

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

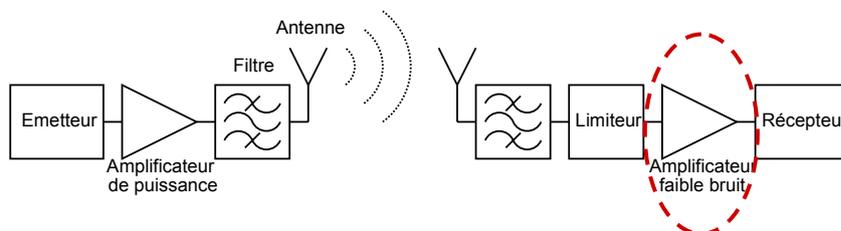
- Thèse de doctorat démarrée en octobre 2004
 - Bourse de la Délégation Générale pour l'Armement
 - Projet Recherche Exploratoire et Innovation N°0634033
- Domaines DGA concernés : Électronique / Ondes
- Travaux effectués au laboratoire ESYCOM (UMLV – CNAM – ESIEE)
- Multiplications des systèmes radiofréquences
- **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
 $P_{\max} = 20 \text{ dBm (100 mW)}$



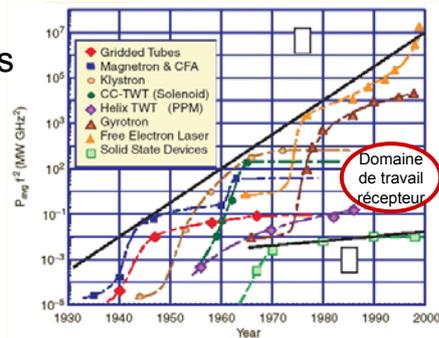
- **Protection nécessaire**

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

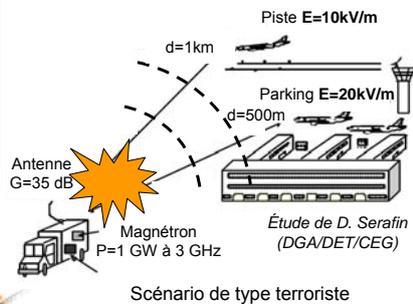
- Destruction des composants électroniques
- Saturation des éléments radiorécepteurs
- Génération d'interférences

Domaines concernés

- Aéronautique

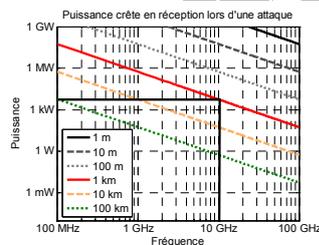
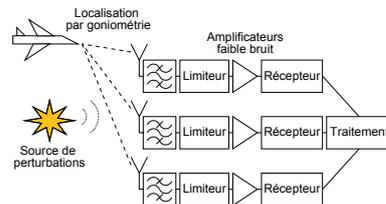
Protection des équipements embarqués (GPS, anti-collision...)
Radar aéroport

Seuils de certification FAA
3 kV/m à 10 GHz



- Militaire

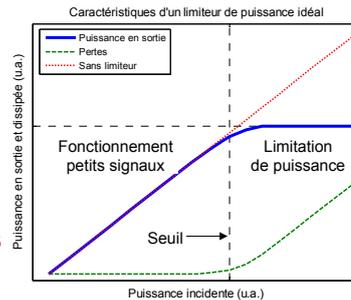
Protection récepteurs radios
ex: Localisation par mesure de phase



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

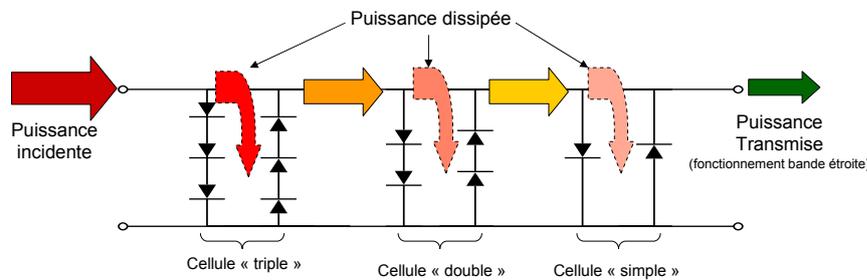
Protections possibles

- 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...



