

# Dispositifs de protection des circuits radiorécepteurs aux impulsions hyperfréquences de puissance

Des phénomènes d'émission électronique à  
la fonction de limiteur de puissance

Jury

Gaëlle Lissorgues  
Elisabeth Dufour-Gergam  
Catherine Dehollain  
Anne Jourdain  
Volker Ziegler

Tarik Bourouina  
Christophe Gaquière  
Xavier Grison  
Pierre Nicole

## Plan

- I. Contexte de l'étude et spécifications
- II. Principe d'un limiteur de puissance distribué
- III. Conception et fabrication d'un démonstrateur de limiteur à émission électronique
- IV. Encapsulation spécifique et mise en boîtier
- V. Caractérisation en puissance des dispositifs fabriqués
- VI. Optimisations, conclusion et perspectives
- VII. Bilan général de la thèse

## I. Contexte

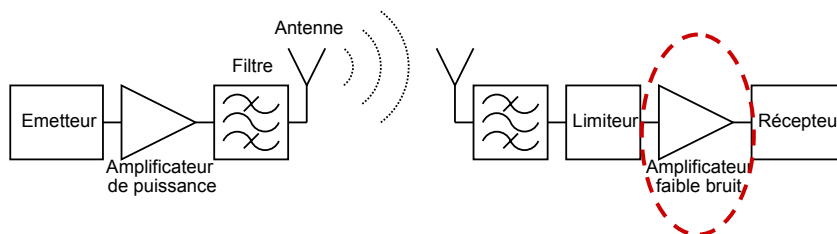
- Thèse de doctorat démarrée en octobre 2004
  - Bourse de la Délégation Générale pour l'Armement
  - Projet Recherche Exploratoire et Innovation N°0634033
- Domaines DGA concernés : Électronique / Ondes
- Travaux effectués au laboratoire ESYCOM (UMLV – CNAM – ESIEE)
- Multiplications des systèmes radiofréquences
- **Contrôle de l'environnement électromagnétique**



## Chaîne de transmission radio

- Chaîne d'émission/réception radio  
Radars, équipements de navigation, localisation...
- Élément sensible en réception

**Amplificateur faible bruit**  
 $P_{\max} = 20 \text{ dBm (100 mW)}$



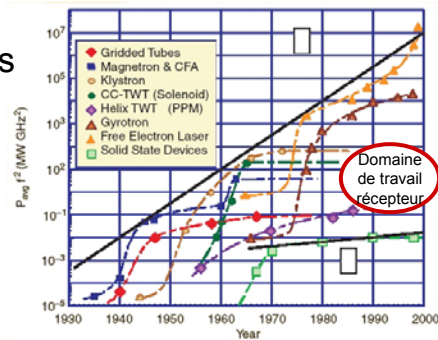
- **Protection nécessaire**

## Évolution des sources micro-ondes

- Développement de générateurs miniaturisés de forte puissance

- Bombe à compression de flux  
Source impulsionnelle  
1 GW à 1 GHz, **100 ns**
- Klystrons  
1 MW à 10 GHz (bande X)

Évolution des sources micro-ondes de forte puissance  
IEEE Microwave Magazine, vol. 2, 2001



- Effets des micro-ondes de forte puissance

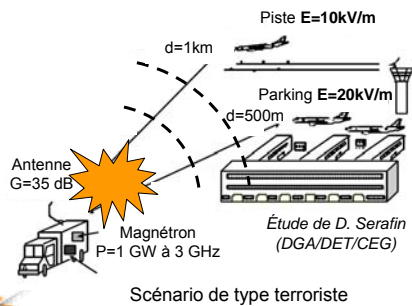
- Destruction des composants électroniques
- Saturation des éléments radiorécepteurs
- Génération d'interférences

## Domaines concernés

- Aéronautique

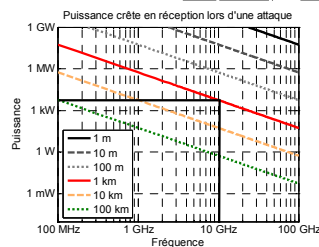
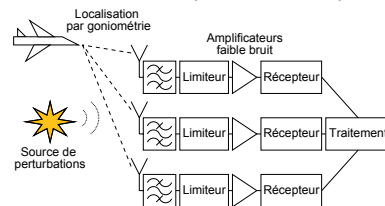
Protection des équipements embarqués (GPS, anti-collision...)  
Radar aéroport

Seuils de certification FAA  
3 kV/m à 10 GHz



- Militaire

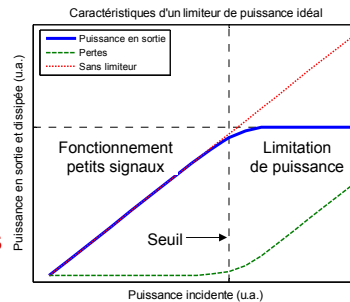
Protection récepteurs radios  
ex: Localisation par mesure de phase



$G_e=30$  dB  
 $G_r=30$  dB  
 $P_e=1$  GW  
 $f=10$  GHz  
 $d=1$  km  
 **$P_r > 5$  kW**

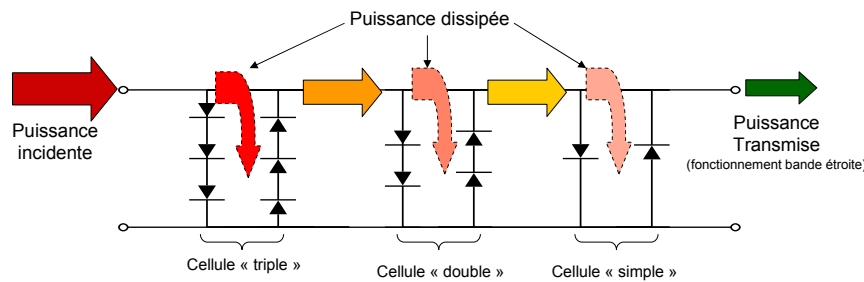
## Protections possibles

- Blindage électromagnétique
  - Équipements fixes au sol
- Électronique durcie et utilisation de nouveaux matériaux : GaN, SiC...
- **Limiteurs de puissance**
  - Lignes supraconductrices  
Équipement de cryogénie nécessaire
  - Matériaux ferroélectriques  
Performances hyperfréquences non adéquates (pertes et hystérésis)
  - Limiteur à plasma  
(en guide d'onde)
  - **Solutions à semi-conducteurs**  
Si, GaAs, SiC, GaN...



