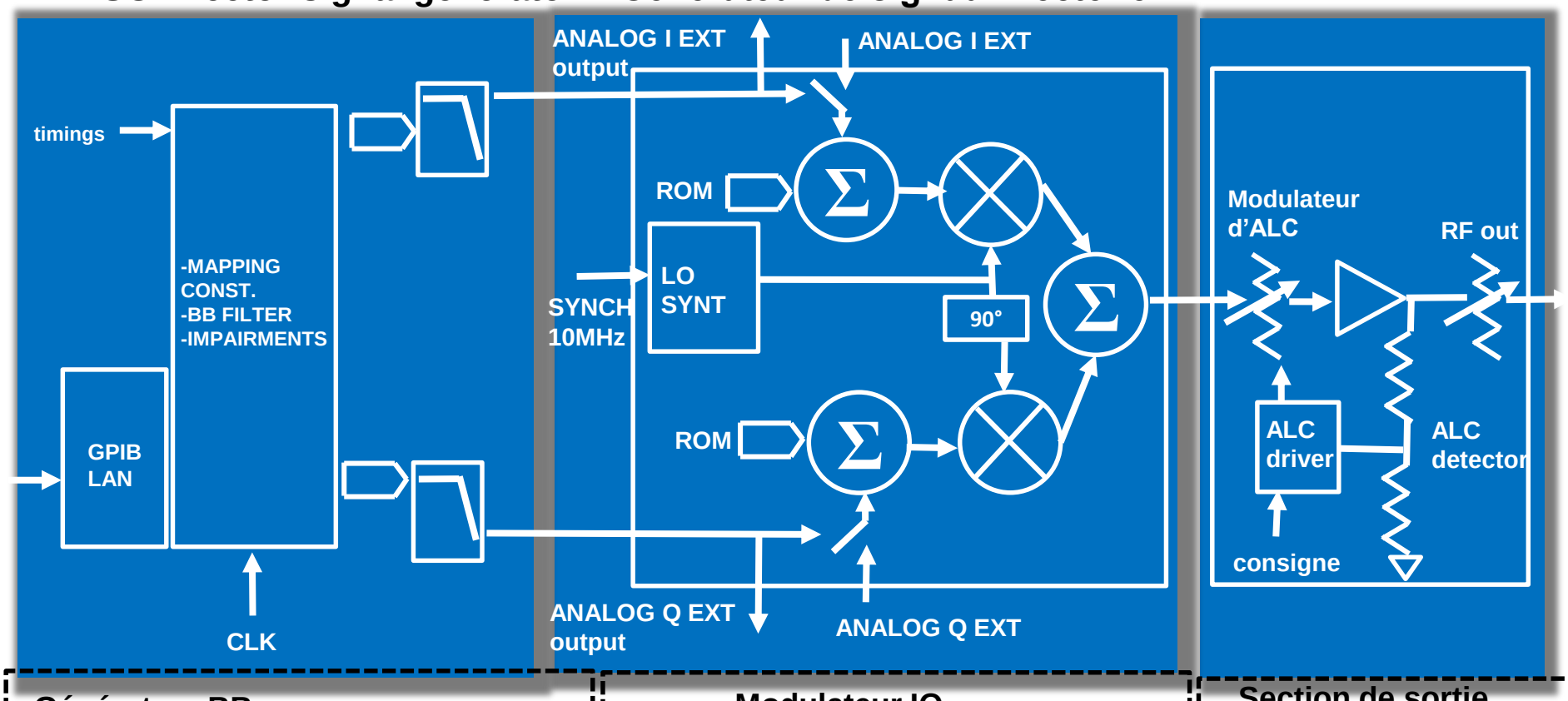
VSA

Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- **Synoptiques VSG VSA**
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

Synoptiques VSG VSA

- **VSG : vector signal generator - 'Générateur de signaux vectoriel'**



Générateur BB

Gestion connectivité, ROM, CPU
DSP pour traitement temps réel échantillons (mapping, filtrage, fading, bruit…)
Génération physique signaux analogiques
ARBs , filtres

Modulateur IQ

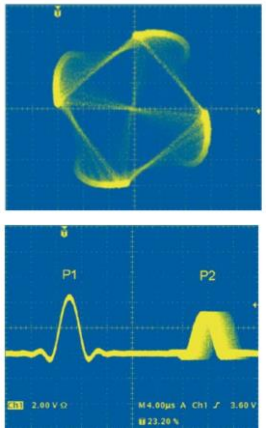
Synthèse LO
corrections voie IF (imbalance) temps réel
IQ int / IQ ext

Section de sortie

Gestion de la puissance
Optimisation C/N

Synoptiques VSG VSA

- **VSG : vector signal generator - ‘Générateur de signaux vectoriel’**



Possibilité de générer des formes d’ondes téléchargées / codeur temps réel de façon flexible :

- Standards 4G (e.g LTE-Advanced and IEEE 802.11 XX)
- formes d’ondes candidates 5G
- signaux satellite et navigation
- émulation de scénarios réalistes (fading, bruits..)

état de l’art VSG :

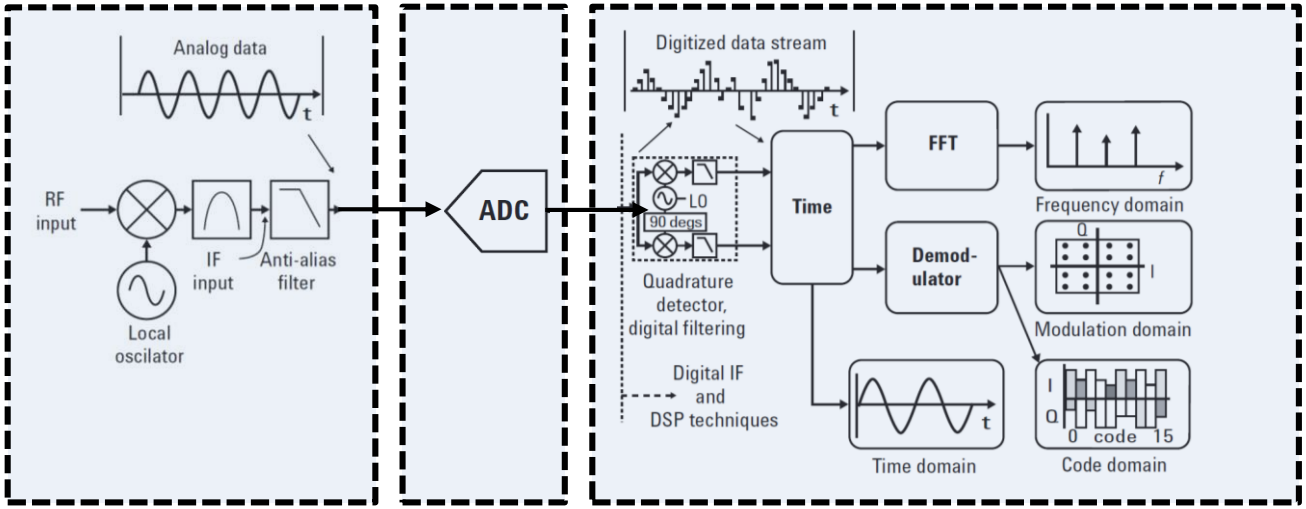
- BW modulation : 2GHz (interne,ripple <0,4dB , plancher d’EVM faible typ ~%) , 5GHz (externe)
- RF jusqu’à 67GHz , 2 RF voies cohérentes en phase
- DAC 16bits – 800MHz (interp.X4 200MHz)
- AWG interne large bande pour génération du signal d’enveloppe

Rhode et Schwarz : SMU/SMBV/SMW
Keysight : MXG/EXG/UXG/PSG
NI : PXIe-5673E
…

Synoptiques VSG VSA

- **VSA : vector signal analyser - ‘analyseur de signaux vectoriel’**

- Mesure de **l’amplitude et la phase de l’enveloppe du signal d’entrée**
- **Analyse multi-domaine** (temps/fréquence/vectoriel/code) grâce aux techniques DSP avancées embarquées (FFT, démodulation, décodage…)
- **Grande flexibilité d’analyse des signaux et forte évolutivité**



Conditionnement signal RF (hétérodynage)

