



Platform of Reliability tOOLs for Failure analysis
dedicated to wide bandgap devices

Etudes de robustesse et fiabilité haute fréquence pour l'industrie et la recherche ... Construction d'une feuille de route à long terme

Pilote du projet : Laurent BARY

Responsable scientifique : **Jean-Guy TARTARIN**

Responsables techniques : **Damien SAUGNON**

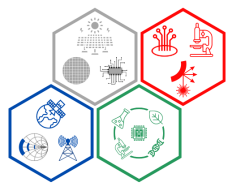
Alexandre RUMEAU



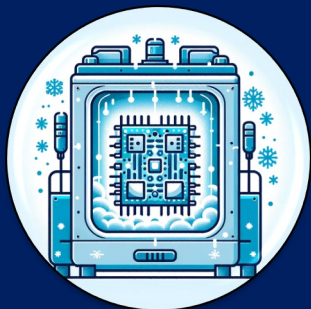
PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



- Les moyens expérimentaux de la plateforme
- Faits marquants techniques
 - Cas d'études avec partenaires industriels
 - Cas d'études de projets académiques
- Visite de la plateforme PROOF



Zone Hyperfréquences



Ambiance contrôlée



Bruit électronique



Applications
millimétriques

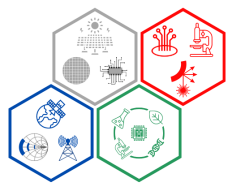


Fiabilité/robustesse
haute fréquence



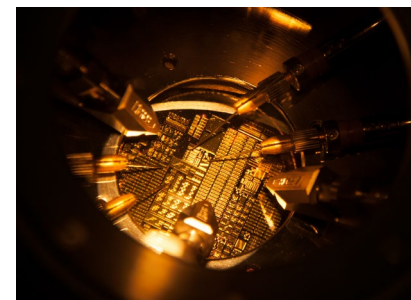
Antennes

Couverture de diverses thématiques



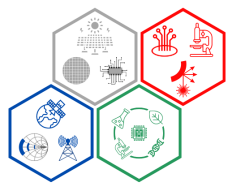
Zone Hyperfréquences

Station sous pointes Cryogénique



PMC 200 (SUSS Microtech)

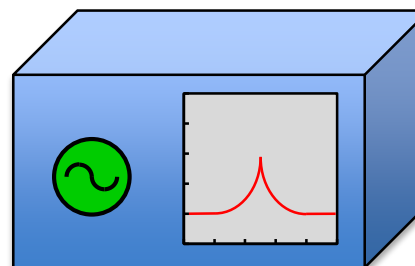
- Accès DC : 4
- Accès HF : 4 (67 GHz)
- Pression du vide : atmosphère jusqu'à 10^{-6} mBar
- Température : 400 K à 77 K (Azote liquide) ou 4 K (Hélium liquide)
- Chuck : 6"



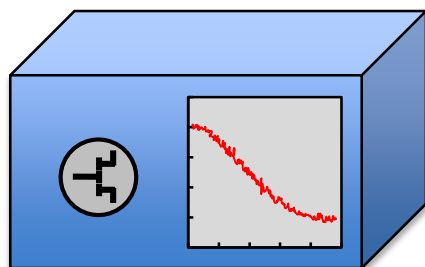
Zone Hyperfréquences



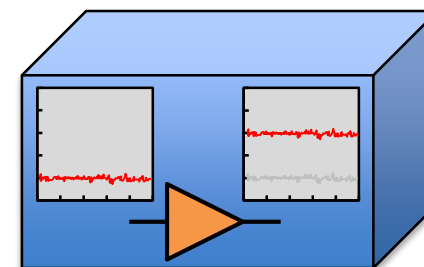
Les trois types de bruit caractérisés dans la PF



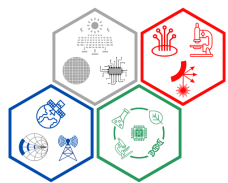
Bruit de phase



Bruit Basse
Fréquence (BF)



Bruit Haute
Fréquence (HF)



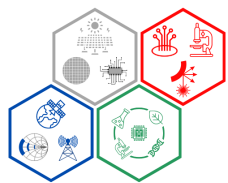
Zone Hyperfréquences



Banc bruit BF (LAAS*)

Banc bruit BF (Keysight)

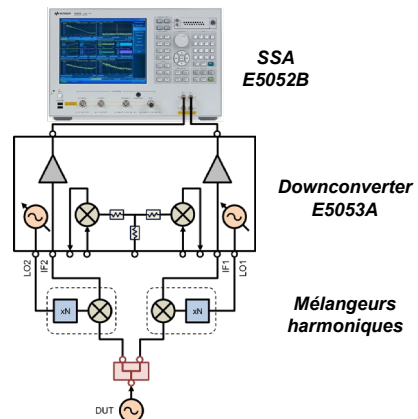
- **Expertise LAAS** sur le **bruit BF** depuis la fin des **années 60'**
- Bancs installés dans une **cage de Faraday**
- Mesures de DUT : **sous pointes**, **véhicule de test RF** (accès coax.) ou **boîtier électronique** (type TO)
- Logiciels – **interne LAAS** et **WaferPro** (cartographie automatique)
- Caractérisations de $S_{IG/IB}$ et $S_{ID/IC}$: 1 Hz à **100 kHz** et **40 MHz**
- Le bruit BF est révélateur de :
 - La **qualité du procédé** de fabrication
 - **Maturité** des dispositifs
 - La présence de **défauts cristallins**
 - L'**intégrité du dispositif** lors des tests de fiabilité



Zone Hyperfréquences

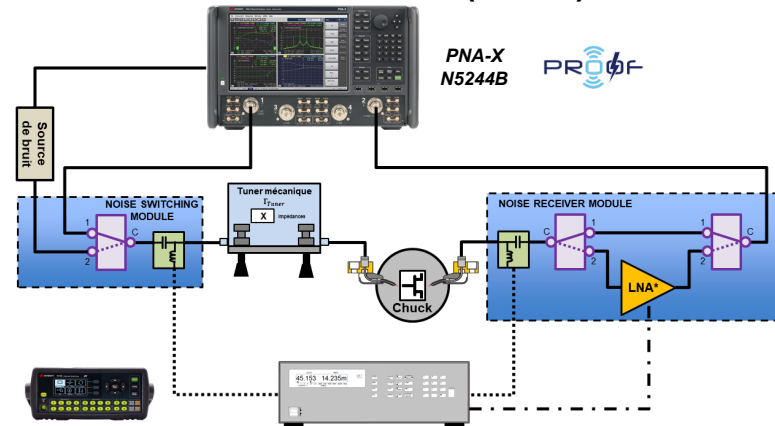


Banc bruit de phase (Keysight)



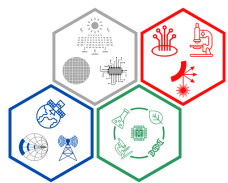
- Banc installé dans une **cage de Faraday**
- Couvertures fréquentielles :
 - 0,01 - 7 GHz → SSA
 - 3 - 26 GHz → Downconverter
 - 26 - 40 GHz
 - 50 - 75 GHz
 - 75 - 110 GHz
- Plage de capture par rapport à la porteuse 1 Hz - 100 MHz
- Technique de **corrélation croisée**

Banc bruit HF (LAAS)



- **PNA-X** : extraction du **facteur de bruit NF_{50}** (0,01 – 40 GHz)
- **Banc** d'extraction des **4 paramètres de bruit** (8 - 40 GHz)
 - Développement en cours
 - **Refonte du programme** basée sur héritage LAAS
 - **Nouveaux équipements**
 - Récepteur de bruit intégré au PNA-X
 - Synthétiseur d'impédances électromécanique*
 - Module récepteur de bruit (développement)