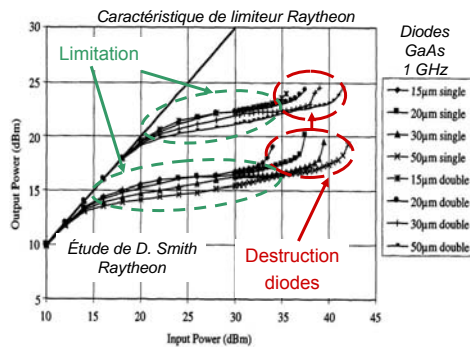
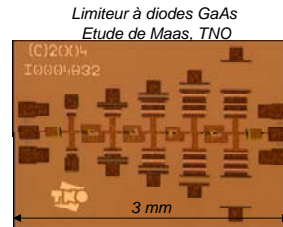
## Limiteurs à semi-conducteurs

- Topologie de limiteurs à semi-conducteurs  
Diodes en dérivation d'une ligne de transmission  
Fractionnement de la puissance à dissiper par différents étages
- Cellules de type « écrêteur » en cascade  
Seuils déterminés par le type de diodes



## État de l'art

- **Tenue en puissance**  
 200 W, 200  $\mu$ s à 2-4 GHz (Si), Thales (2003)  
 10 W à 1 GHz CW (GaAs), Raytheon (2002)  
 4 W à 10 GHz CW (GaAs), TNO (2007)  
 → Dissipation localisée de puissance  
 → **Destruction thermique des diodes**
- **Pertes d'insertion**  
 >1,5 dB en bande X (TNO)
- **Temps de réponse**  
 <100 ns
- **Non conservation de la phase**  
 → Incompatible avec certaines applications de localisation



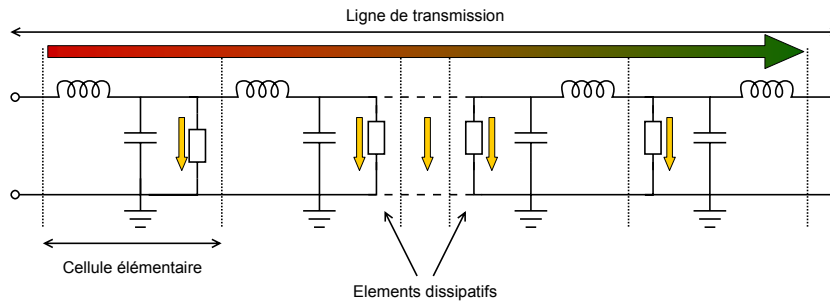
## Spécifications

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pertes d'insertion &lt;1 dB entre 10 MHz et 40 GHz</li> <li>• Tenue en puissance &gt;1 kW crête</li> <li>• Temps de réponse &lt;100 ns</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Distorsion de phase minimale</li> <li>• Technologie intégrée (intégration monolithique)</li> <li>• Composants passifs</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de puissance 100 W – 1 kW</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bande étroite</li> </ul>   |
- Militaire*
- Aéronautique*
- **Combinaison de contraintes non respectées par les technologies actuelles de limiteurs**
  - Ultra large bande
  - Fortes puissances crêtes
  - Temps de réponse

Nouvelles technologies à développer

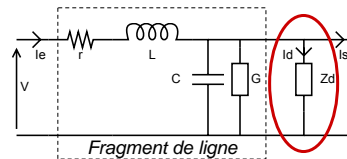
## II. Concept du limiteur distribué

- Réduction des contraintes thermiques liées à la dissipation de puissance
- Dissipation progressive et distribuée de puissance sur la longueur d'une ligne



## Cellule élémentaire

- Modèle d'une cellule élémentaire
  - Ligne de propagation à pertes
  - Impédance dynamique non linéaire



$r$  : résistance linéique de ligne  
 $L$  : inductance linéique de ligne  
 $C$  : capacité linéique de ligne  
 $G$  : conductance linéique de ligne  
**Impédance dynamique**  
 $Z_d$  : impédance non linéaire  
 Élément de dissipation dépendant de  $V$

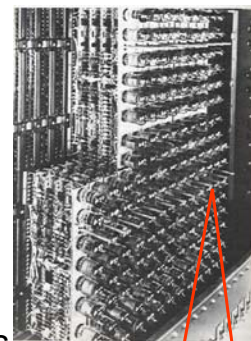
- Contraintes sur  $Z_d(V)$ 
  - Seuils à variation continue permettant le choix d'une distribution de puissance à dissiper
  - Fonction minimisant la distorsion de phase

## Technologies de réalisations possibles

- Semi-conducteurs
  - Seuils définis par une technologie de réalisation  
Variation par pas multiples de la tension seuil d'une diode
  - Limiteur de puissance réellement distribué difficilement réalisable en semi-conducteur
- Matériaux supraconducteurs et ferroélectriques
  - Fonction distribuée par définition
  - Réalisation non conventionnelle
- **Autres technologies**
  - **Microélectronique sous vide**

## III. Électronique sous vide

- Bref rappel historique
  - Base de l'électronique avant l'invention des transistors dans les années 1960
  - Disparition au profit des semi-conducteurs
  - Applications niches  
Électronique spatiale, stations de base...
- Avantages sur les semi-conducteurs
  - Immunité aux radiations
  - Transport balistique  
Fréquences de coupure élevées (> 100 GHz)
  - Fortes puissances admissibles (> MW)  
→ Applications aéronautiques / militaires possibles