Numérisation rapide

Techniques de DSP

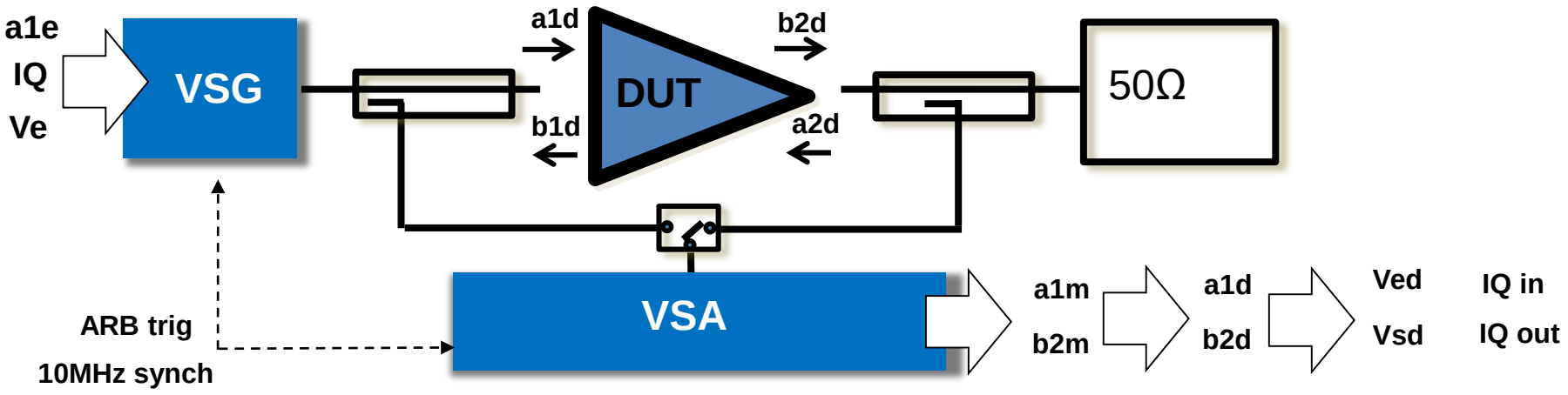
état de l’art VSA :
- Bande RF : 3Hz – 110GHz
- Bande IF d’analyse 2GHz
- ADC 1.2GS/s – 14bits

Rhode et Schwarz : FSQ/FSW
Keysight : MXA/EXA/UXA
NI : PXIe-5673E
…

Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- **Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms**
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- Conclusion

Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms

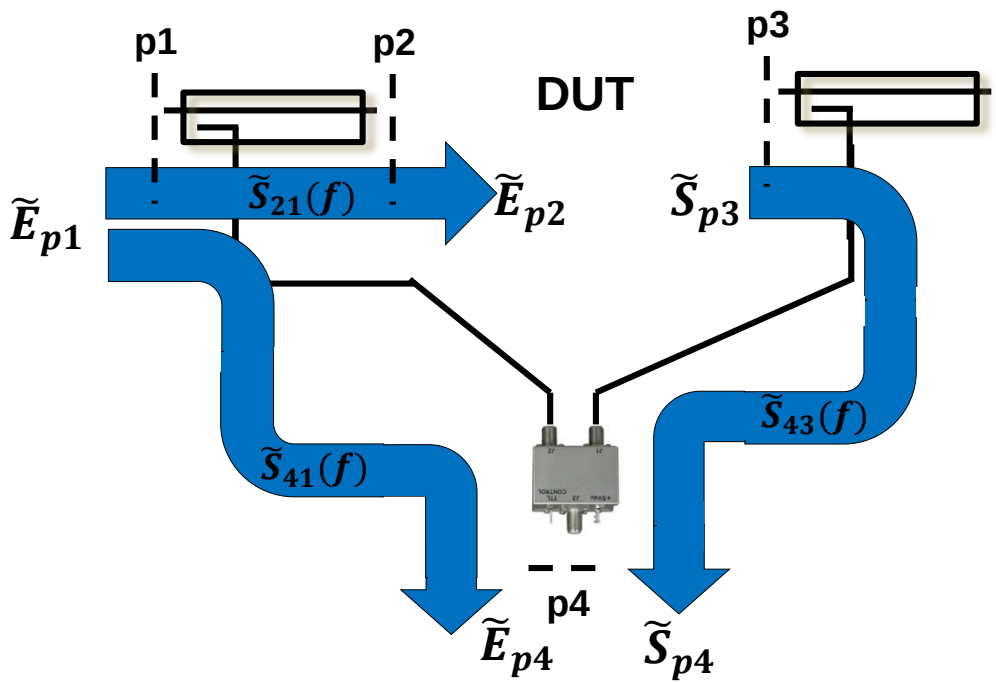


- Chaine de transmission **adaptée 50Ω entre des tensions complexes**

- Accès aux tensions complexes aux bornes du DUT (étalonnage):

- **Correction de la partie démodulante** (cal interne du VSA : corrections des erreurs systématique de la voie IF de mesure – Offset DC, IQ gain imbalance, IQ delay mismatch, IQ quadrature error)
- **Correction des voies de couplage** (adaptation aux interfaces –> Vs/Ve=S21)
- 1 seul récepteur **: post synchronisation** des enveloppes complexes des ondes (« étalonnage » en phase des enveloppes des ondes – correction de TPG moyen)

- **Calibration des voies de couplage**



❑ **Mesure de $\tilde{S}_{ij}(f)$**

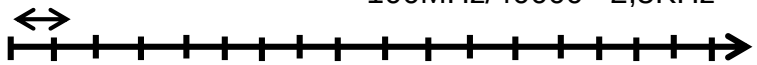
$\Delta f_{[S]}$=span/N_{pts}

Résolution **$\Delta f_{[S]}$=span/N_{pts}** =100MHz/4000= 25KHz

❑ **Mesure de $\tilde{E}_{pi}(f)$ et $\tilde{S}_{pi}(f)$**

Δf_{mes}=Fe/N

Résolution **Δf_{mes}=Fe/N** = 100MHz/40000= 2,5KHz



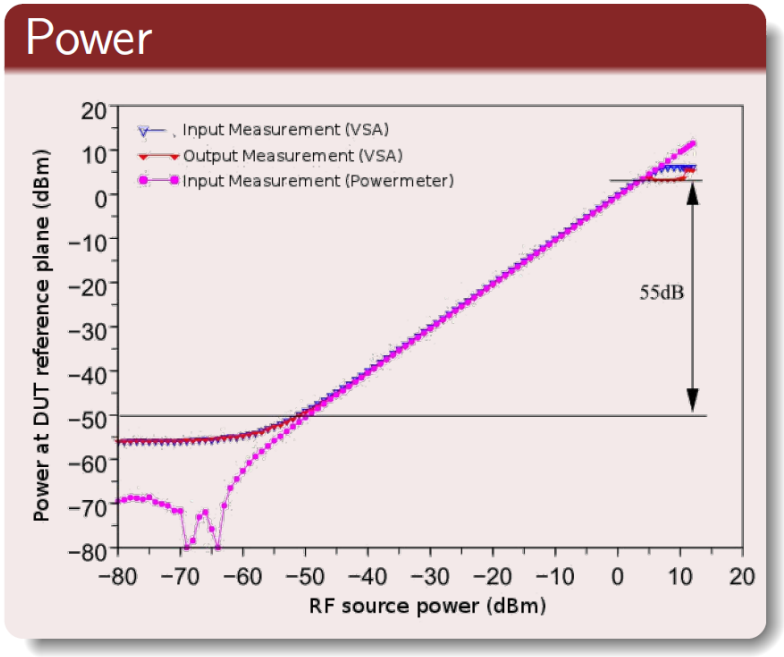
❑ **Interpolation [S]** = même grille fréquentielle

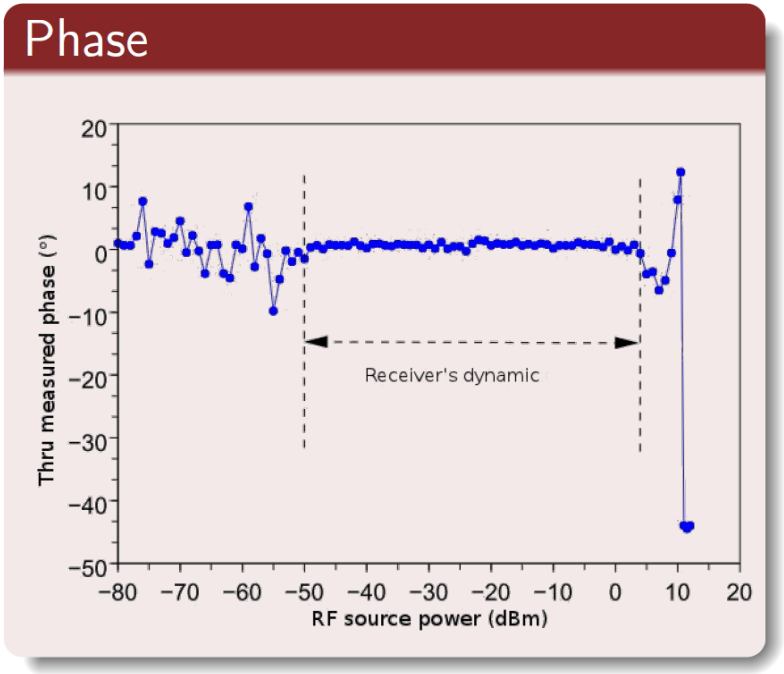
1) **[S] blocs passifs à l'ARV** : $S_{21}(f), S_{41}(f)$ et $S_{43}(f)$ dans la bande d'intérêt (≈ 5*BW modulation)