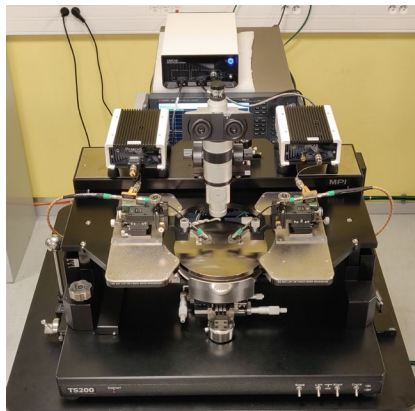


Zone Hyperfréquences



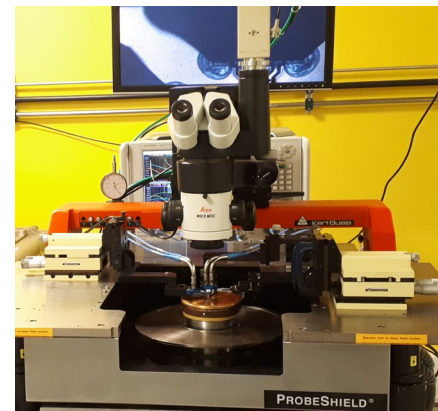
Applications millimétriques

Banc I-V et [S] en régime impulsionnel

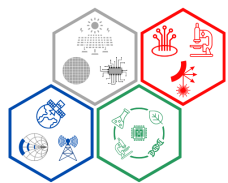


- **PNA-X N5244B** (Keysight) - Module pulsé port 1 ET 2
- **PIV-AM3200A** (AMCAD)
 - SMU pulsé Drain : +250V / +30A
 - SMU pulsé Grille : $\pm 25V$ / $\pm 1A$
 - Impulsion des SMU : 200ns à DC
- **Suite logicielle IVCAD** (AMCAD)
 - Acquisition/Visualisation
 - I(V) et paramètres [S]
 - Temporelle des pulses
 - DCTS
 - Modélisation linéaire de HEMT et LDMOS
 - Séquençage de tests
- **Station sous pointes manuelle** (MPI)

Banc [S] 4 ports 67 GHz



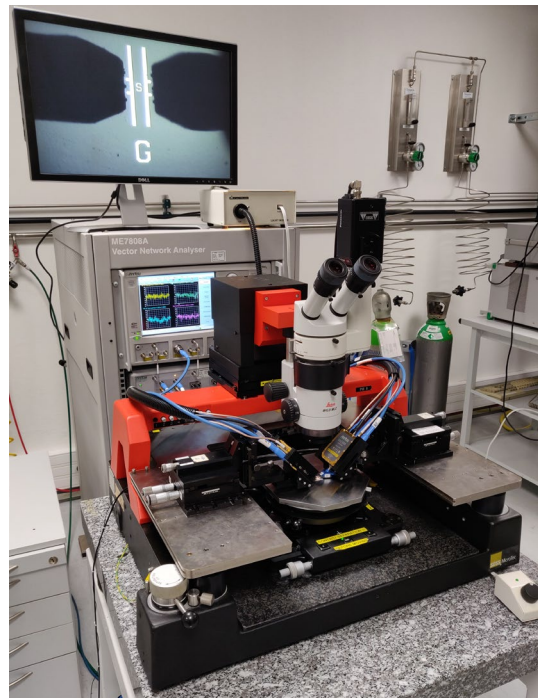
- **PNA-X N5247B** (Keysight)
 - Mesure de dispositif passif/actif
 - Mesure mode différentiel
 - Mesure de mélangeur
 - Mesure bi-porteuses
 - Mesure du gain de compression



Zone Hyperfréquences

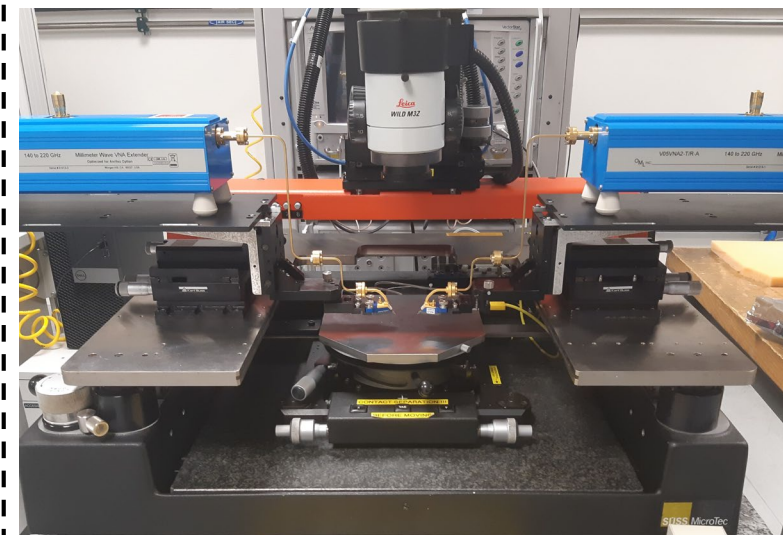
Applications millimétriques

Banc [S] 145 GHz

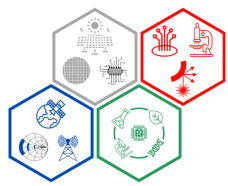


VectorStar ME7838D (Anritsu)

Banc [S] 140-220 GHz



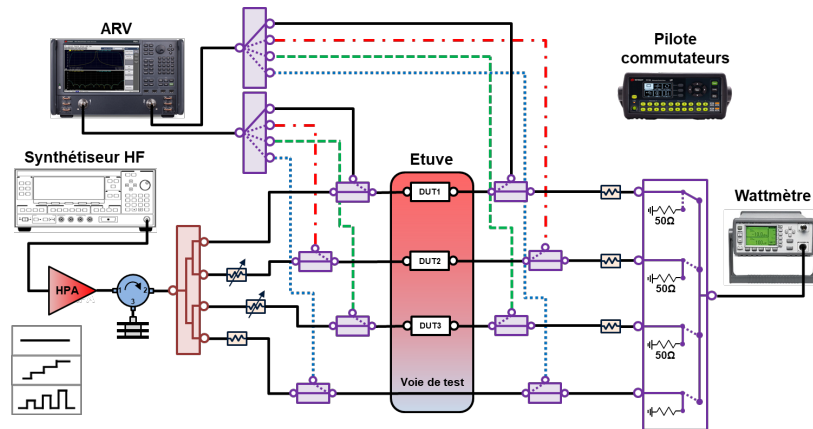
VectorStar ME7838D
+
Modules V05VNA2-T/R-A (OML)



Zone Hyperfréquences

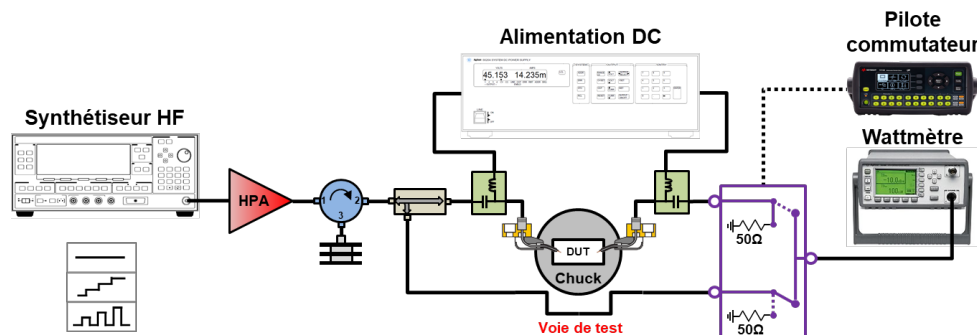


Banc automatisé de vieillissement/robustesse haute fréquence sur **véhicules de test**