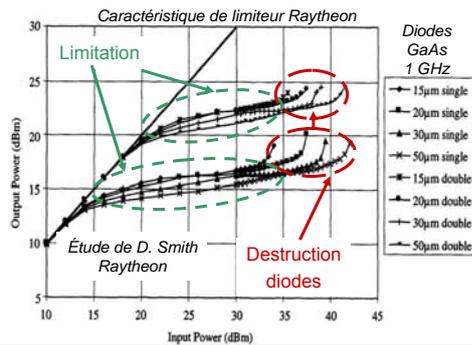
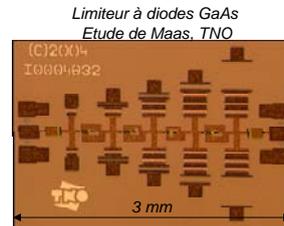
Limiteurs à semi-conducteurs

- 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 μ 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

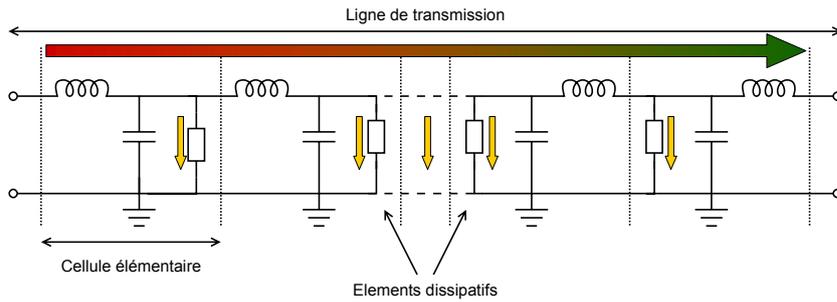


Spécifications

- Pertes d'insertion <1 dB entre 10 MHz et 40 GHz
 - Tenue en puissance >1 kW crête
 - Temps de réponse <100 ns
 - Plage de puissance 100 W – 1 kW
 - Distorsion de phase minimale
 - Technologie intégrée (intégration monolithique)
 - Composants passifs
 - Bande étroite
- 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

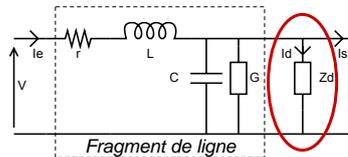
II. Concept du limiteur distribué

- 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

Z_d : impédance non linéaire
 Élément de dissipation dépendant de V

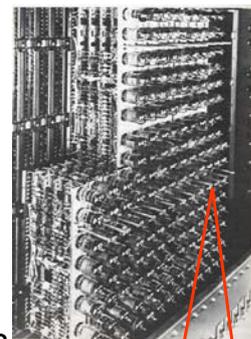
- Contraintes sur $Z_d(V)$
 - Seuils à variation continue permettant le choix d'une distribution de puissance à dissiper
 - Fonction minimisant la distorsion de phase

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



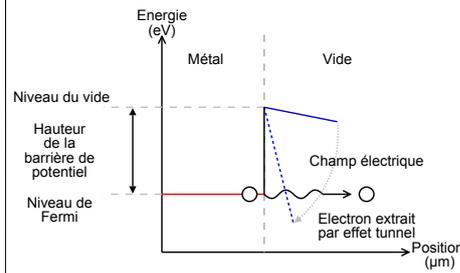
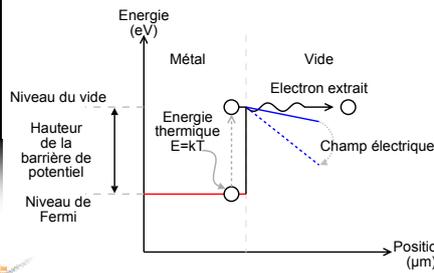
IBM