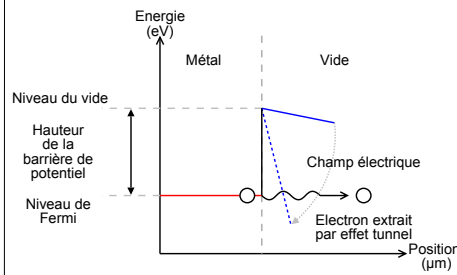
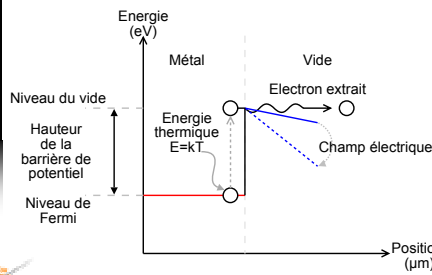
IBM



GE

## Phénomènes d'émission électronique

- Extraction d'électrons d'une surface métallique vers le vide
- Émission thermoïonique
  - Apport d'énergie par voie thermique
  - Température de l'ordre de 1000°C
- Émission par effet de champ
  - Réduction de la largeur de barrière de potentiel par un champ électrique
  - Émission par effet tunnel



## Lois d'émission électronique

- Émission thermoïonique  
Loi de Richardson-Dushman  
Structure de chauffage

$$I(T) = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

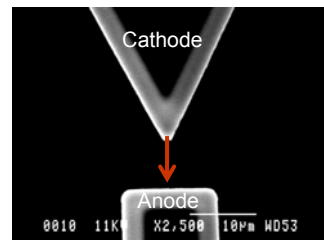


- Émission par effet de champ  
Loi de Fowler-Nordheim  
100% Passif

$$I(V) = a\beta^2 \frac{V^2}{\phi} \exp\left(-b \frac{\phi^{3/2}}{\beta V}\right)$$

A, a, b : constantes  
K : constante de Boltzmann  
Φ : travail d'extraction  
β : facteur d'amplification de champ

V : tension  
T : Température  
I : Courant

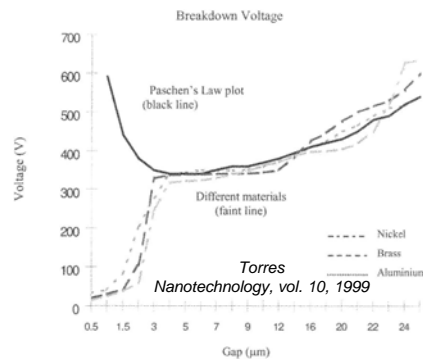


Structure à émission électronique par effet de champ



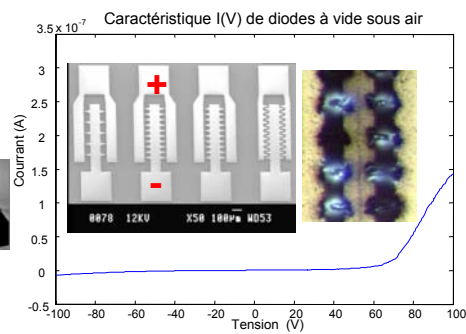
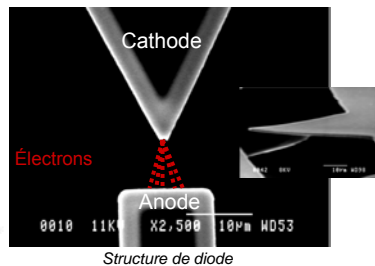
## Apparition de décharges plasma

- Phénomènes disruptifs
  - Collisions électrons/molécules gazeuses
  - Formation d'un plasma
  - Dégradation des électrodes
- Loi de Paschen
  - Détermine la tension de claquage
  - Dépend de :
    - Type de gaz
    - Pression
    - Géométrie



## Caractérisations de diodes à vide

- Structures de caractérisation statique
  - 20 diodes à vide en parallèle, anode-cathode : 2 µm
- Caractérisation I(V) sous atmosphère ambiante
- Mise en évidence d'émission électronique
- Décharge à 380 V (Loi de Paschen)



## IV. Limiteur à émission électronique

- Limiteur basé sur la mise en œuvre des phénomènes d'émission électronique
- Association de paires de diodes à vide le long d'une ligne
  - Cellules de type « écreteur »

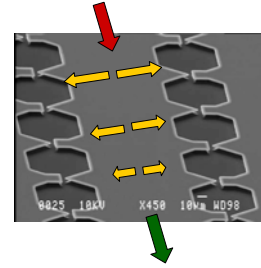
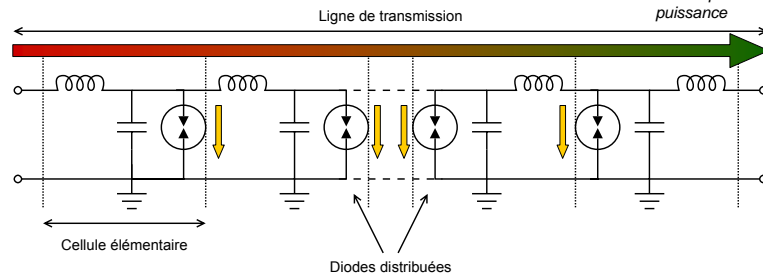
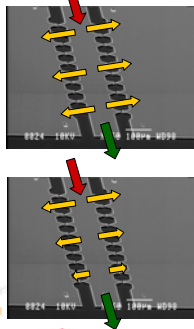