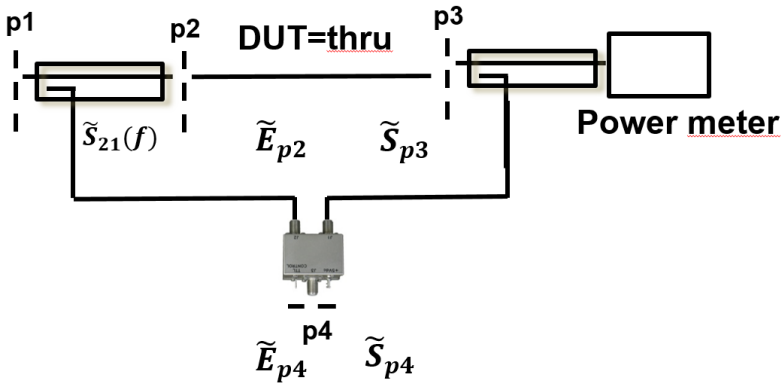
2) **Algorithme de correction** (interpolation, correction de chaque échantillon fréquentiel) en enveloppe complexe (équivalent passe-bande):

$$\tilde{E}_{p2} = \tilde{E}_{p4}\frac{\tilde{S}_{21}(f)}{\tilde{S}_{41}(f)} \quad \text{et} \quad \tilde{S}_{p3} = \tilde{S}_{p4}\frac{1}{\tilde{S}_{43}(f)}$$

- **Validation de la calibration**







Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms

- **« Étalonnage » (correction) en phase des enveloppes des ondes (synchronisation des trames mesurées des enveloppes complexes)**

Récepteur commerciaux avec 1 voie RF

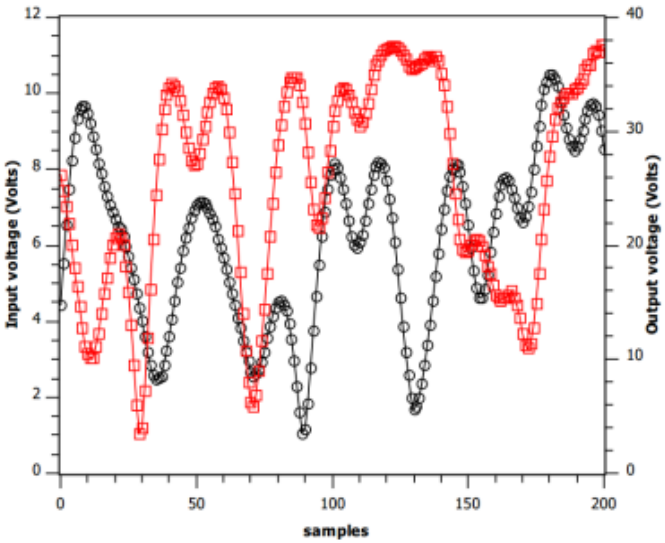
- Mesures séquentielles entrée/sortie des enveloppes des ondes

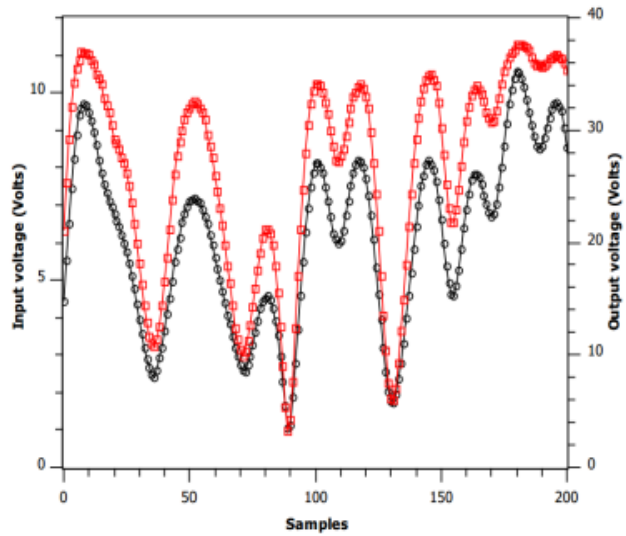
→ a1d et b1d non synchrones
→ déphasage à la fréquence centrale

- **Mesures brutes inexploitables**

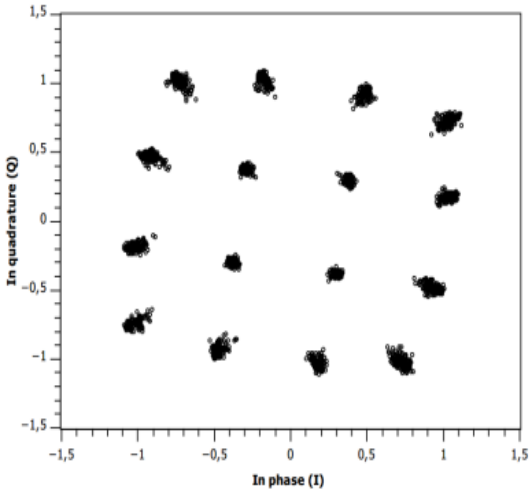
- **Post – traitement pour synchroniser les enveloppes des ondes acquises**

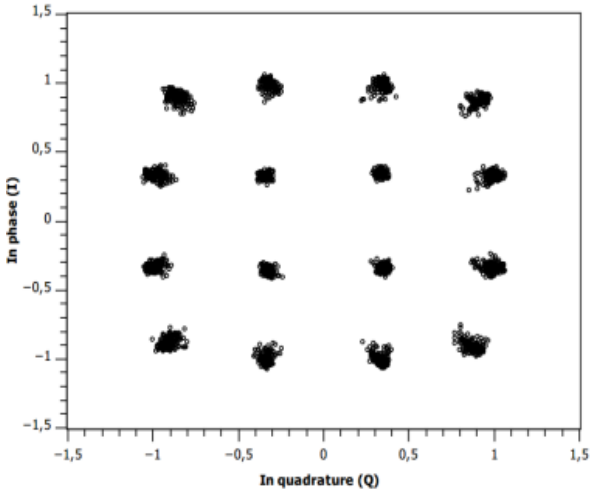
Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms





Correction du retard d'enveloppe moyen

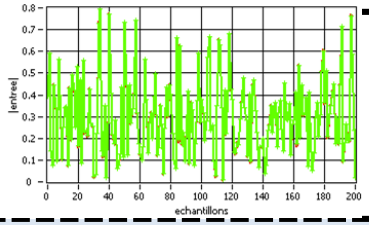


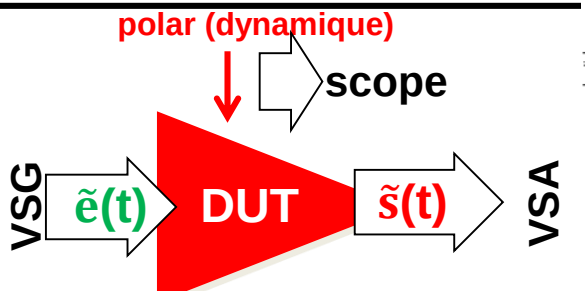


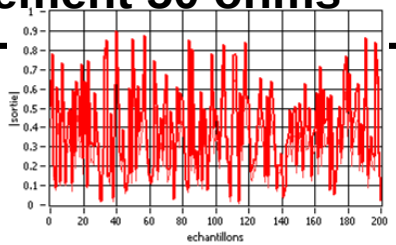
Correction de l'offset de phase φ_0

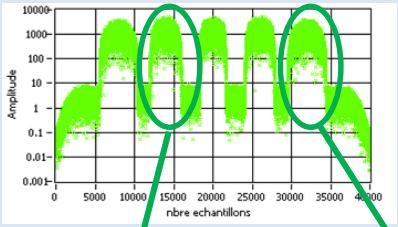
Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms