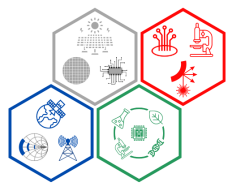


- Bande de fréquences : 1 à 40GHz
- Nombre max. de DUTs : 3
- Puissance limitée : +40dBm
- Cyclage thermique : -40°C à +100°C
- Plusieurs profils d'agression HF
- Acquisition des données :
 - Courants de Drain et de Grille,
 - Puissance injectée,
 - Puissance de sortie,
 - Paramètres [S],
 - $T^{\circ}_{étuve}$ et T°_{salle}

Banc automatisé de vieillissement/robustesse haute fréquence sur **puce**



- Bande de fréquences : 1 à 40GHz
- Nombre max. de DUTs : 1
- Puissance limitée (circuit) : +40dBm
- Puissance limitée (transistor) : +30dBm
- Plusieurs profils d'agression HF
- Acquisition des données :
 - Courant de Drain et de Grille,
 - Puissance injectée,
 - Puissance de sortie,
 - T°_{salle}



Zone Hyperfréquences

Fiabilité/robustesse
haute fréquence

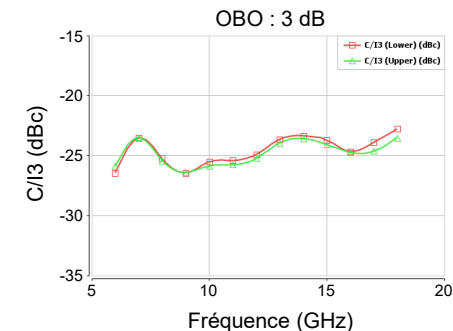
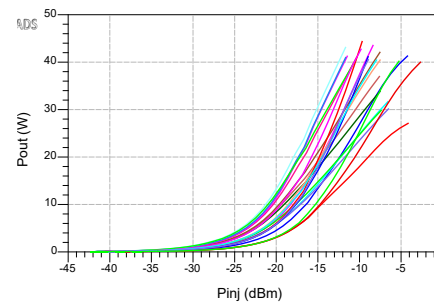
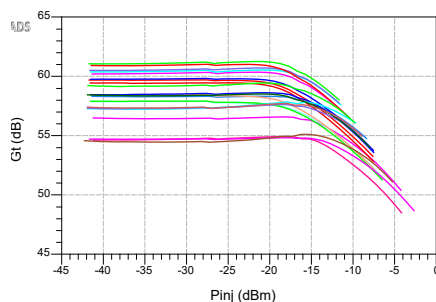


Nouvel équipement : amplificateur de puissance

- **MPA-6G-18G-30** (Maury Microwave)
- Bande de fréquences : **6 – 18 GHz**
- Puissance de sortie saturée min. : **30 W**
- Gain petit-signal min. : **48 dB**
- IM3 @ 3 dB recul typ. : **-20 dBc**



Mesures réalisées à l'aide du logiciel IQSTAR (AMCAD)



Critères d'arrêt : $P_{OUT} \geq 40 \text{ W}$ ou $G_C \geq 6 \text{ dB}$

- Les moyens expérimentaux de la plateforme
- **Faits marquants techniques**
 - Cas d'études avec partenaires industriels
 - Cas d'études de projets académiques
- Visite de la plateforme PROOF



- Analyse des instabilités d'amplificateurs de puissance
- Mesures de bruit HF de filières technologiques HEMTs GaN (*ancien banc bruit HF*)
- **Etude de robustesse d'amplificateurs faible bruit Techno#1**
- Etude de robustesse d'amplificateurs faible bruit Techno#2
- Mesures de bruit HF de filières technologiques HEMTs GaN (*nouveau banc bruit HF – 2024*)



- Etude de vieillissement à l'état OFF en régime impulsionnel de composants de puissance

Etude de robustesse de LNA Techno #1 bande Ku – Mode *step-stress*

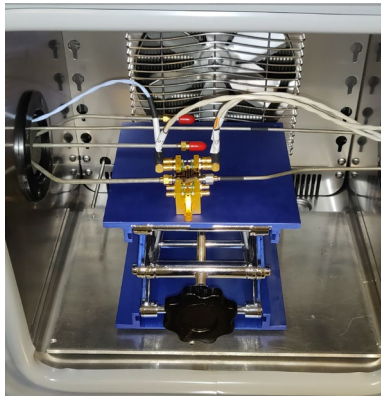
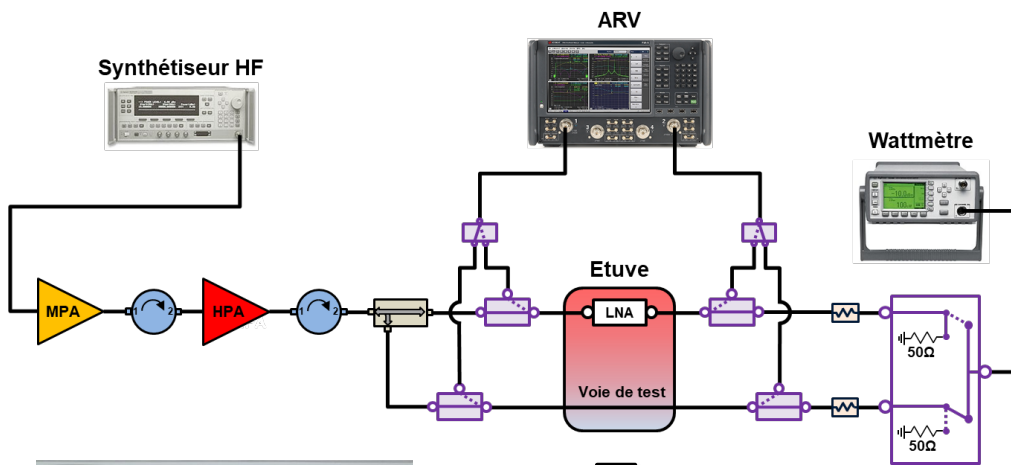
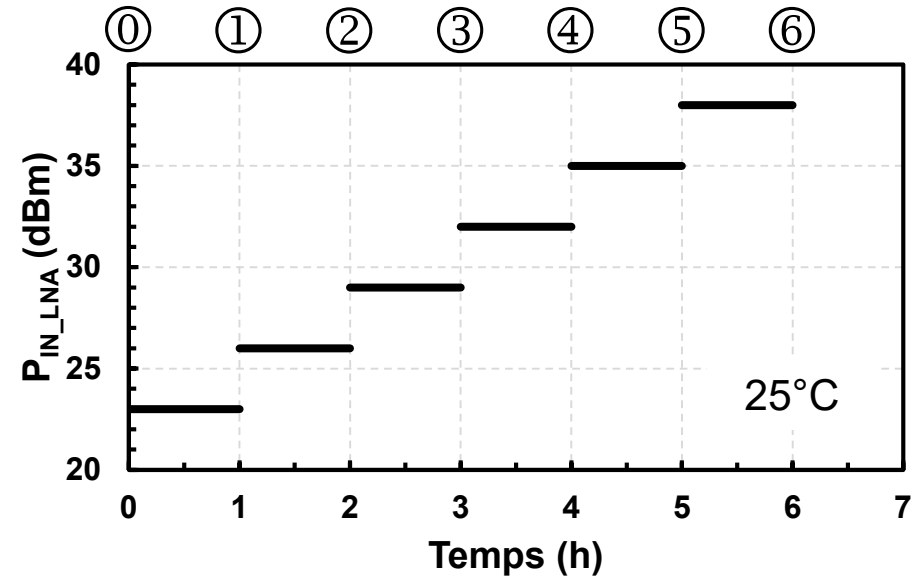