Illustration de répartition de puissance

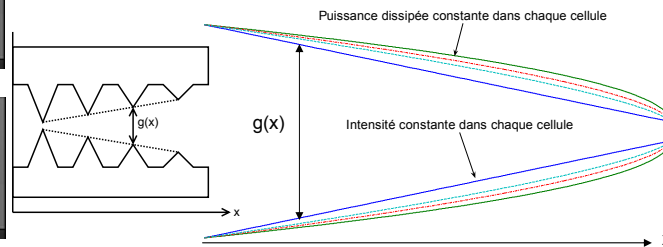


## Distribution de puissance

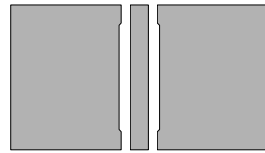
- Choix d'une distribution de puissance
  - **Objet du brevet N°0708291 déposé le 27/11/2007**
  - Relations entre les puissances dissipées et les impédances dynamiques
- Détermination des dimensions principales



Exemples de géométries de diodes pour différentes distribution de puissance



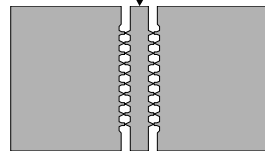
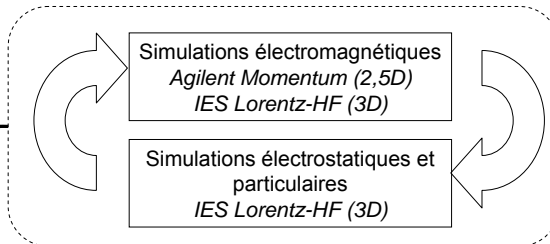
## Méthodologie de conception



Ligne 50 ohms

### Point de départ

- Spécifications
- Substrat silicium haute résistivité (>4000 ohms.cm)
- Impédance caractéristique 50 ohms
- Dimensions de ligne



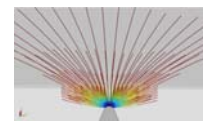
Exemple de limiteur

### Limiteur conçu par simulations itératives

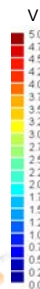
- Distribution de puissance
- Performances RF
- Efficacité d'émission électronique

## Outils de simulation

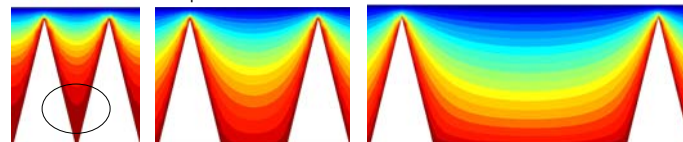
- Agilent Momentum 2005A
  - Simulations électromagnétiques 2,5D
- IES Lorentz-HF
  - Simulations électromagnétiques 3D
  - Détermination des trajectoires des charges
  - Calcul des temps de vol (1 ps sous 300 V)
  - Minimisation de l'écrantage électrostatique



Trajectoires d'électrons sous vide



Potentiel pour différentes densités d'électrodes



Écrantage électrostatique  
Réduction de l'efficacité  
d'émission électronique

## Contraintes de puissance

- Faibles épaisseurs de peau  $\delta$   
Aluminium: 0,8  $\mu\text{m}$  à 10 GHz  
0,6  $\mu\text{m}$  à 20 GHz
- Fortes densités de courant J  
ex : à 20 GHz, 1 kW sur 50 ohms  
 $J=12 \text{ A}/\mu\text{m}^2$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \sigma}}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{Z_0}}$$

$$J \approx \frac{I}{\delta^2}$$

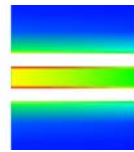
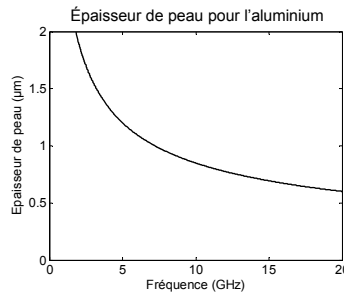


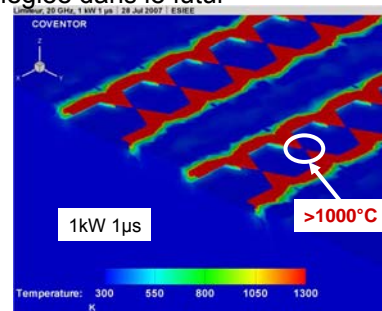
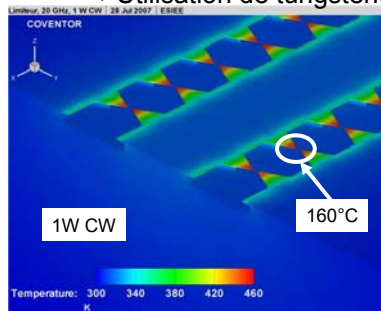
Illustration de l'effet de peau sur une ligne 50 ohms à 20 GHz simulée avec Momentum 2005

$\delta$  : épaisseur de peau  
 $\mu_0$  : perméabilité du vide  
 $Z_0$  : Impédance caractéristique  
J : Densité de courant  
P : Puissance

f : fréquence  
 $\sigma$  : conductivité électrique du métal  
I : Courant

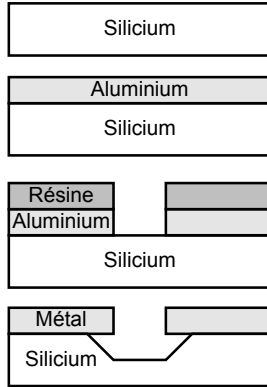
## Contraintes matériaux

- Simulations thermiques (CoventorWare 2006)
  - Épaisseur de peau de 0,6  $\mu\text{m}$  (Aluminium à 20 GHz)
  - Densité de courant + conduction thermique et radiation
- Fortes températures
  - Température de fusion d'aluminium dépassée (600°C)
  - Utilisation de tungstène privilégiée dans le futur