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

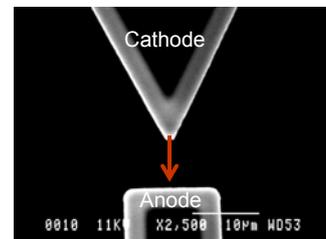
$$I(T) = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$



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

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

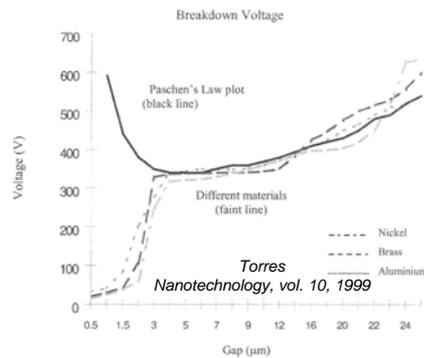
A, a, b : constantes V : tension
 K : constante de Boltzmann T : Température
 Φ : travail d'extraction I : Courant
 β : facteur d'amplification de champ



Structure à émission électronique par effet de champ

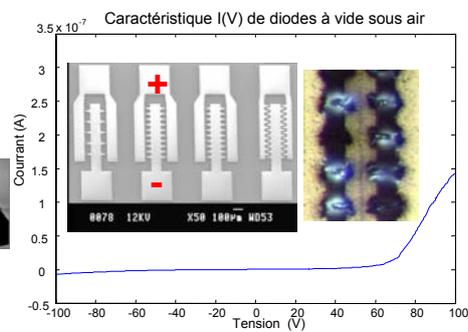
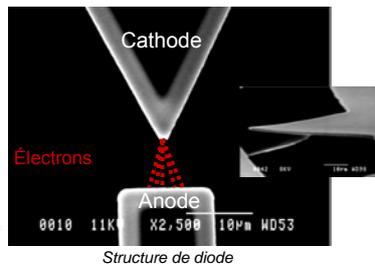
Apparition de décharges plasma

- 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 »

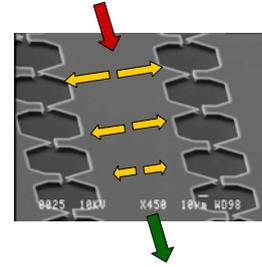
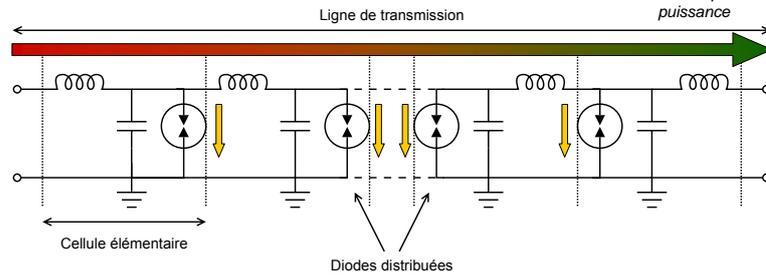
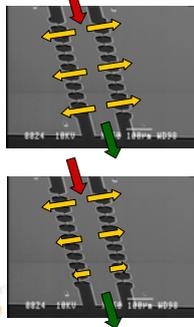


Illustration de répartition de puissance

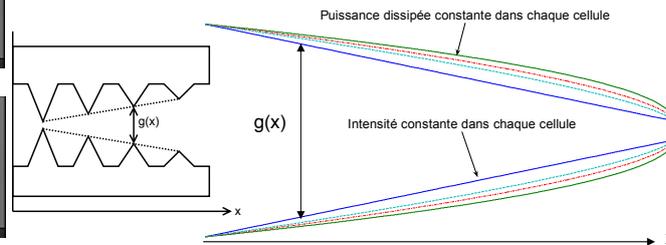


Distribution de puissance

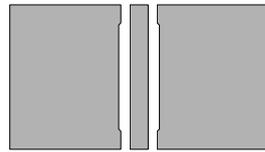
- Choix d'une distribution de puissance
 - **Objet du brevet N°0708291 déposé le 27/11/2007**
 - Relations entre les puissances dissipées et les impédances dynamiques
- Détermination des dimensions principales