Photo LNA dans l'étuve

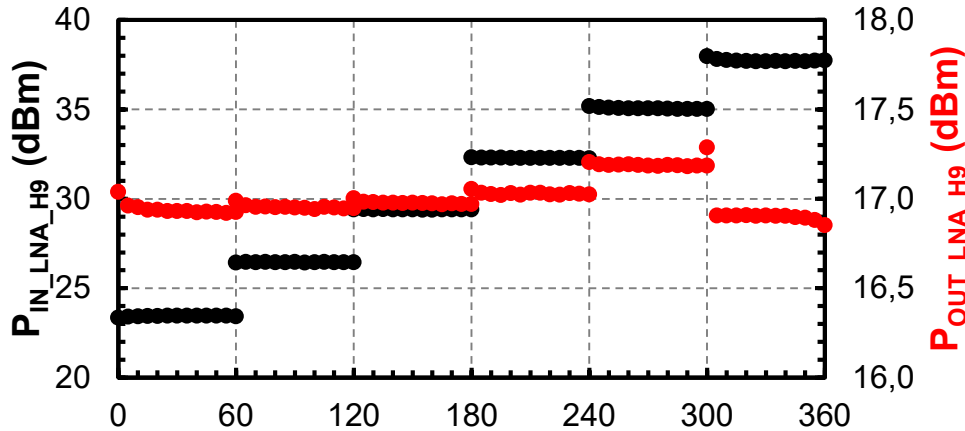


- ① et ⑥ : Mesures de début/fin de campagne (*ex-situ*)
 $I(V)$, $[S]_{ij}$ et NF_{50}
- Pendant stress : $P_{IN/OUT}$, I_{DX-RF} , $I_{G123-RF}$ et $T_{étuve}^{\circ}$
- ① à ⑤ : Mesures inter-paliers
 $[S]_{ij}$, I_{DX} et I_{G123}

*X : numéro étage LNA

Etude de robustesse de LNA Techno #1

Evolution de P_{OUT} , du courant I_{D-RF} individuel et du courant I_{G-RF} cumulé des 3 étages en fonction du temps et du niveau d'agression P_{IN}

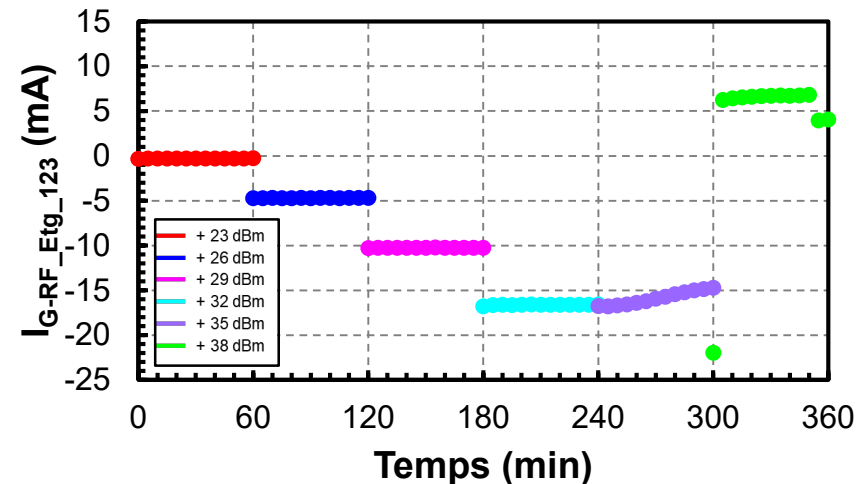
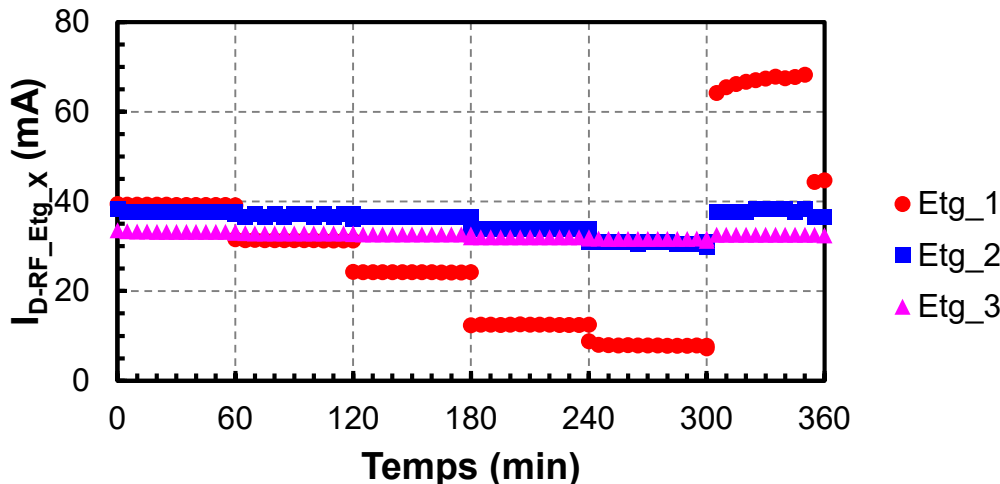


Limitation :

$$V_{G_Etg_123} = -1 V \quad I_{G_Etg_123} = 0.1 A$$

$$V_{D_Etg_123} = +12 V \quad I_{D_Etg_X} = 0.5 A$$

Campagne robustesse → conditions d'agression sous très fort niveau de compression ($IP_{1dB} = -12$ dBm)

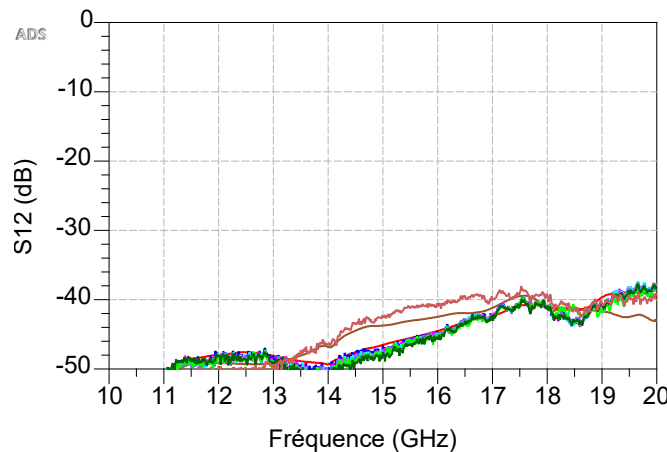
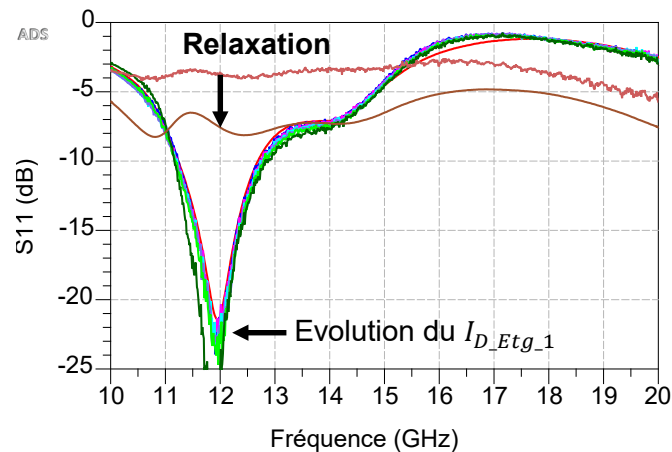