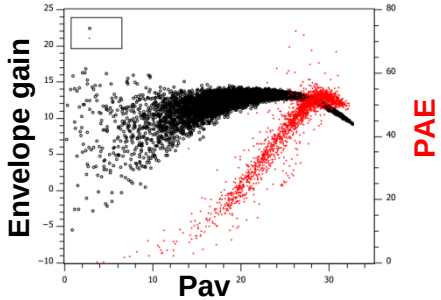
Multiplex 5 porteuses modulées

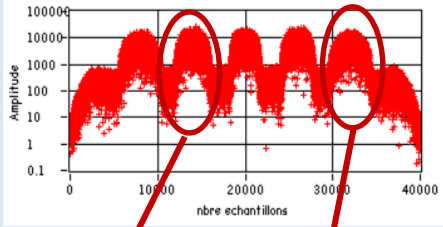




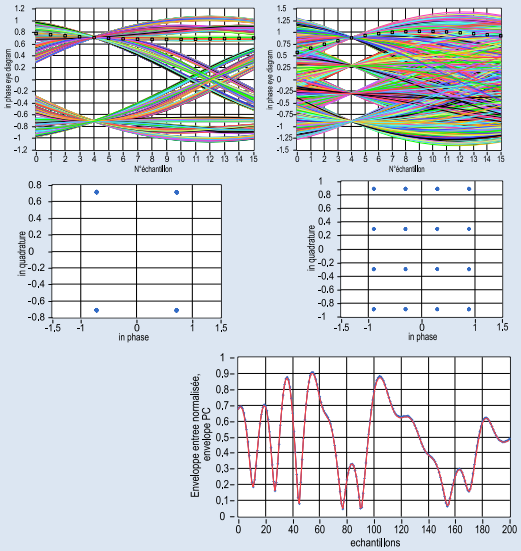


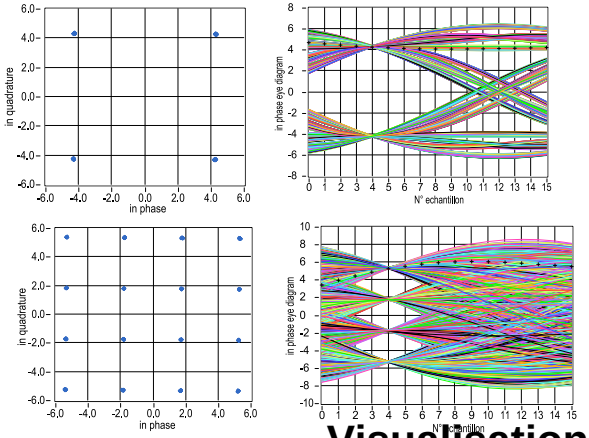


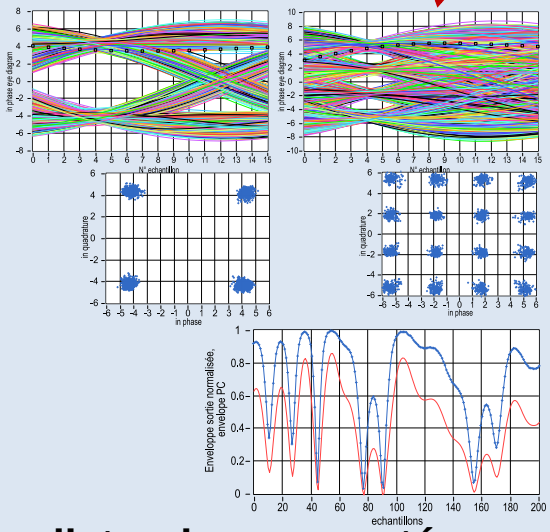




démodulation + mesures vectorielles 1 porteuse parmi 5







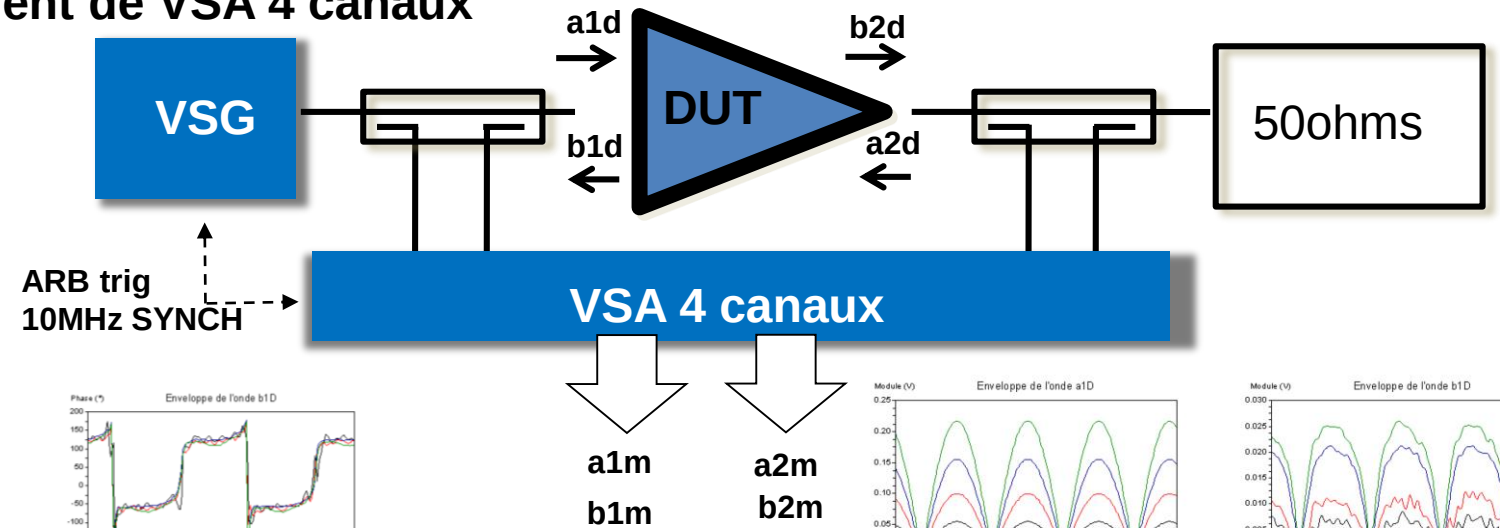
Visualisation des distorsions apportées par le PA

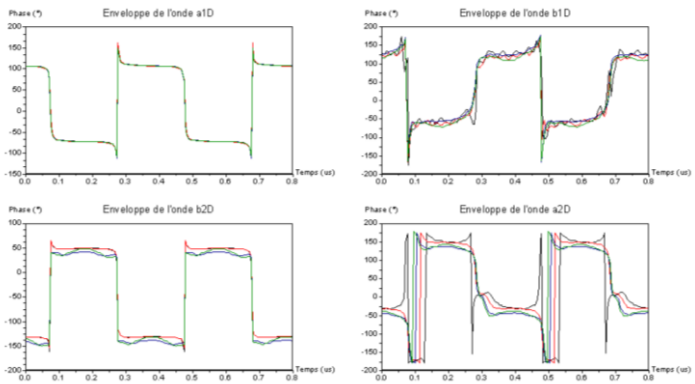
sur 1 porteuse dans le multiplex + quantification des interactions PA/circuits NL

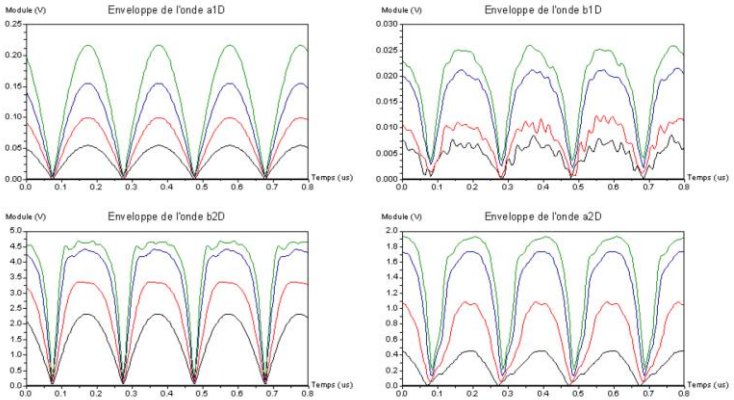
r linearity assessment

Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms

Développement de VSA 4 canaux







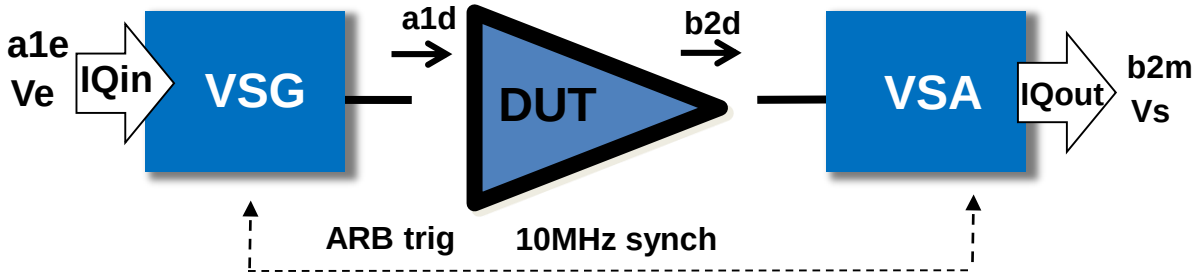
- mesure **synchrone des 4 enveloppes** des ondes aux accès du dut
- Permet la mesure sur **composants**
- Connaissances plus complètes des mécanismes de dégradation de l'enveloppe
- Applications à la CAO : **modélisation comportementale bilatérale en enveloppe**
- …pas de solution commerciale pour le moment

Quelques éléments de conclusion :