## Réalisations technologiques

- Procédé technologique à 1 masque

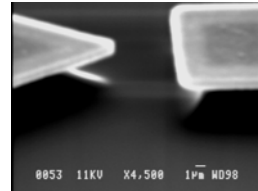
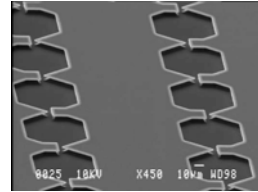
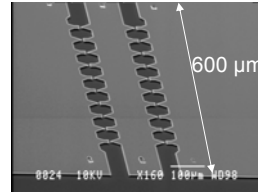


Substrat silicium HR de départ

Dépôt d'un métal  
• Aluminium ou  
• Or / Tungstène

Photolithographie  
Gravure métal

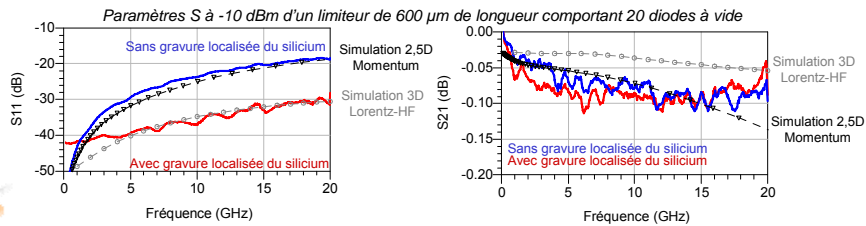
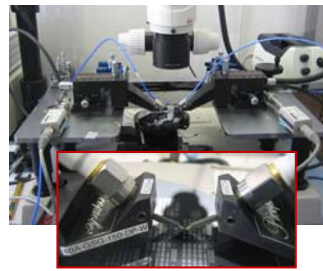
Gravure localisée du silicium par DRIE



Exemple de limiteur aluminium vu au microscope électronique à balayage

## Caractérisations vectorielles

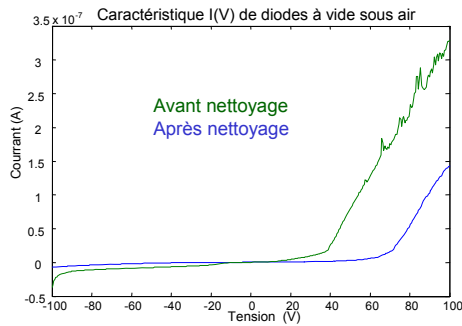
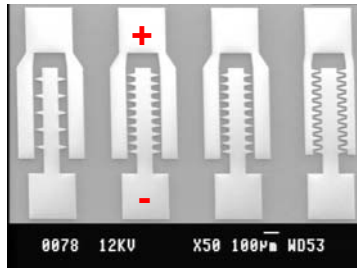
- Caractérisations sous pointes
  - Analyses vectorielles
  - Fréquences : 50 MHz – 40 GHz
- Performances équivalentes à une ligne coplanaire
- Adéquation mesures et simulations Momentum / Lorentz-HF



## Viellissement des structures

- Caractérisation I(V) de diodes à vide  
6 mois après fabrication et après nettoyage des électrodes
- Forte dépendance de l'état de surface  
impuretés, oxydation des métaux...

→ **Nécessité d'une encapsulation adaptée**



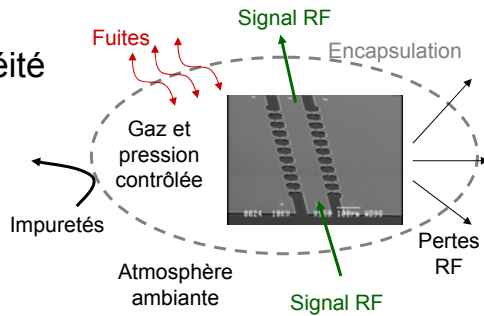
## Synthèse

- Conception du limiteur par simulations itératives
  - Agilent Momentum, électromagnétique
  - IES Lorentz-HF, électromagnétique et particulaire
  - CoventorWare, thermique
- Fabrication simple et rapide sur silicium
- Bonne adéquation mesures et simulations

- Connectique pour mesures en puissance
  - Sensibilité à l'environnement
- **Problématique d'encapsulation et mise en boîtier**

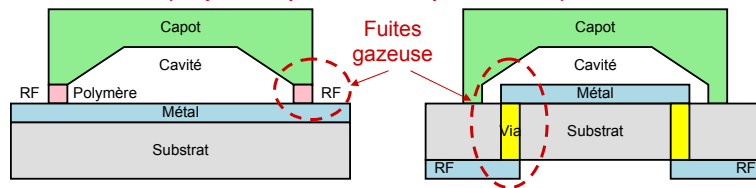
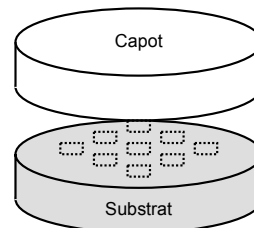
## V. Problématiques d'encapsulation

- Protection des dispositifs
  - Impuretés
  - Réactions chimiques (oxydation...)
- Contrôle de l'environnement
  - Gaz et pression
- Herméticité / Étanchéité
- Interconnexion RF
  - Bandes X et Ku
  - Faibles pertes
  - Tenue en puissance



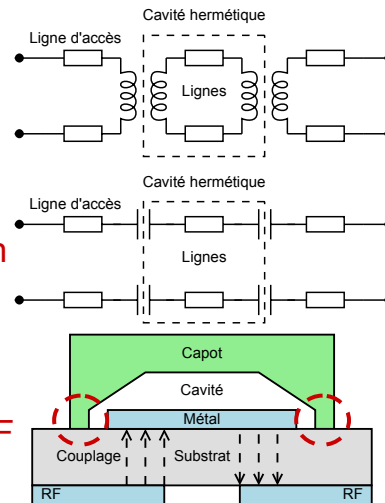
## Encapsulation 0-level

- Assemblage de 2 substrats lors de la fabrication
- Formation de cavités étanches ou hermétiques
- Soudure verre / silicium
- **Problématique de l'interconnexion électrique**
  - Fuites gazeuses
  - Pertes RF (capot, ruptures d'impédances)