$$V_{G_Etg_123} = -1 V$$

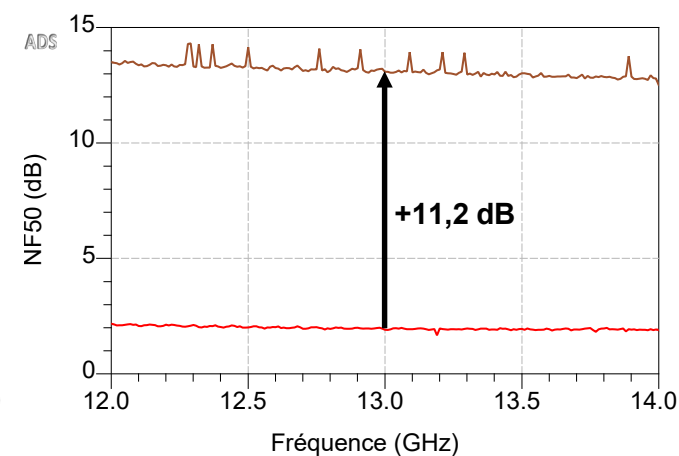
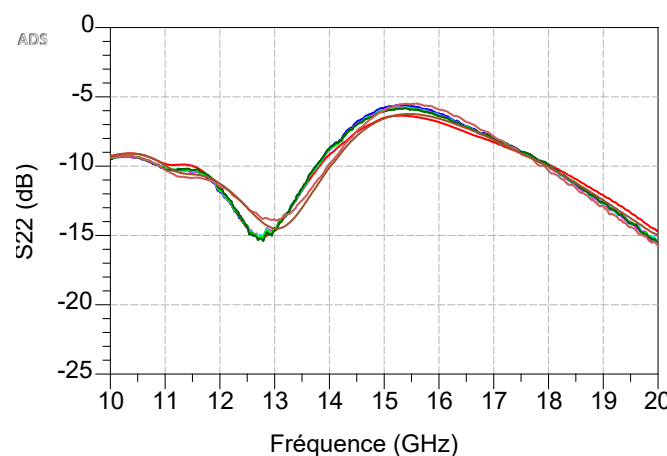
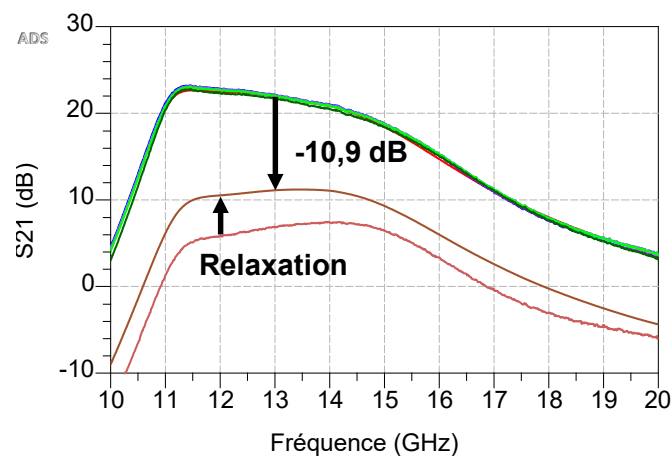
$$V_{D_Etg_123} = +12 V$$

Etude de robustesse de LNA Techno #1

Evolution des paramètres [S] et NF_{50}



- Avant stress PNA-X
 - Avant stress PNA-L
 - Après 1h @+ 23 dBm
 - Après 1h @+ 26 dBm
 - Après 1h @+ 29 dBm
 - Après 1h @+ 32 dBm
 - Après 1h @+ 35 dBm
 - Après 1h @+ 38 dBm
 - Après stress PNA-X
- } 3 jours entre les 2 mes.





- Caractérisations en bruit BF de composants de puissance avant/après vieillissement (Projet SiCret)



Partners from RF to Light

Thèse Bastien Pinault

- **Effet du stress RF sur différentes topologies de LNA GaN robuste 100 nm en bande X**

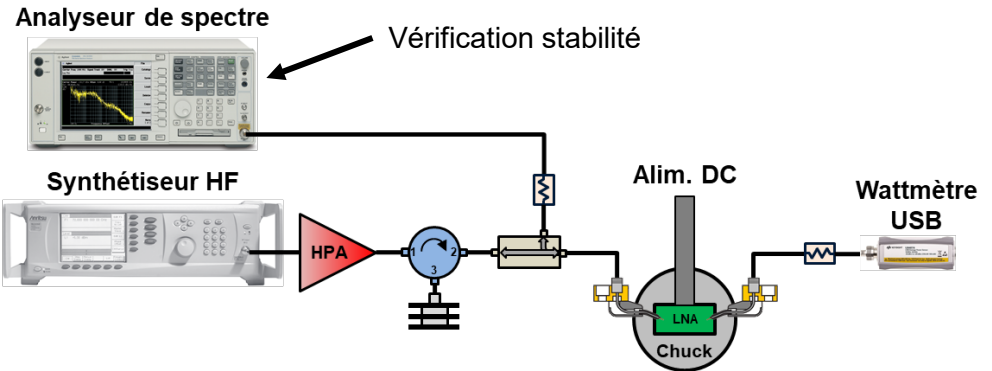
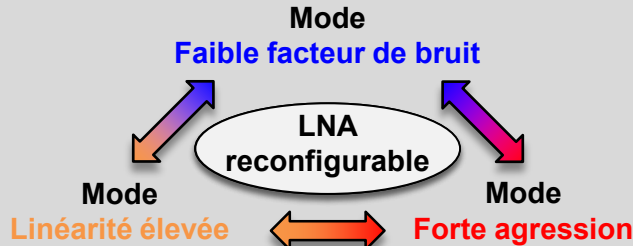


Thèse Nasri Said

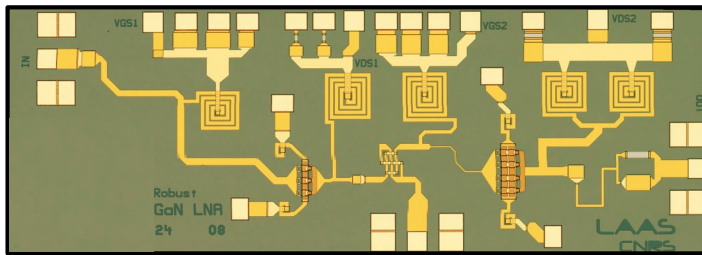
- **Analyse de la robustesse de deux variantes technologiques de transistors HEMT AlN/GaN**

Effet du stress RF sur différentes topologies de LNA GaN robuste 100 nm en bande X