- Solutions commerciales pour mesures de **dispositifs adaptés**, performances '**fonctionnelles**' du DUT dans son environnement 50Ω de type chaine de transmission
- **Pas de notion d'impédance (connaissance de V et I)**

- Mesures E/S des **enveloppes des ondes a1 et b1 effectuées séquentiellement** :
- Nécessité de trigger la mesure (ARB trigger) - ou de **resynchroniser les trames mesurées**
- Ondes a1 et b1 non synchrones : on masque certains paramètres importants (TPG du DUT et AM/PM normalisé)

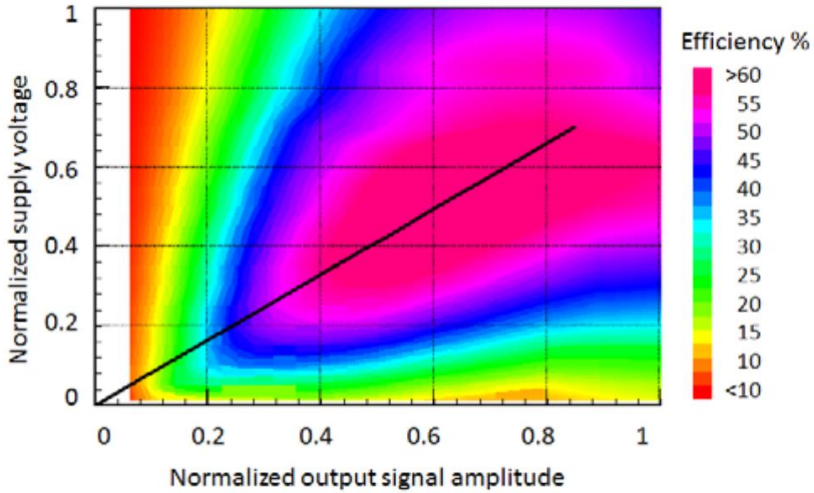
- **Dans la pratique : on mesure uniquement l'enveloppe de l'onde b2 (connaissance de Ve et Vs , mesure des performances fonctionnelles « end-to-end »)**

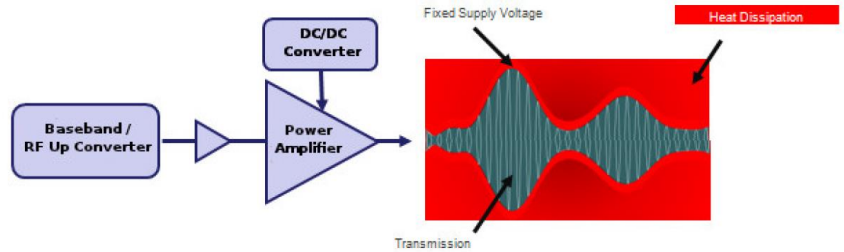


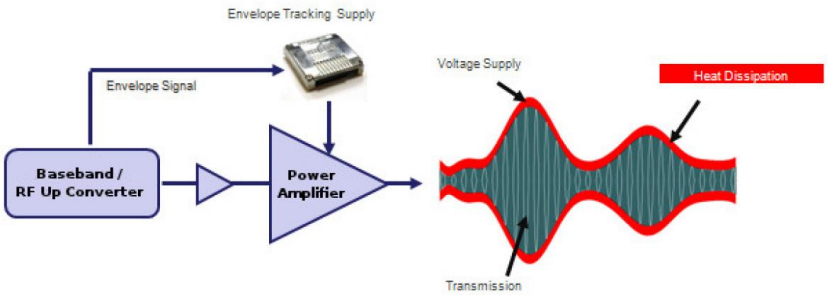
Plan

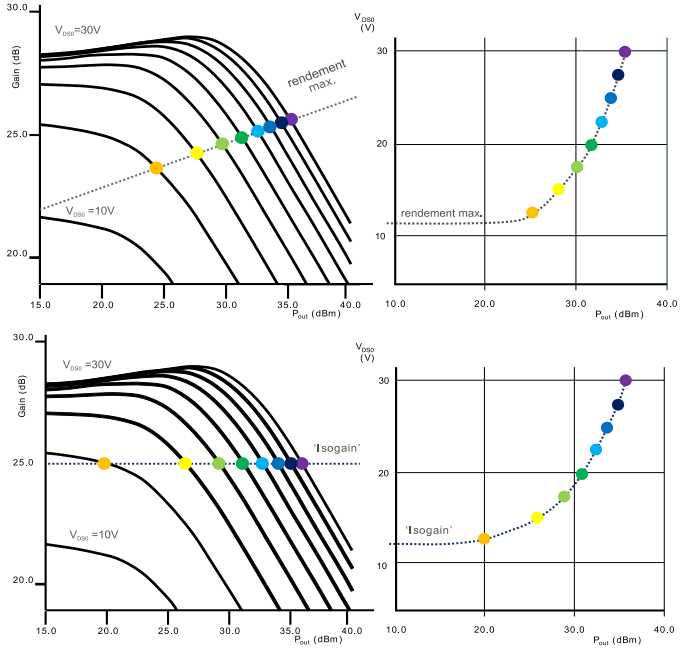
- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- **Développement de solutions d'ET**
- Techniques DPA
- Conclusion

Développement de solutions d'ET



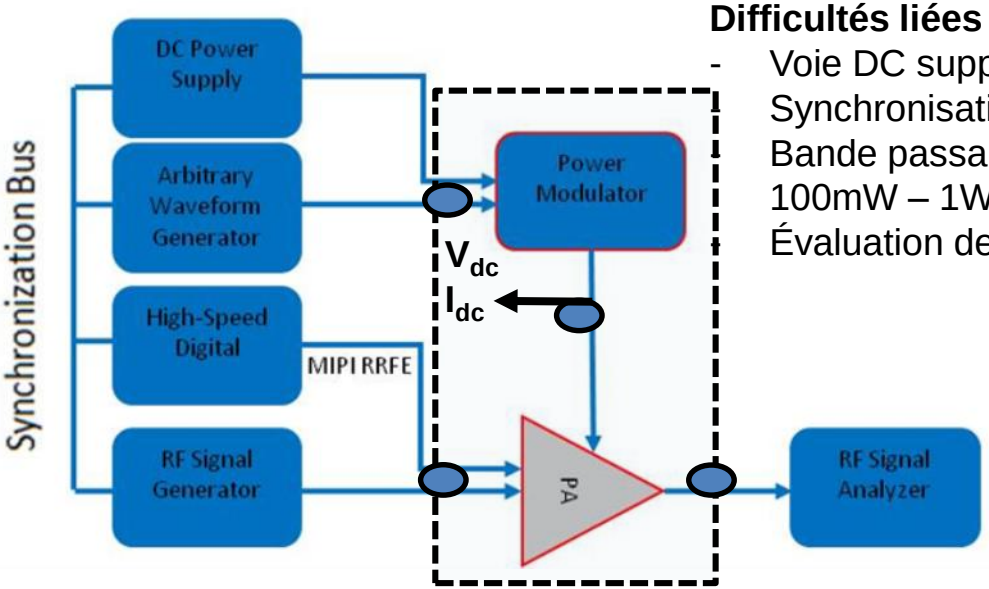






- **maintien à la compression sur la dynamique de l'enveloppe grâce à un contrôle de la polarisation**
- Optimisation de la linéarité (plus anecdotique)
- Sujet académique depuis une quinzaine d'années, développement matures (faibles à moyennes puissances<qq W RF)
- Arrivé en production depuis 2013 : **enjeux multiples d'instrumentation pour les tests et mesures**

Développement de solutions d'ET



Difficultés liées aux moyens de test et mesure associés :

- Voie DC supplémentaire (ETPA = 3 ports)
- Synchronisation précise signaux BdB / RF (typ.<1/10 temps symbol
- Bande passante du signal de polarisation (DAC/AWG , typ. X10BW, 100mW – 1W)
- Évaluation des performances globales PAE/ACLR/EVM

…multiplication des instruments utilisés

- Nécessité de solutions de T&M complexes dédiées :

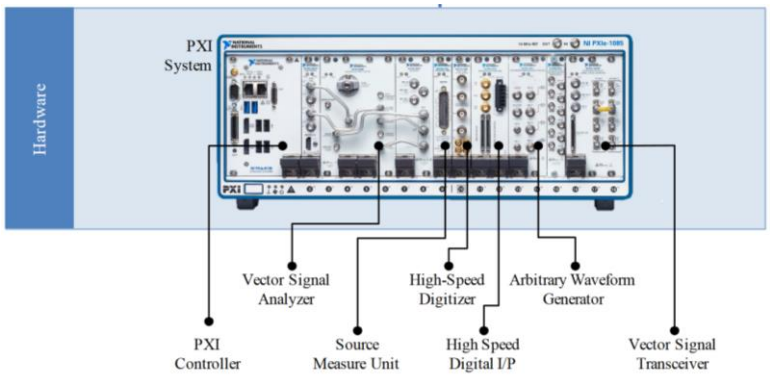
–> mesures en conditions réelles d'utilisation