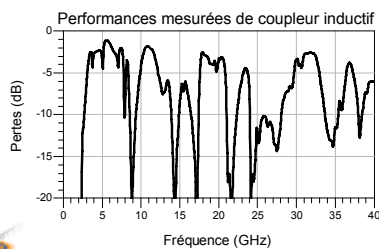
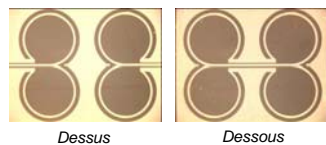
## Interconnexion RF

- Alimentation par couplage électromagnétique
  - Inductif
  - Capacitif
- Non continuité des lignes métalliques
- Intégrité de l'encapsulation préservée
- Minimisation des fuites gazeuses
- Minimisation des pertes RF

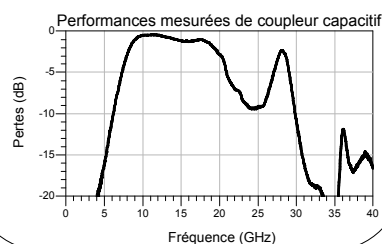
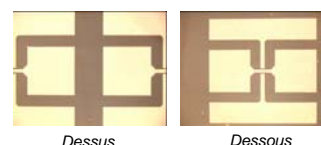


## Couplages inductif et capacitif

- Inductif
  - Transformateur
  - Courants de Foucault



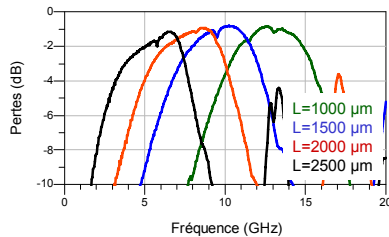
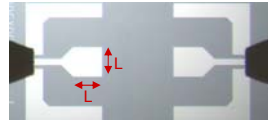
- Capacitif
  - Transition coplanaire-coplanaire



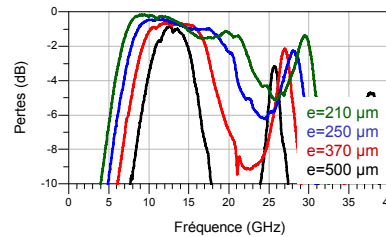


## Performances de coupleurs capacitifs

- Filtre passe bande intégré dans le package
- Fréquences et largeurs de bande variables  
Dimensionnement suivant l'application
- Faibles pertes par couplage  
<0,1 dB par transition



Performances mesurées de couplage sur silicium d'épaisseur 500 μm pour différentes dimensions de coupleurs



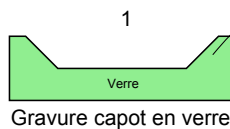
Performances mesurées de couplage sur silicium d'épaisseur variable pour des coupleurs de dimension L=1000 μm

## Fabrication de limiteurs encapsulés

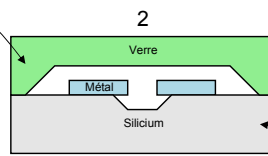
- Procédé de fabrication
  1. Gravure d'un capot en verre
  2. Soudure verre-silicium
  3. Définition des structures de couplage



Ligne 50 ohms encapsulée vue à travers le verre  
Volume de cavité : 3 μL

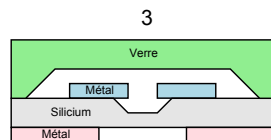


Gravure capot en verre



Encapsulation 0-level  
Soudure anodique

Limiteur précédent

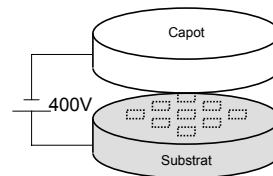


- Amincissement silicium
- Création des structures de couplage

Ajustement à la demande des performances RF

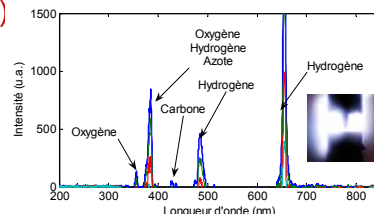
## Etape de soudure anodique

- Soudure entre un substrat de silicium et un substrat en verre
- Application d'une tension de 400V
- Étape effectuée à  $10^{-5}$  mbar et à  $350^{\circ}\text{C}$
- Phénomènes de dégazage lors de l'encapsulation
  - Désorption de gaz
  - Dégazage d'oxygène lors de la soudure anodique
  - Probable oxydation de l'aluminium
- Composition de l'environnement final à déterminer selon l'application (gaz et pression)



## Analyse de l'encapsulation

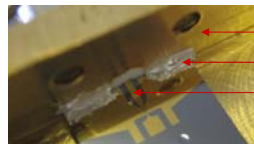
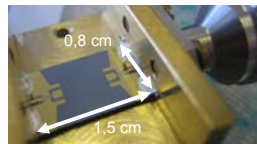
- Analyses non destructives et in situ nécessaires
  - Espèces chimiques
  - Pression
  - Influence sur les phénomènes de décharge
- Développement en cours  
 Spectroscopie par émission atomique intégrée (Atomic Emission Spectroscopy)
  - Excitation / désexcitation d'atomes dans un plasma
  - Émission d'un spectre lumineux caractéristique
  - Alternative possible aux tests de fuite à l'hélium



Détection de l'évaporation de l'éthanol par AES  
 ESIEE – ENS Cachan – Institut d'Alembert

## Étape de mise en boîtier

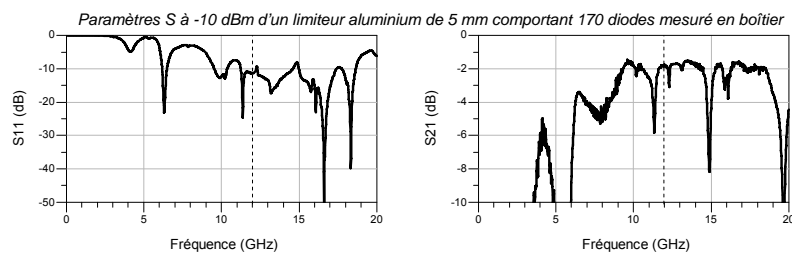
- Etape préalable aux caractérisations en puissance
- Découpe des puces
- Mise en boîtier manuelle
  - Report par collage temporaire (cire)
  - Reprise de masse assurée par colle époxy (H20E)
  - Contact direct de la ligne signal avec le conducteur central d'un connecteur coaxial (N, SMA, K...)