Objectif - Développement d'une nouvelle solution de LNA robuste

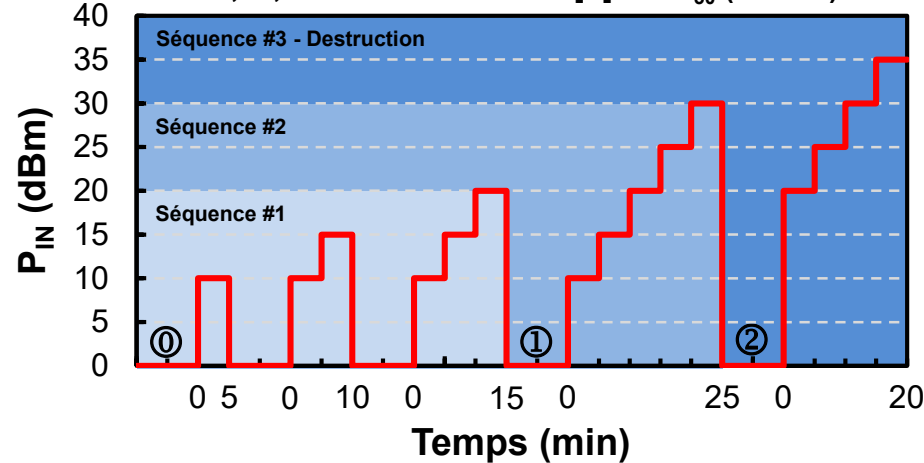


Prototype LNA 2 étages auto-reconfigurable



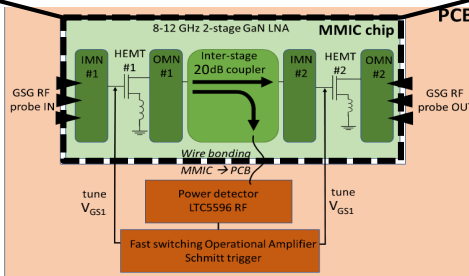
Protocole de robustesse

①, ② : caractérisations [S] et NF_{50} (ex-situ)



- Acquisition manuelle :
- Courant de Drain,
 - Courant de Grille,
 - Puissance injectée,
 - Puissance de sortie.

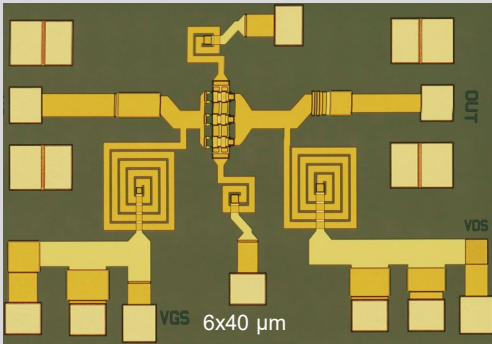
Techno.
GaN sur Si
D01GH



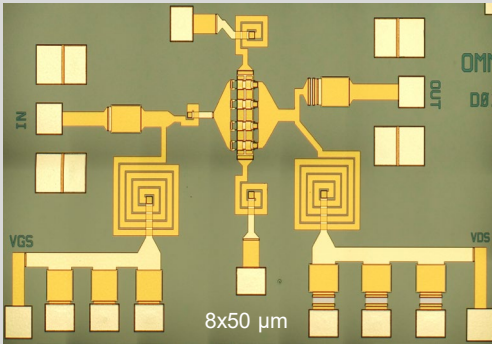
Effet du stress RF sur différentes topologies de LNA GaN robuste 100 nm en bande X

Preuve de concept – LNA mono-étage

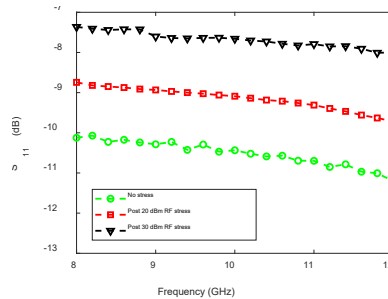
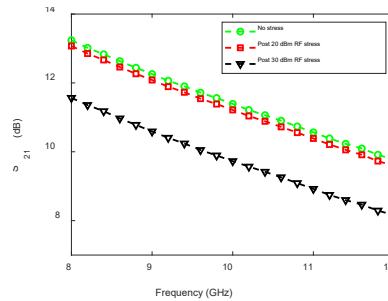
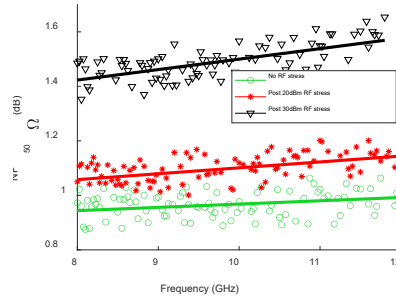
Approche conception reconfigurable
Mode **faible bruit** et **linéarité élevée**



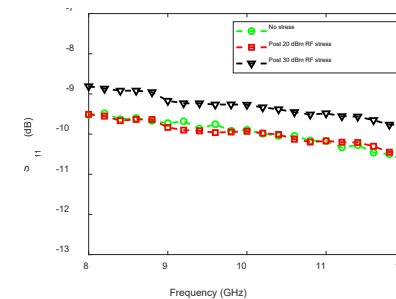
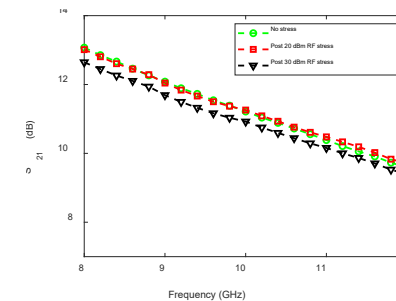
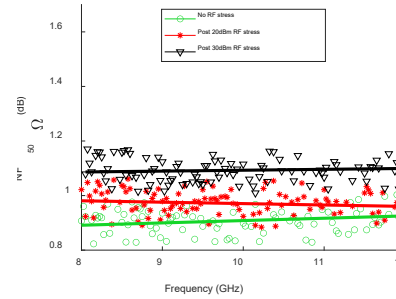
Approche conception classique
Mode **robuste**



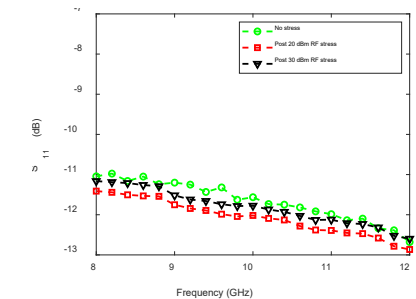
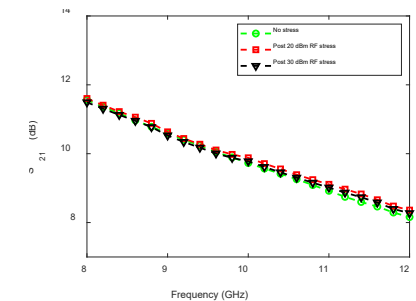
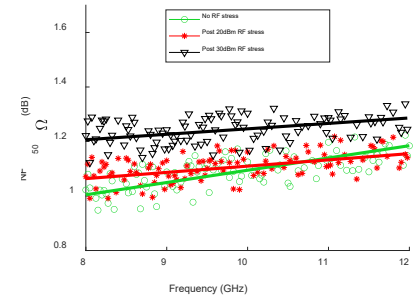
LNA n°1 - Mode **faible bruit**



LNA n°2 - Mode **linéarité élevée**



LNA n°3 - Mode **robuste**

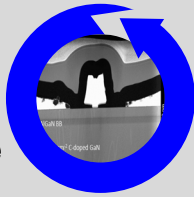


Analyse de la robustesse de deux variantes technologiques de transistors HEMT AIN/GaN

Objectif – Evaluation de la robustesse et fiabilité de technologies GaN pour applications au-delà de 40 GHz

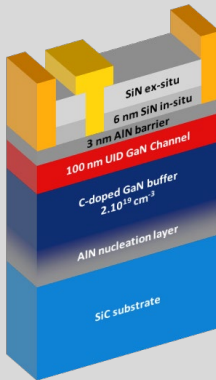
IEMN
Développement techno.

