



**IMT Atlantique**

Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

COLLOQUE IMT "MODÉLISATION, CONTRÔLE ET  
OPTIMISATION DES PROCÉDÉS"

**CONCEPTION PAR INTELLIGENCE  
ARTIFICIELLE ET FABRICATION  
ADDITIVE DE DISPOSITIFS  
RADIOFRÉQUENCES**

**B. POTELON/ C. PERSON**

**IMT-ATLANTIQUE**



Département Micro-Ondes



Lab-STICC – UMR CNRS 6285  
Du capteur à la connaissance

Équipe Dispositifs Hyperfréquences

- ▶ Dispositifs radiofréquences/hyperfréquences: modélisation, conception, réalisation
- ▶ Détecter / identifier / communiquer
- ▶ Applications Défense / Télécommunications / environnement-santé
- ▶ Implication dans deux laboratoires communs avec Thales (LAS & DMS)

THALES

# QUE SONT LES RADIOFRÉQUENCES?

3

- ▶ Il s'agit d'un domaine fréquentiel particulier...
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme restent valables quelles que soient les fréquences...
- ▶ Mais le rapport entre les dimensions des circuits (ou obstacles) et la longueur d'onde ( $\lambda = c/f$ ) évolue



À basses fréquences  
Les circuits sont très grands  
devant les longueurs d'onde

→ La diffraction domine

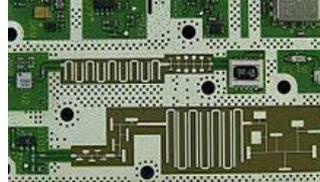
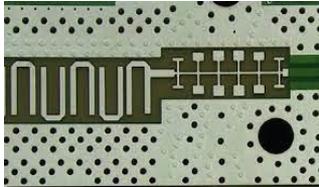
Aux fréquences RF  
Fortes interactions  
ondes-matière

Les signaux sont impactés par  
Les matériaux et les formes de ceux-ci

À hautes fréquences  
Les circuits sont très petits  
devant les longueurs d'onde

→ Ondes EM ~ rayons optiques

- ▶ Différents modes de propagation possibles
  - Modes « planaires » - technologies plaquées

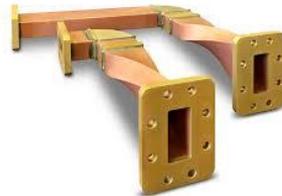


intégration, compact, léger



performances électriques

- Modes « volumiques » - guides d'ondes



performances électriques, puissance admissible



intégration, compacité, poids

- ▶ Sur les topologies et fonctionnalités des composants
- ▶ Sur les méthodes et outils de conception
- ▶ Sur les procédés technologiques
  - circuits planaires et multicouches (PCB, céramique, LTCC...)
  - ... et impression 3D

métal  
(DMLS)

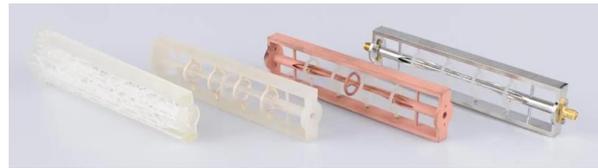


THALES

Déti  
MICROWAVE

elliptika

plastique métallisé  
(SLA + galvanoplastie)



Besoins:

- bonne conductivité électrique
- accès à des formes complexes / précision dimensionnelle
- faible rugosité
- ...

# FLOT DE CONCEPTION

6

- ▶ Usage de nouveaux procédés technologiques
  - nouvelles contraintes
  - connaître/maîtriser/prédire l'impact des procédés

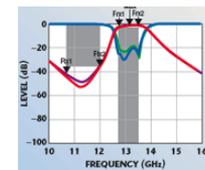
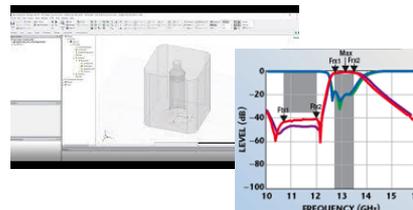
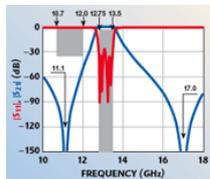
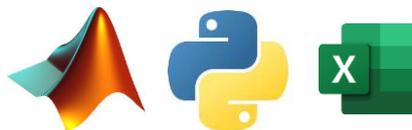
Spécifications  
Électriques/  
Gabarit