Boîtier laiton  
Colle époxy  
Contact connecteur

## Performances de limiteurs en boîtier

- Caractérisation après mise en boîtier
  - Pertes d'insertion à 12 GHz : 1,8 dB
  - Pertes dues à la mise en boîtier manuelle : >0,6 dB  
Transition coaxiale-coplanaire incluse
  - Pertes par couplage : 0,2 dB
  - **Limiteur 5 mm seul : < 1 dB (<2 dB/cm)**



- Limiteur à émission électronique à faible perte et large bande
- Influence de l'encapsulation rendue négligeable
- Filtrage passe bande intégré à l'encapsulation
  - Réjection de signaux perturbateurs
  - Caractéristiques RF ajustées lors de la fabrication
- 1 journée de fabrication en salle blanche
- 1 journée pour la mise en boîtier pour caractérisation en puissance

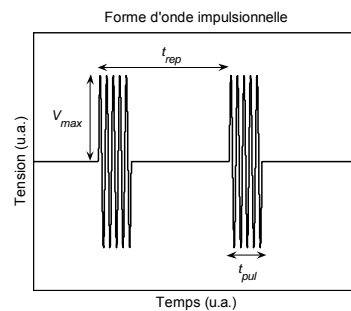


## VI. Étude en puissance

- Signaux typiques
  - Impulsions courtes
  - Porteuse en bande X
  - Faible fréquence de répétition
- Puissance RF nécessaire
  - Claquage à 380 V lors de l'étude statique
  - Équivalent à 1,4 kW sur 50 ohms

$$P = \frac{V^2}{2Z_0}$$

- Impédances d'antenne plus élevées ( $Z_0 > 50$  ohms)
- Cas plus favorables en pratique



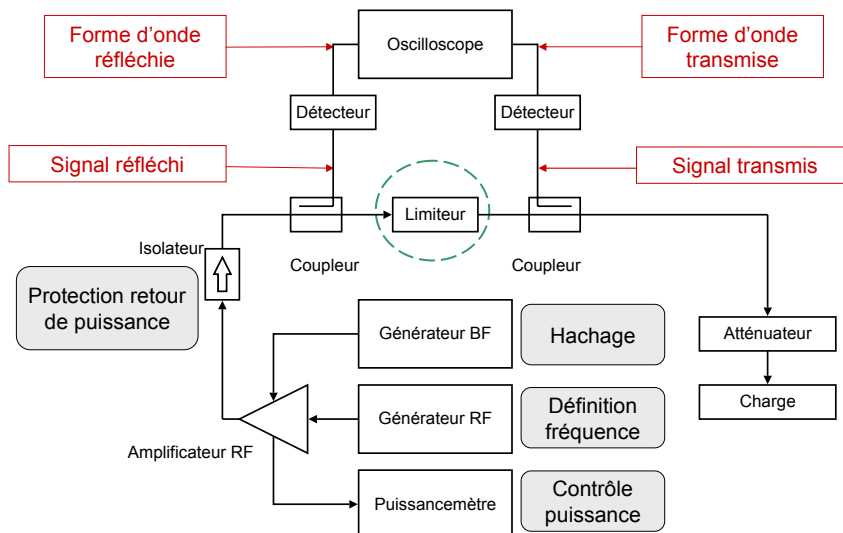
$V_{max}$  : tension crête (>100V)  
 $t_{rep}$  : période de répétition (ms)  
 $t_{pul}$  : durée d'impulsion ( $\mu$ s)

## Caractérisations impulsionnelles

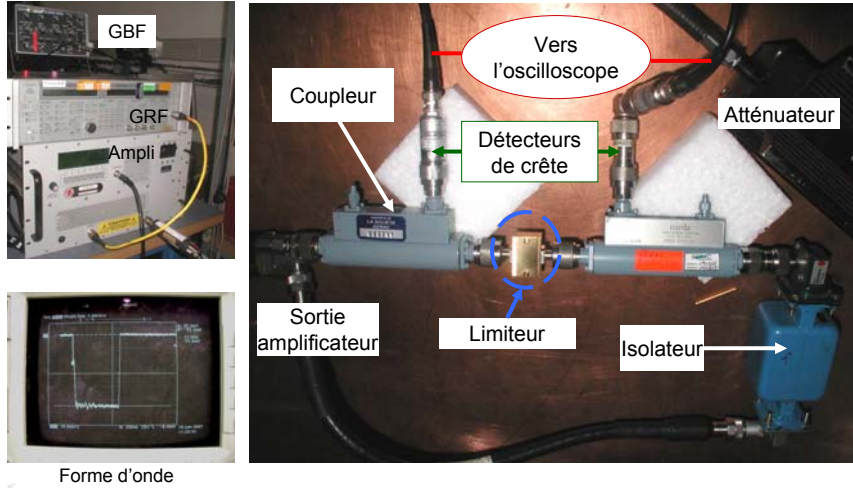
- Mesures effectuées au GERAC (Élancourt)
- Moyens de compatibilité électromagnétique
- Gamme de puissances
  - Jusqu'à 250 W CW et impulsionnel
  - Jusqu'à 2 kW en impulsionnel
- Bandes X, Ku
- Signaux et puissances définis selon des scénarios réalistes (ex : Radars)