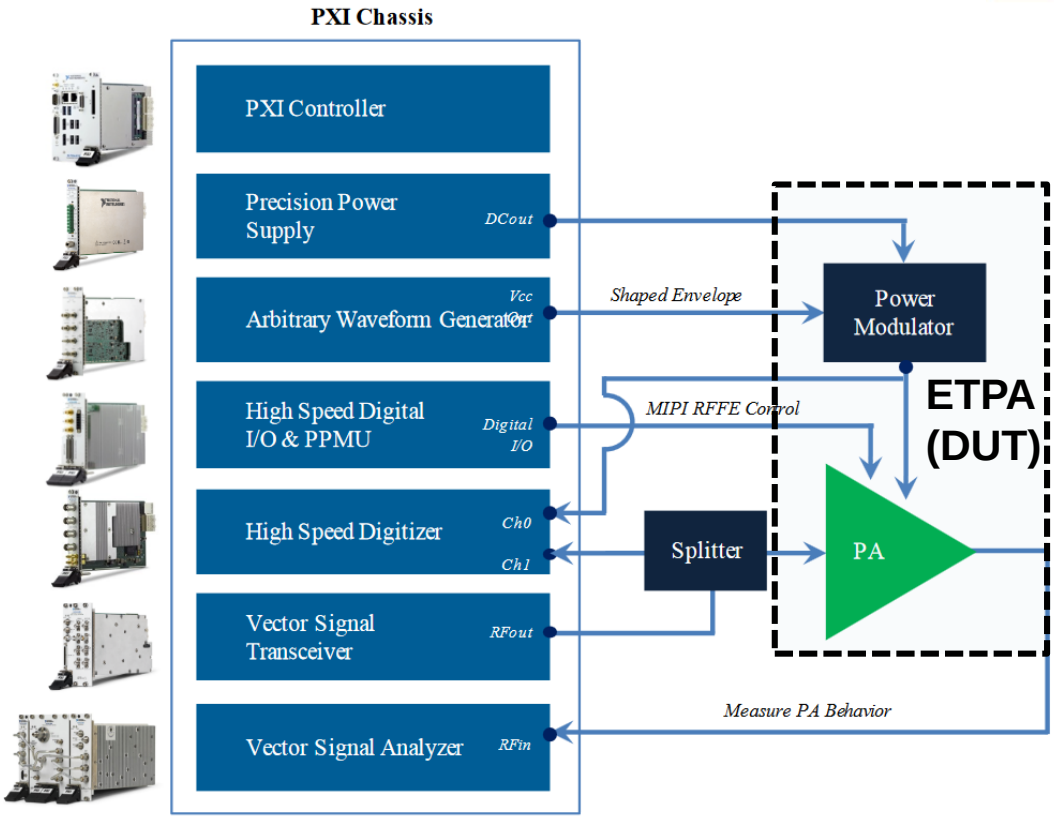
–> l'optimisation conjointe des performances en temps réel

- **Solutions commerciales matures relativement récentes liées à l'essort de la technologie ET**
- **Grâce notamment aux techniques DSP**

Développement de solutions d'ET

- Trigger, synch signaux partagés AWG – VSG : 20ps, 1ns résolution
- Optimisation logicielle de l'alignement BF – RF
- Optimisation loi de commande et DPD et visualisation en temps réel



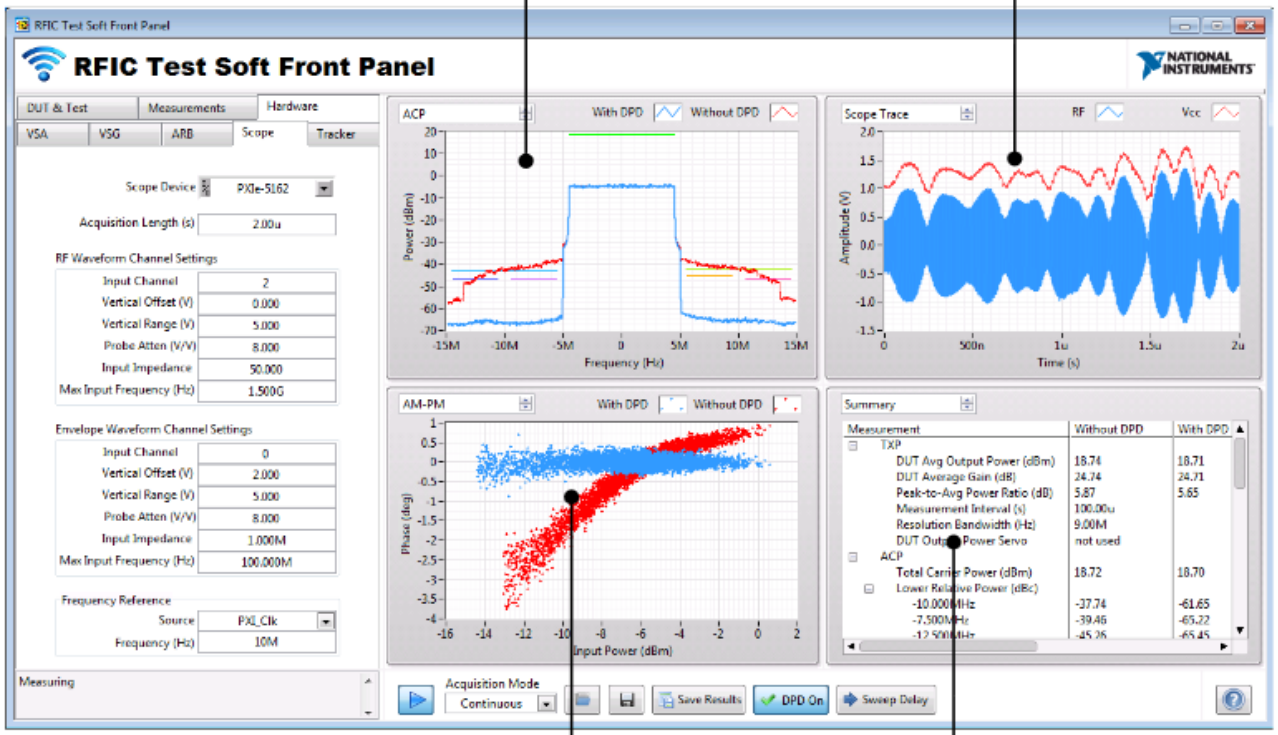


- **BW modulation 200MHz**
- **RF jusqu'à 26.5GHz**
- **Grande flexibilité pour génération et mesure des standards 3G/4G et candidats 5G**

Développement de solutions d'ET

DPD Algorithms
Apply DPD algorithms to ET PAs to correct for AM-AM and AM-PM distortion.

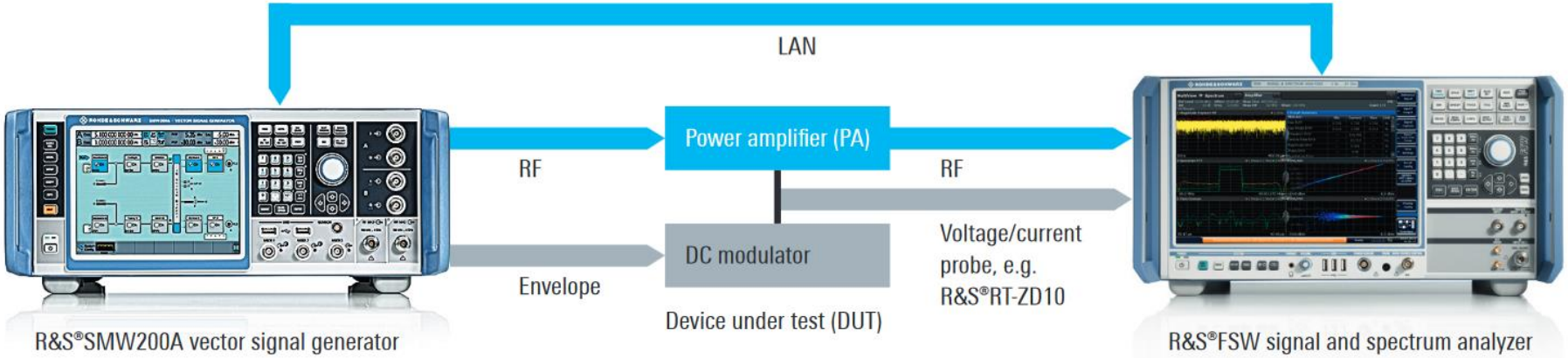
Envelope Control
Applies envelope shaping and real-time control of VSG-to-AWG delay.



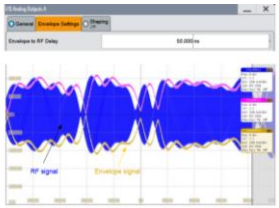
PA Performance
Observe AM-AM and AM-PM behavior of PA under envelope tracking conditions.