Exemples de géométries de diodes pour différentes distribution de puissance



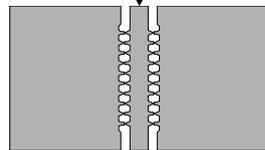
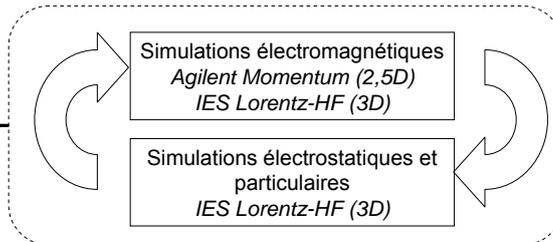
Méthodologie de conception



Ligne 50 ohms

Point de départ

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



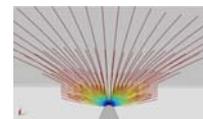
Exemple de limiteur

Limiteur conçu par simulations itératives

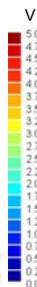
- Distribution de puissance
- Performances RF
- Efficacité d'émission électronique

Outils de simulation

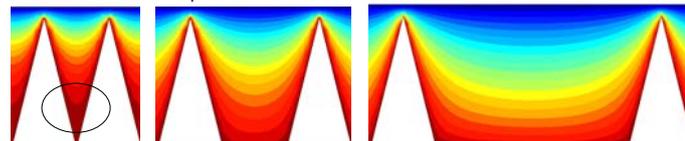
- Agilent Momentum 2005A
 - Simulations électromagnétiques 2,5D
- IES Lorentz-HF
 - Simulations électromagnétiques 3D
 - Détermination des trajectoires des charges
 - Calcul des temps de vol (1 ps sous 300 V)
 - Minimisation de l'écrantage électrostatique



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

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

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

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

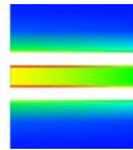
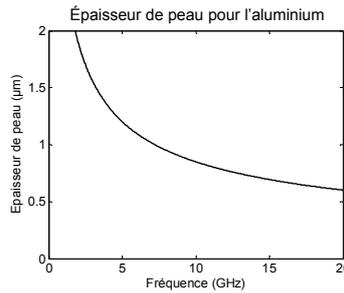


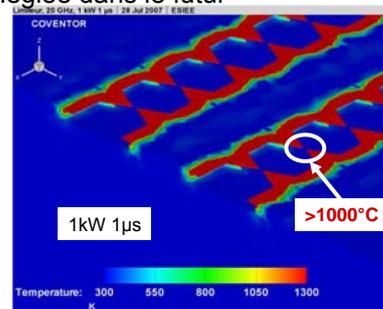
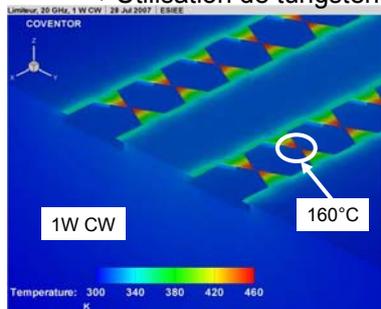
Illustration de l'effet de peau sur une ligne 50 ohms à 20 GHz simulée avec Momentum 2005

δ : épaisseur de peau
 μ_0 : perméabilité du vide
 Z_0 : Impédance caractéristique
J : Densité de courant
P : Puissance

f : fréquence
 σ : conductivité électrique du métal
I : Courant

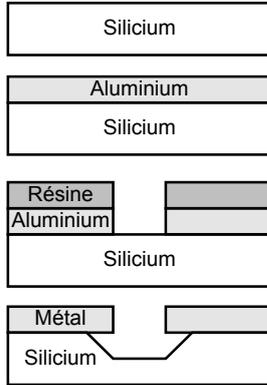
Contraintes matériaux

- Simulations thermiques (CoventorWare 2006)
 - Épaisseur de peau de 0,6 μm (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