## Banc de caractérisation en puissance



## Banc de caractérisation en puissance

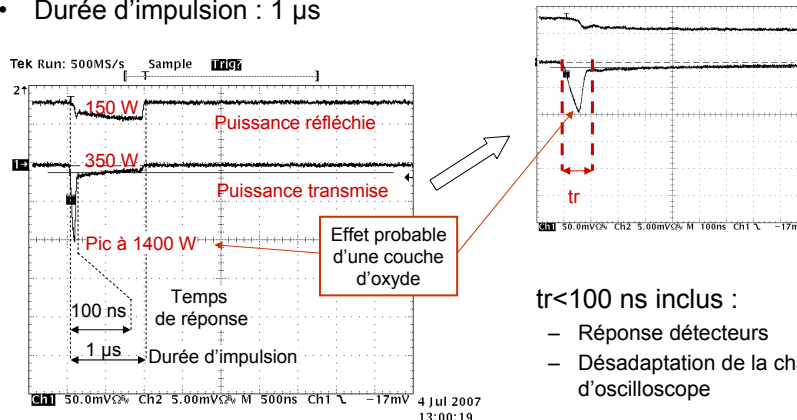


Forme d'onde



## Résultats de mesure en puissance

- Limiteur précédent (5 mm, 170 diodes aluminium) mis en boîtier
- Fréquence : 12 GHz
- Puissance en sortie d'amplificateur : 2 kW
- Durée d'impulsion : 1  $\mu$ s



## Bilan de mesure en puissance

- Bilan des puissances à 12 GHz et 2 kW, 1  $\mu$ s
  - **Puissance réfléchie** **150 W**
    - à 1 mW  $S_{11} = -11$  dB
    - à 2 kW  $S_{11} = -11$  dB
  - **Puissance transmise** **350 W**
    - à 1 mW  $S_{21} = -1,7$  dB
    - à 2 kW  $S_{21} = -7,5$  dB
  - **Puissance dissipée** **1,5 kW**
- Pic de puissance en sortie et temps de réponse 100 ns  
→ Probablement dû à l'oxydation partielle des électrodes
- Dégradation des électrodes non visible au microscope  
(contrôle à travers le verre sans ouverture du boîtier)

## Synthèse en puissance

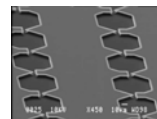
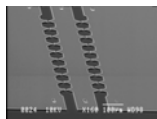
- Démonstration de la faisabilité de limitation de puissance par émission électronique traduite par
    - Une augmentation des pertes d'insertions (6 dB)
  - Désadaptation quasi insensible à la puissance
  - Forts niveaux de puissance dissipée sous faible volume
  - Protection assurée face à un scénario militaire ou terroriste « offensif »
- 
- Reproductibilité des mesures peut être améliorée
    - Mise en boîtier manuelle
    - Réactions chimiques avec la température (Al + O<sub>2</sub>)
    - **Maîtrise des phénomènes de dégazage dans l'encapsulation**

## VI. Optimisations

- Augmentation de la bande passante et des fréquences de travail
    - Optimisation des structures de couplage capacitif
  - Réduction des pertes et augmentation de la tenue en puissance
    - Combinaison Or / Tungstène
  - Encapsulation avec matériaux absorbants « getters »
    - Absorption de l'oxygène dégazé par la soudure anodique
  - Diminution des seuils de déclenchement
    - Encapsulation sous gaz neutres
    - Mise en œuvre de lithographie sub-micronique
    - Augmentation de l'impédance caractéristique
    - Autres dispositifs (objet du brevet en cours)
- **Seuils atteignables <10 W**

## Conclusion

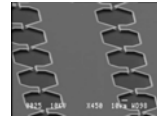
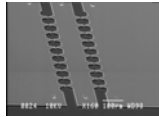
- Concept de limiteur de puissance distribué à émission électronique validé par un premier démonstrateur
  - Conception multi-physique, différents types de simulations
- Performances supérieures aux limiteurs à semi-conducteurs pour nos applications
  - Pertes d'insertion plus faibles
  - Fonctionnement dans une large gamme de puissances (10 W-1 kW)
  - Tenue à des puissances plus élevées >1kW
  - Fabrication totalement monolithique
- Composant encapsulé « prêt à l'emploi »





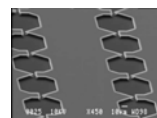
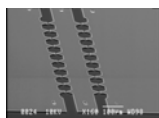
## Perspectives

- Principe déclinable dans d'autres technologies (microstrip...)
- Intégration du limiteur avec d'autres fonctions
  - Antenne
  - Filtre sélectif accordable (ex: MEMS-RF)
- Nouvelles fonctions : mise en œuvre d'interactions onde/plasma
  - Atténuateur variable
  - Amplification distribuée
- Développement d'une méthode d'analyse intégrée d'encapsulation 0-level (spectroscopie par émission atomique)



## VII. Bilan général de la thèse

- Compétences acquises dans différents domaines techniques (analyse système, simulations multiphysiques, microfabrication, caractérisation...)
- « Du concept à un démonstrateur fonctionnel »
- 10 publications en conférence
- Articles de revues en soumission
- **1 brevet N°0708291 déposé**
- Mise en place d'un banc de caractérisation vectorielle 6-18 GHz 10 W CW + polarisation 200 V 1 MHz  
→ Caractérisation en puissance de MEMS-RF



GERAC

Bernard Sutra, Serge Blasquez  
Thalès Systèmes Aéroportés

Robert Pansu, Jacques Delaire  
Institut d'Alembert, ENS-Cachan

SIGTEL, SMM, ELMI  
ESIEE