IMS
Robustesse DC

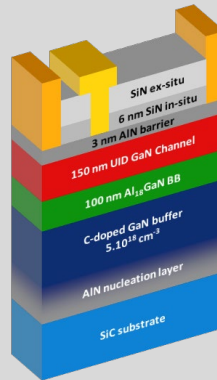


LAAS
Robustesse RF

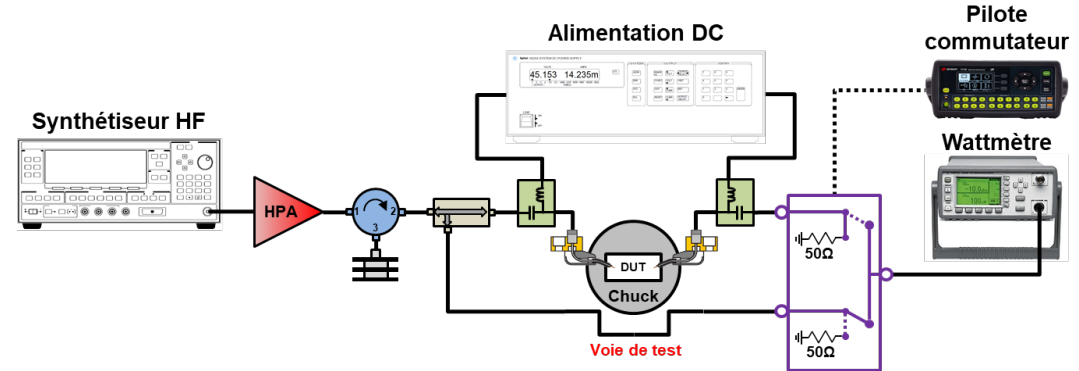
Variantes technologiques dans le cadre de cette étude



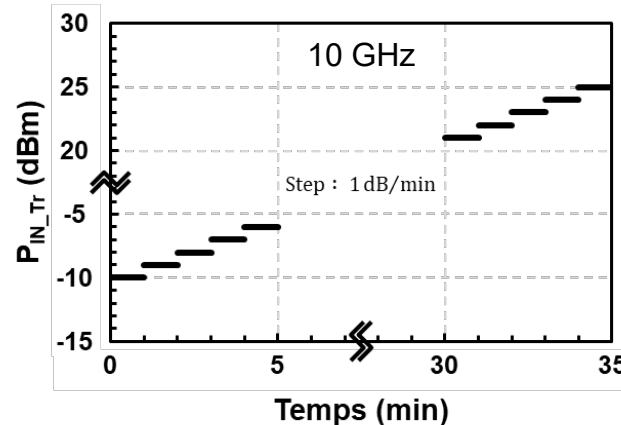
Structure A



Structure E



Protocole de robustesse

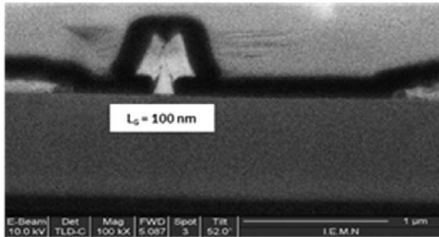


+ Caractérisations ex-situ I(V) avant/après stress

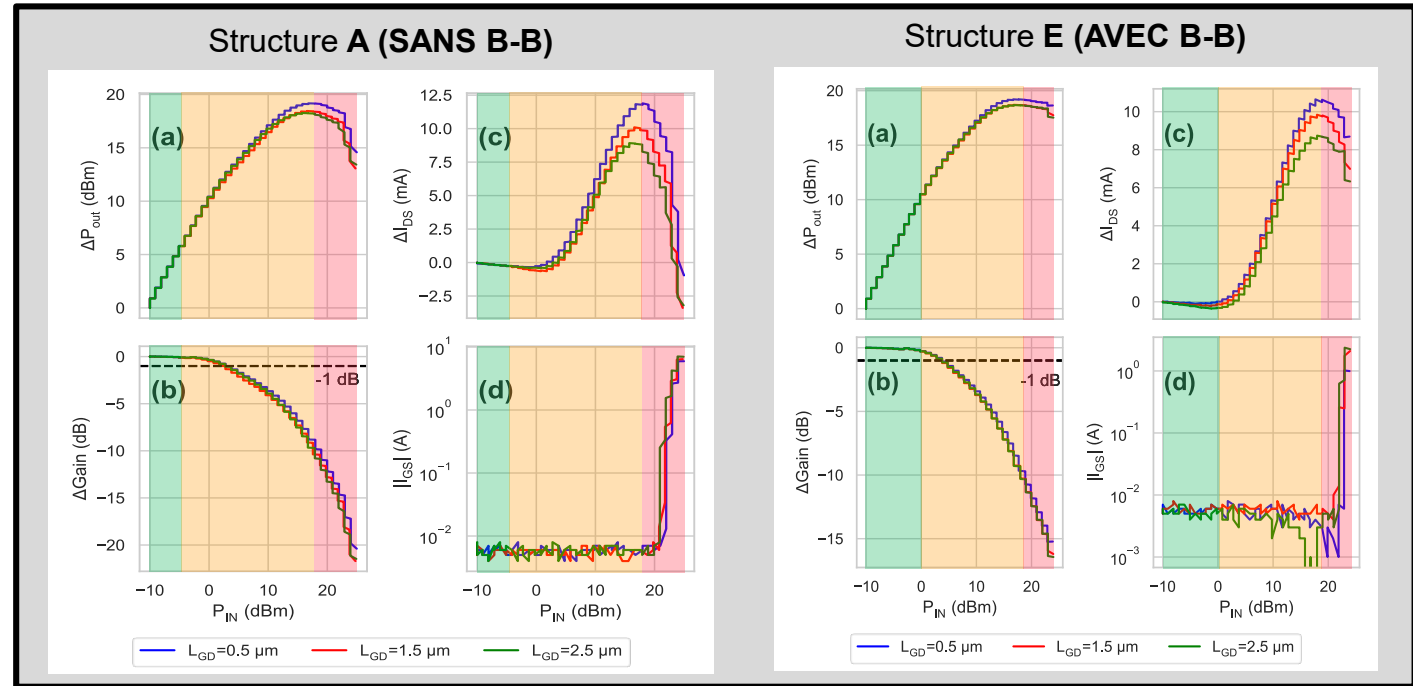
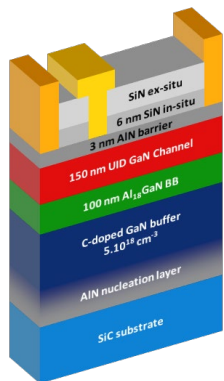
Analyse de la robustesse de deux variantes technologiques de transistors HEMT AIN/GaN

- Région 1 - linéaire
- Région 2 - auto-polar. et G_C
- Région 3 - dégradation

Kathia Harrouche et al 2022 Appl. Phys. Express 15 116504



Transistor : 2 x 50 x 0,1 μm^2



Technologie AIN robuste ($G_C = 10$ dB sans dégradation)

Structure E "Back-Barrier"

- Cinétique de **dégradation plus lente** avant défaillance fatale
- Puissance critique **Grille Schottky** : +18 dBm (commune aux 2 variantes)
- Meilleure **stabilité des charges** au niveau de l'**interface AIN/GaN**
- Stabilité du R_{ON} \rightarrow **Dopants C confinés** dans la couche tampon GaN
- **Dégradation** induite par les **effets non-linéaires** à fort niveau de compression

Au niveau de la plateforme

- Ensemble des études créent un **héritage** sur les bancs et leurs **évolutions**
 - Standards (cryo, bruit de phase, [S])
 - En cours (bruit HF)
 - Evolutions à "long terme" (orientées fiabilité VT et puce)
 - Régime impulsionnel
 - Bi-porteuses
 - Signal modulé