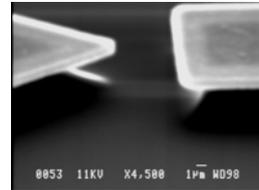
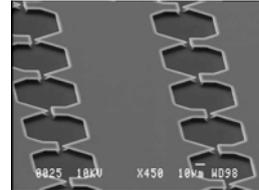
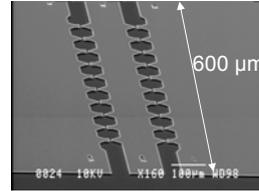


Substrat silicium HR de départ

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

Photolithographie
Gravure métal

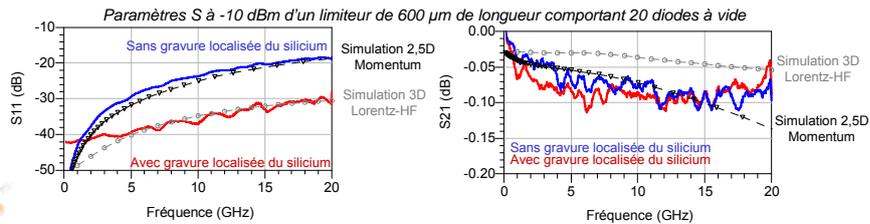
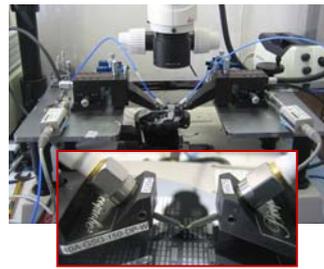
Gravure localisée du silicium par DRIE



Exemple de limiteur aluminium vu au microscope électronique à balayage

Caractérisations vectorielles

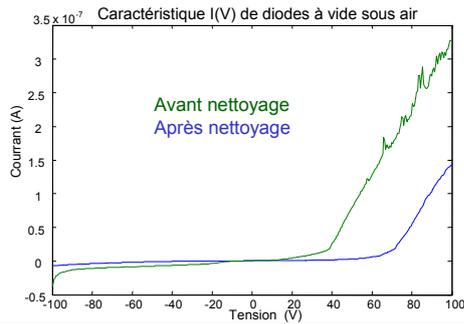
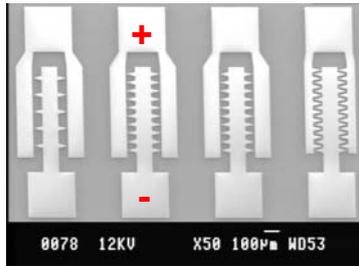
- Caractérisations sous pointes
 - Analyses vectorielles
 - Fréquences : 50 MHz – 40 GHz
- Performances équivalentes à une ligne coplanaire
- Adéquation mesures et simulations Momentum / Lorentz-HF



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**



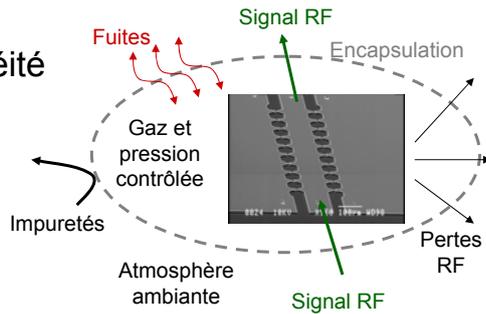
Synthèse

- 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**

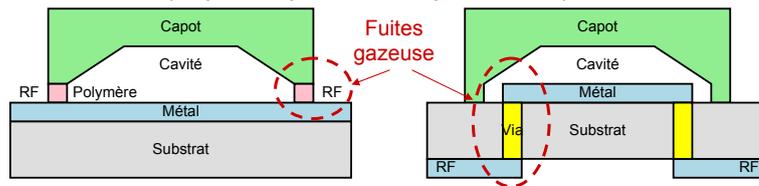
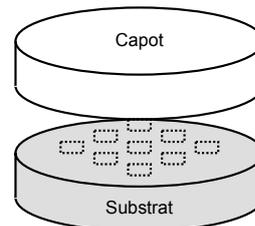
V. Problématiques d'encapsulation