PA Performance Metrics
Use metrics such as ACLR, EVM, power, and RMS memory to characterize PA performance.

Développement de solutions d'ET

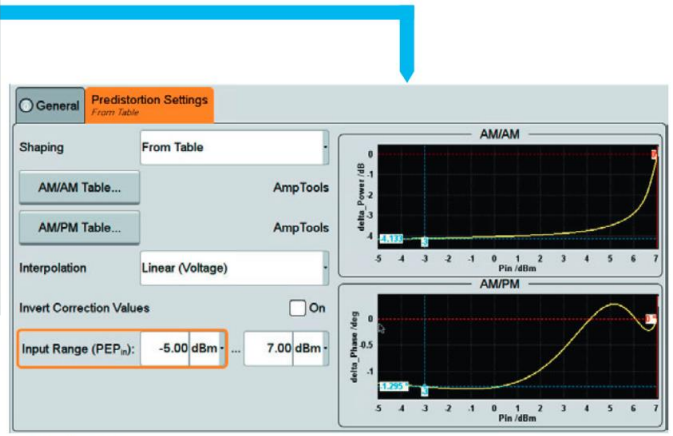


- Génération synchrone RF/enveloppe (±500 ns , resolution1 ps)
- Mise en forme de l'enveloppe temps réel
- Application DPD en temps réel

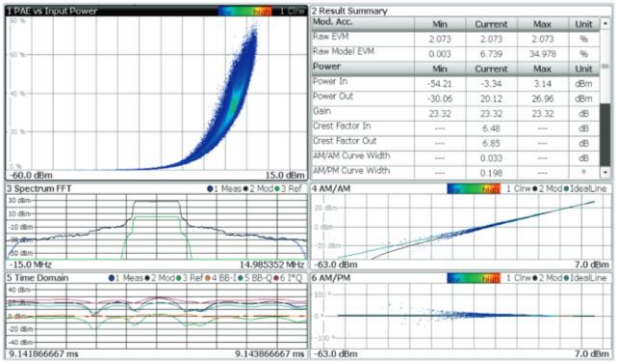


- Analyses RF (ACLR, EVM, MER)
- AM-AM et AM-PM
- PAE
- BW=500MHz
- RF=67GHz
- DPD (mesure, extraction , inversion en temps réel)

R&S®FSW-K18



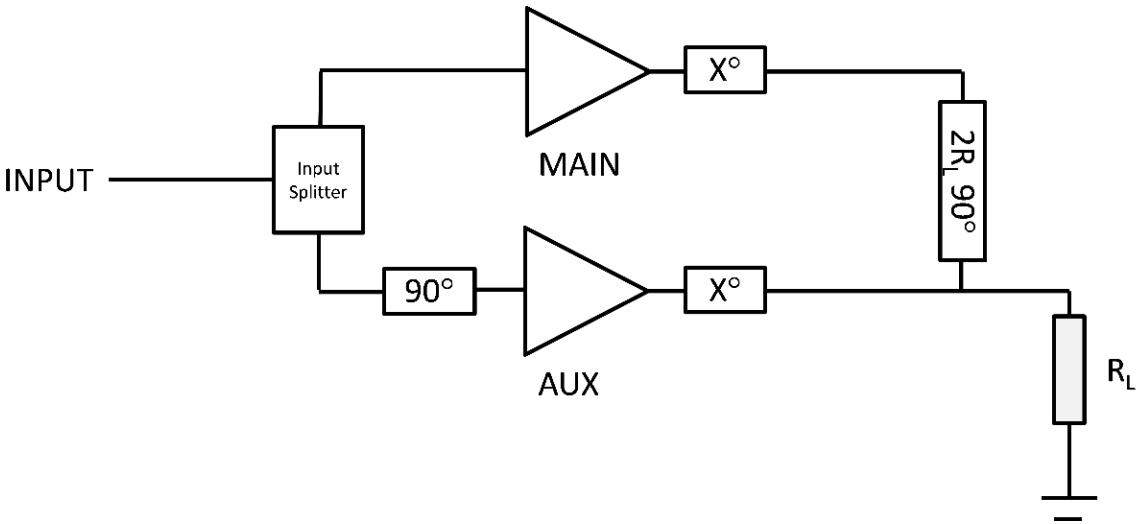
R&S®SMW-K541

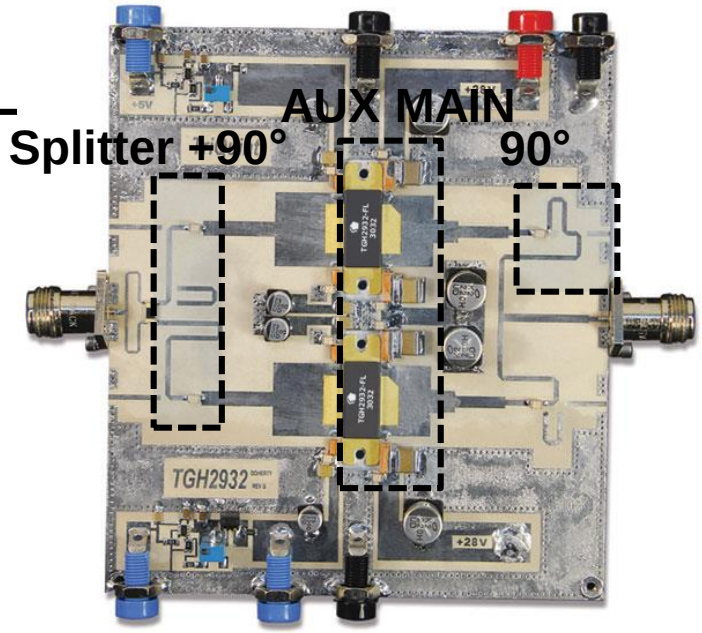


Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- **Techniques DPA**
- Conclusion

Techniques DPA





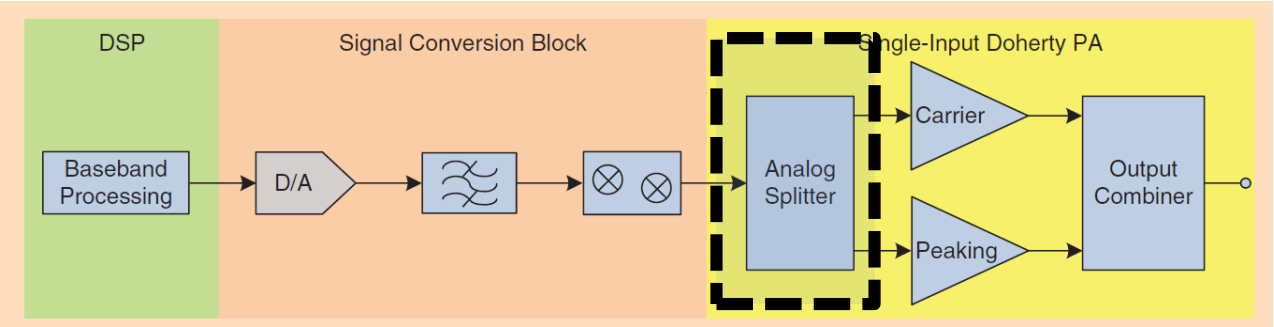
Modulation active de la charge au fondamental

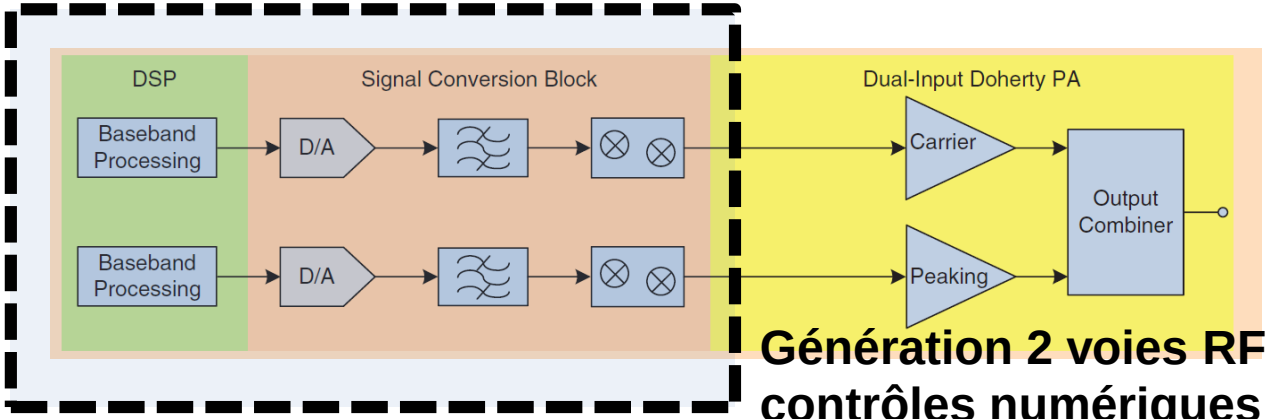
- Technique implémentée dans les émetteurs RF
- Fonctionnement conjoint de 2 transistors – PA dans une charge commune
- Effet de modulation de charge active - ‘load pull’
- **Fonctionnement théorique parfait, mais implémentation pratique complexe, liée notamment au transistor lui-même**