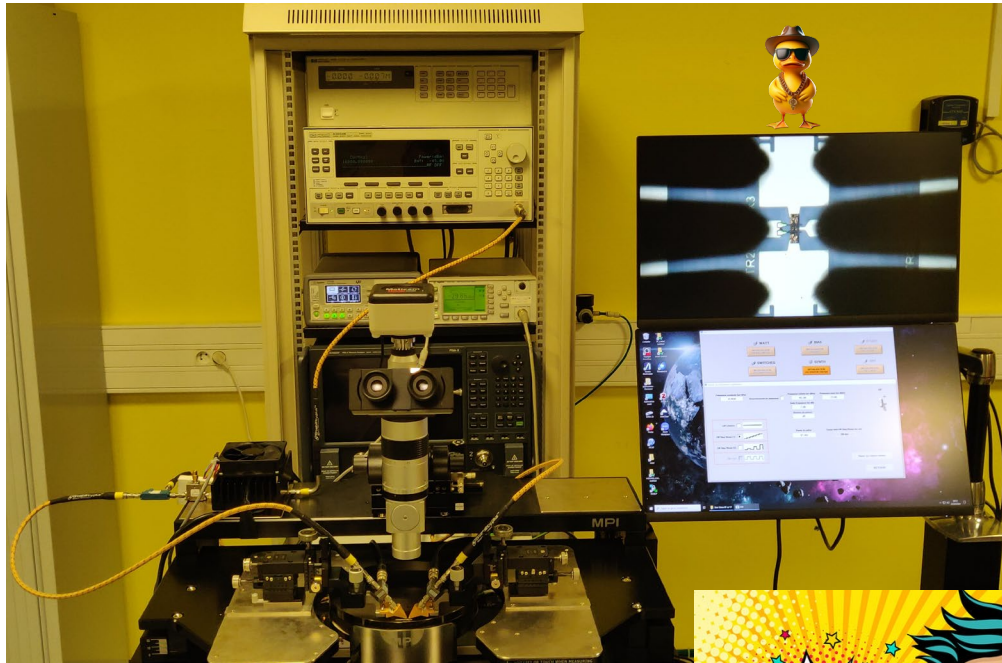
- **Développement dynamique continu** des moyens expérimentaux selon les besoins
 - Projets partenariats industriels (TRL \geq 5)
 - Projets de recherche (TRL \leq 4)

- Les moyens expérimentaux de la plateforme
- Faits marquants techniques
 - Cas d'études avec partenaires industriels
 - Cas d'études de projets académiques
- Visite de la plateforme PROOF

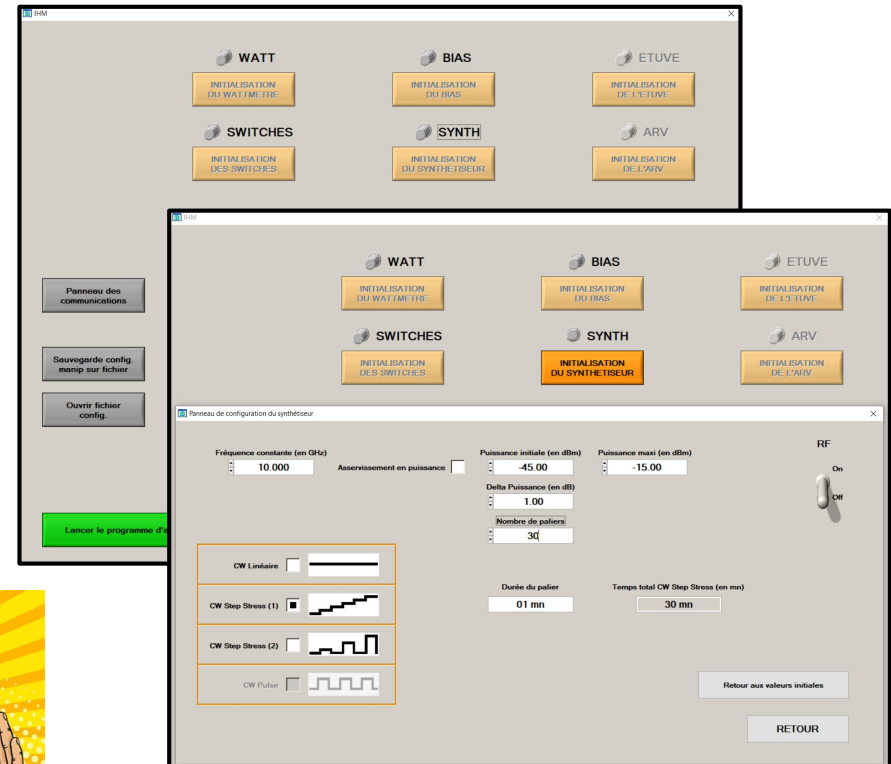
Visite de la plateforme PROOF



Banc automatisé de robustesse haute fréquence pour puce *Application sur un transistor*



Interface du logiciel





Platform of Reliability tOOLs for Failure analysis
dedicated to wide bandgap devices

Etudes de robustesse et fiabilité haute fréquence pour l'industrie et la recherche ... Construction d'une feuille de route à long terme

Pilote du projet : Laurent BARY

Responsable scientifique : **Jean-Guy TARTARIN**

Responsables techniques : **Damien SAUGNON**

Alexandre RUMEAU



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



- Une **plateforme opérationnelle et évolutive**: selon axes de Recherche (CNRS) et selon feuilles de route industrielles (Partenaires et/ou externe) → opportunités de nouvelles collaborations.

Un positionnement « PROOF » à plusieurs niveaux:

- Des ouvertures sur bancs disponibles (prestation de service + expertise)
 - Des aménagements de bancs (développements) en partenariat moyen/long terme (renforcement expertise PROOF)
 - Des bancs originaux et complémentaires en perpétuelle remise à niveau (vers des indicateurs plus fins, EVM – réduction des cycles de design)
- Un positionnement national par **Plateforme élargie** avec acteurs du territoire !? Définition d'une politique locale (LAAS) et nationale avec laboratoires partenaires – **Long Terme** (lien avec feuille de route indus.)
 - Fiabilité « **WideBandgap Devices and Circuits** », mais également **nouvelles filières technologiques** très hautes fréquences à « Eg modéré »... AXE RECHERCHE
 - Élargissement à de nouvelles fonctionnalités Dispositif/Circuit, évolutions des systèmes – Tests associés avec nouvelles potentialités
 - Veille technologique et participation projets Nationaux/Européens

- Fiabilité « **WideBandgap Devices and Circuits** », mais également **nouvelles filières technologiques** très hautes fréquences à « Eg modéré »...

AXE RECHERCHE

- Élargissement à de nouvelles fonctionnalités Dispositif/Circuit, évolutions des systèmes – Tests associés avec nouvelles potentialités plateforme PROOF. Analyses multi-outils, bancs experts uniques.
- Des analyses composant... jusqu'au circuit en situation réelle (suivi des modulations sous contraintes RF/Thermique, et analyses t_0 , $t_{intermédiaire}$, t_{final}): indicateurs opérationnels EVM.
- Des conceptions systèmes RF auto-reconfigurables, vers le *SWaP-C-Fiab*.
- Une **veille permanente** autour des technologies **bas niveau TRL (3-4)** et participation **projets Nationaux/Européens** (2DMs, TMDs PtSe₂, WSe₂, WS₂).
- Les **technologies émergentes bio-sourcées** ou à **faible empreinte carbone** (matériau, environnement **vs** performance/économie)
– pression sur les alimentations matériaux. IoT et mass market devices vs applications critiques (spatial, radar)

UNE LARGE GAMME D'ACTIVITÉ à définir en interne et collaborations.

UN PROJET À CONTRUIRE AVEC LES PARTENAIRES POUR UNE VISION LONG TERME