- 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



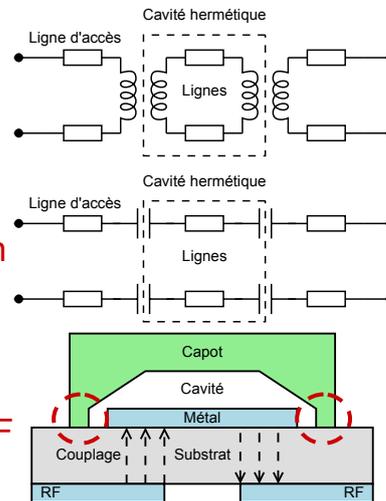
Encapsulation 0-level

- 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)



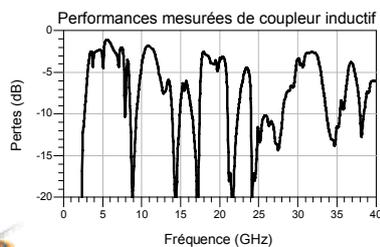
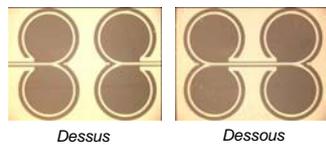
Interconnexion RF

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

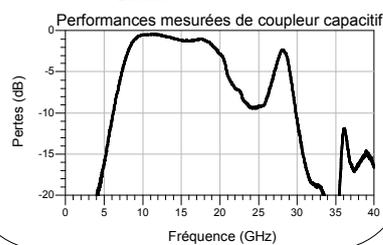
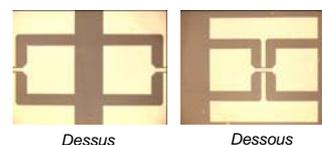


Couplages inductif et capacitif

- Inductif
 - Transformateur
 - Courants de Foucault

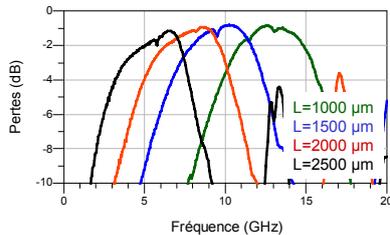
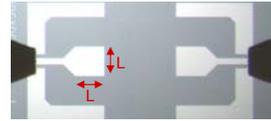


- Capacitif
 - Transition coplanaire-coplanaire

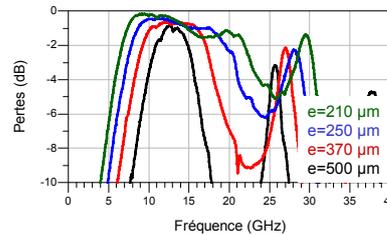


Performances de coupleurs capacitifs

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



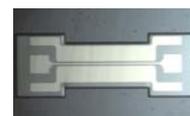
Performances mesurées de couplage sur silicium d'épaisseur 500 μm pour différentes dimensions de coupleurs



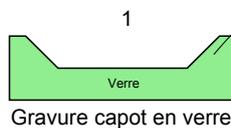
Performances mesurées de couplage sur silicium d'épaisseur variable pour des coupleurs de dimension $L=1000 \mu\text{m}$

Fabrication de limiteurs encapsulés

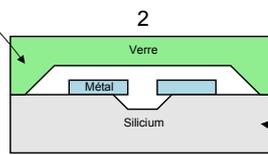
- Procédé de fabrication
 1. Gravure d'un capot en verre
 2. Soudure verre-silicium
 3. Définition des structures de couplage



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

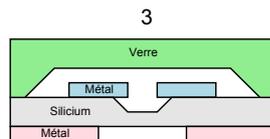


Gravure capot en verre



Encapsulation 0-level
Soudure anodique

Limiteur précédent

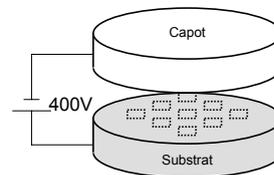


- Amincissement silicium
- Création des structures de couplage

Ajustement à la demande des performances RF

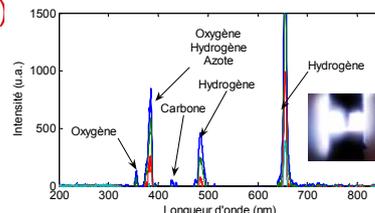
Etape de soudure anodique

- 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°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