- Déviations de le phase en sortie des PA en fonction de la puissance d’entrée (AM/PM) : mauvaise recombinaison au nœud commun à la fréquence centrale
- structure figée pour la répartition de puissance en entrée : modulation de charge non optimale
- **réduction des performances RF globales en contexte large bande / reconfigurable**

Techniques DPA

- **Verrous levés par l'apport des techniques DSP**
  - Optimisation expérimentale de la modulation de charge active par **répartition adaptative** des puissances injectées dans chacune des branches
  - **Alignement adaptatif des phases** des signaux d'entrée après la mise en conduction de l'auxiliaire pour l'optimisation de l'effet de modulation de charge
  - **Degrés de liberté nouveaux apportés pour l'optimisation des performances**





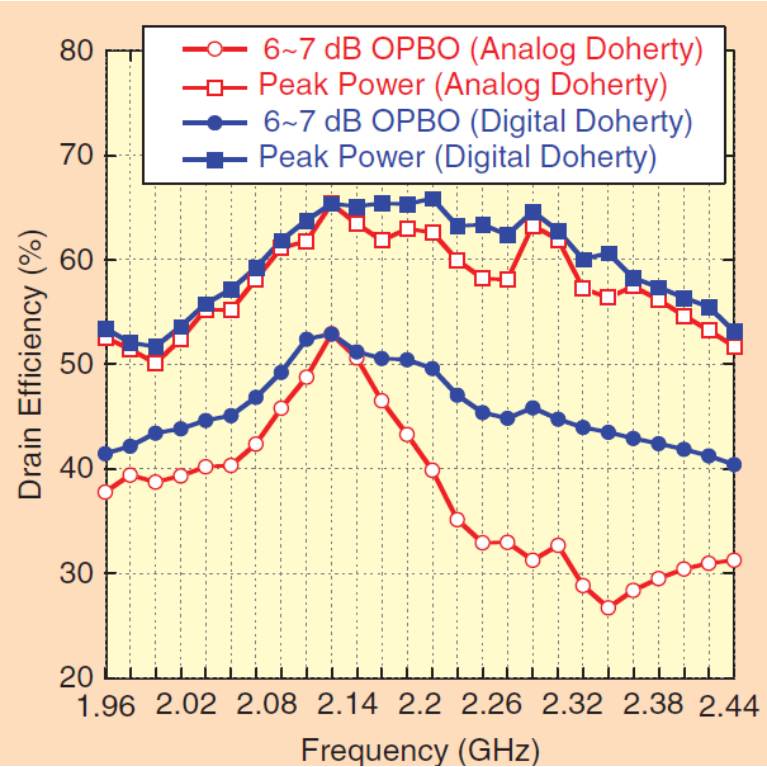
Génération 2 voies RF cohérentes
contrôles numériques BdB temps réel

Exemple de solutions commerciales

- VSG **2 voies RF cohérentes**
- **2 codeurs temps réels** embarqués indépendants
- Contrôle total sur les enveloppes de modulation attaquant les 2 voies RF

- recombinaison assistée par le pré-traitement temps réel des signaux d'enveloppe en amont des PA

- **Fort intérêt expérimental pour le développement d'architectures innovantes type DPA /outphasing / mixte DPA-outphasing**



Plan

- Problématiques des futures liaisons haut débit
- caractérisation des dispositifs non linéaires
- Définition et mesure de l'enveloppe complexe
- Synoptiques VSG VSA
- Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms
- Développement de solutions d'ET
- Techniques DPA
- **Conclusion**

Conclusion

- **défis et verrous technologiques liés au développement des futures générations de dispositifs utilisés dans les frontaux RF**

→ Evolution conjointe des:
- **technologies** : technos Si avancées, SC grand gap, intégration hétérogène…
- **Outils CAO** : simulation / cosimulation , simulation multiphysique/multiéchelle, bibliothèque de composants fiable…
- **solutions de test & mesure** : caractérisation et extraction automatique de modèles, montée en fréquence et BW…

→ Tous ces facettes **s'enrichissent mutuellement**

- **Instrumentation : évolution des outils et méthode dédiés à la caractérisation NL**

→ Offre étoffée de solutions de mesures VSA/VSG orientées fonction / sous-système
→ Besoins par rapport au marché (signaux ULB, émulation du contexte de transmission réaliste, HPA adaptatif , …)
→ Génération, contrôle et mesure de signaux mixtes RF/analogique/numérique
→ Évaluation et optimisation en temps réel des performances

Merci pour votre attention

Architecture et étalonnage d'un banc VSA - VSG commercial dans un environnement 50 ohms

$$x_1(t) = A(t)\cos\left(2\pi f_0 t + \varphi(t)\right) = Re\left\{\tilde{x}_1(t)e^{j2\pi f_0 t}\right\}$$

1ère mesure

$$x_2(t) = x_1(t-\tau_e) = Re\left\{\tilde{x}_1(t-\tau_e)e^{j2\pi f_0 t}e^{-j\varphi_0}\right\}$$

$$\tilde{x}_2(t) = \tilde{x}_1(t-\tau_e)e^{-j\varphi_0} \xrightarrow{TF} \tilde{X}_2(f) = \tilde{X}_1(f)e^{-j(2\pi f\tau_e+\varphi_0)}$$

Même mesure décalée de τ_e

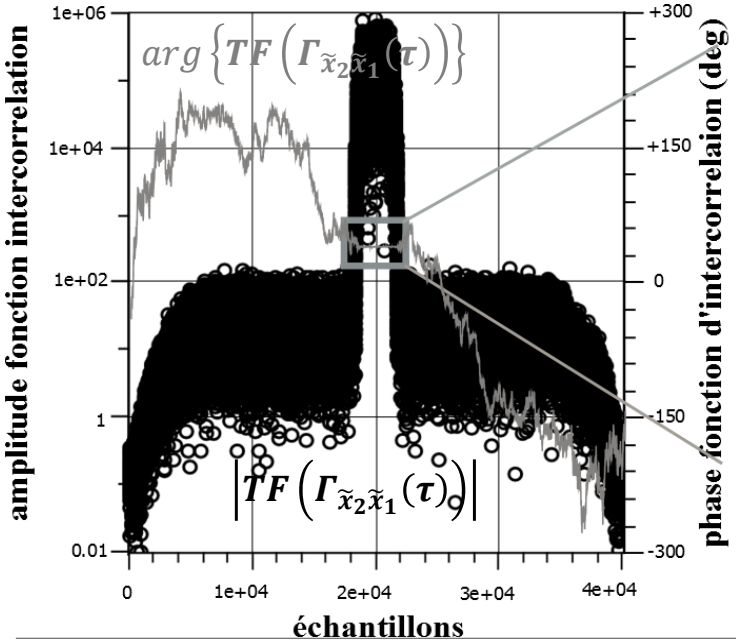
2 paramètres distincts :

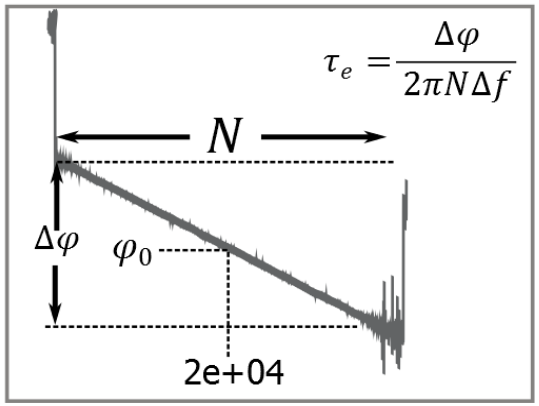
τ_e **retard d'enveloppe**

$\varphi_0 = 2\pi f_0 \tau_e$ **offset de phase**

$$TF\left(\Gamma_{\tilde{x}_2\tilde{x}_1}(\tau)\right) = \tilde{X}_2(f)\tilde{X}_1^*(f) = |\tilde{X}_1(f)|^2 e^{-j(2\pi f\tau_e+\varphi_0)}$$

$$arg\left\{TF\left(\Gamma_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2}(\tau)\right)\right\} = -(2\pi f\tau_e + \varphi_0)$$





Cas linéaire :

$arg\left\{TF\left(\Gamma_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2}(\tau)\right)\right\}$

fonction affine

Régression linéaire pour obtenir τ_e et φ_0

Synchronisation : multiplication par C(f)=$e^{j(2\pi f\tau_e+\varphi_0)}$