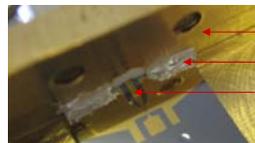
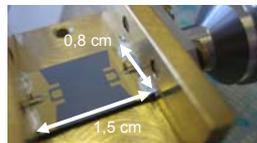
- Analyses non destructives et in situ nécessaires
 - Espèces chimiques
 - Pression
 - Influence sur les phénomènes de décharge
- Développement en cours
 Spectroscopie par émission atomique intégrée (Atomic Emission Spectroscopy)
 - Excitation / désexcitation d'atomes dans un plasma
 - Émission d'un 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

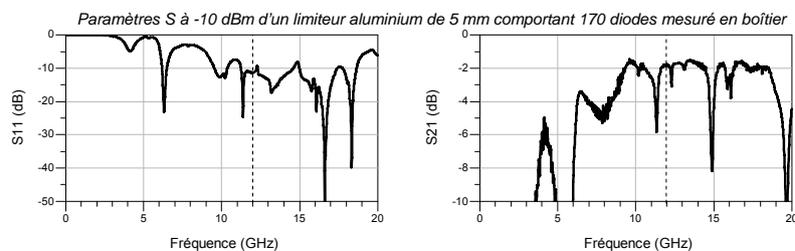
- Etape préalable aux caractérisations en puissance
- Découpe des puces
- Mise en boîtier manuelle
 - Report par collage temporaire (cire)
 - Reprise de masse assurée par colle époxy (H20E)
 - Contact direct de la ligne signal avec le conducteur central d'un connecteur coaxial (N, SMA, K...)



- 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

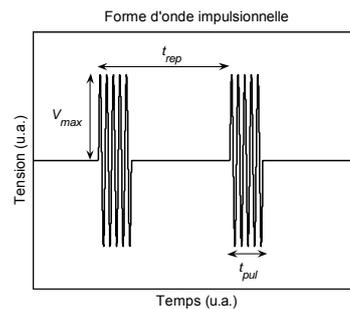


VI. Étude en puissance

- 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



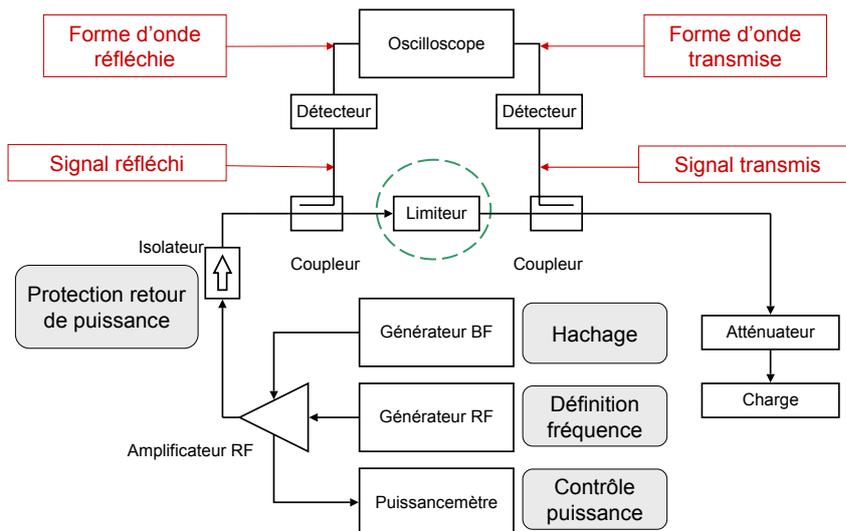
V_{max} : tension crête (>100V)
 t_{rep} : période de répétition (ms)
 t_{pul} : durée d'impulsion (μ s)

Caractérisations impulsionnelles

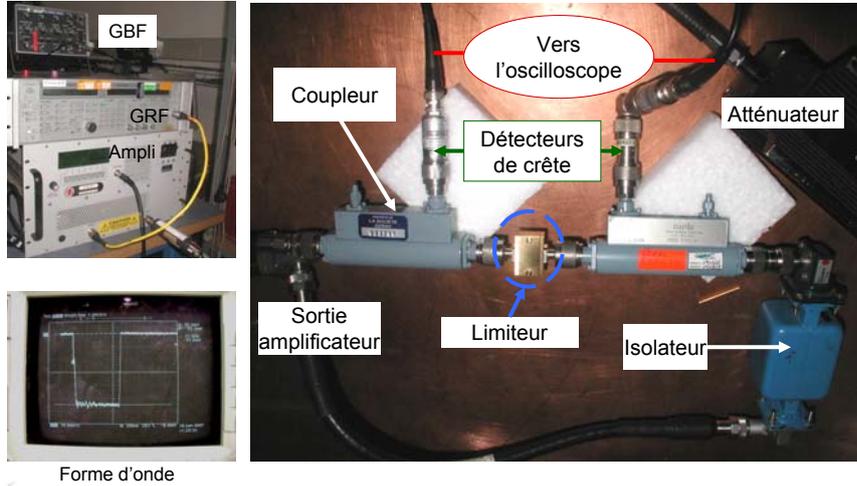
- Mesures effectuées au GERAC (Élancourt)
- Moyens de compatibilité électromagnétique
- Gamme de puissances
 - Jusqu'à 250 W CW et impulsionnel
 - Jusqu'à 2 kW en impulsionnel
- Bandes X, Ku
- Signaux et puissances définis selon des scénarios réalistes (ex : Radars)



Banc de caractérisation en puissance



Banc de caractérisation en puissance

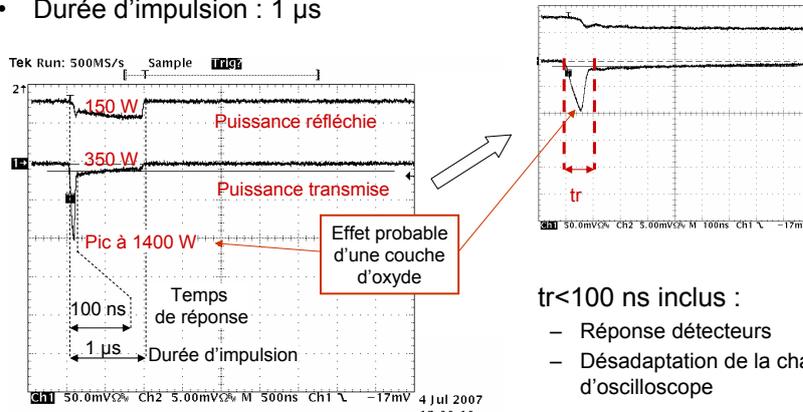


Forme d'onde



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 μ s



$tr < 100$ ns inclus :

- Réponse détecteurs
- Désadaptation de la chaîne d'oscilloscope



Bilan de mesure en puissance

- Bilan des puissances à 12 GHz et 2 kW, 1 μ 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

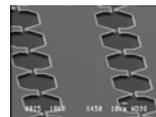
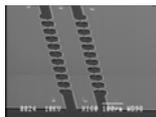
- Démonstration de la faisabilité de limitation de puissance par émission électronique traduite par
 - Une augmentation des pertes d'insertions (6 dB)
 - Désadaptation quasi insensible à la puissance
 - Forts niveaux de puissance dissipée sous faible volume
 - Protection assurée face à un scénario militaire ou terroriste « offensif »
-
- Reproductibilité des mesures peut être améliorée
 - Mise en boîtier manuelle
 - Réactions chimiques avec la température (Al + O₂)
 - **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**

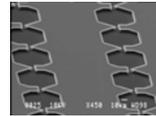
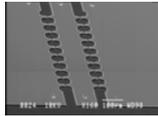
Conclusion

- 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 »



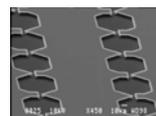
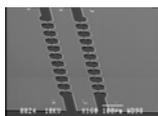
Perspectives

- 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