Choix  
procédé  
technologique/  
topologie

Synthèse  
(modèles mathématiques)  
→ pré-dimensionnement  
physique

Simulation numérique  
(modèles  
électromagnétiques)  
→ Réponse simulée  
(paramètres S)

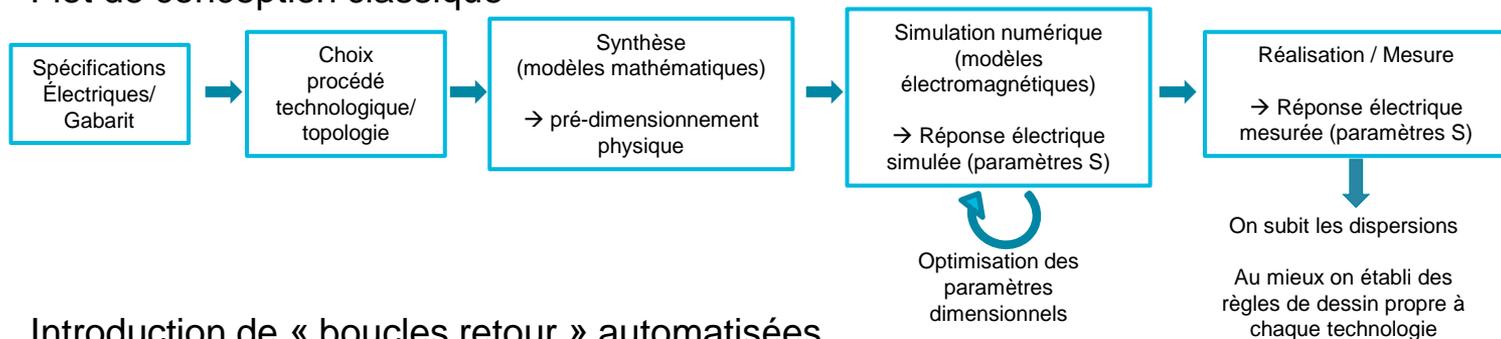
Réalisation / Mesure  
→ Réponse mesurée  
(paramètres S)



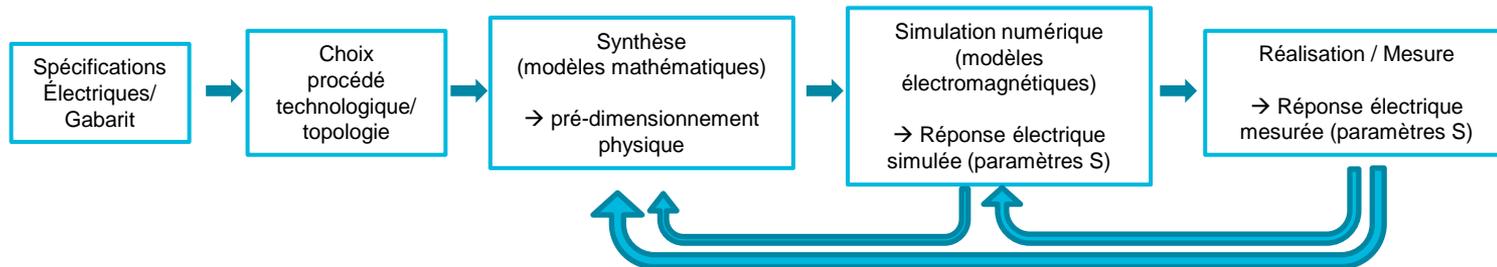
# OBJECTIF GENERAL

7

## ► Flot de conception classique



## ► Introduction de « boucles retour » automatisées

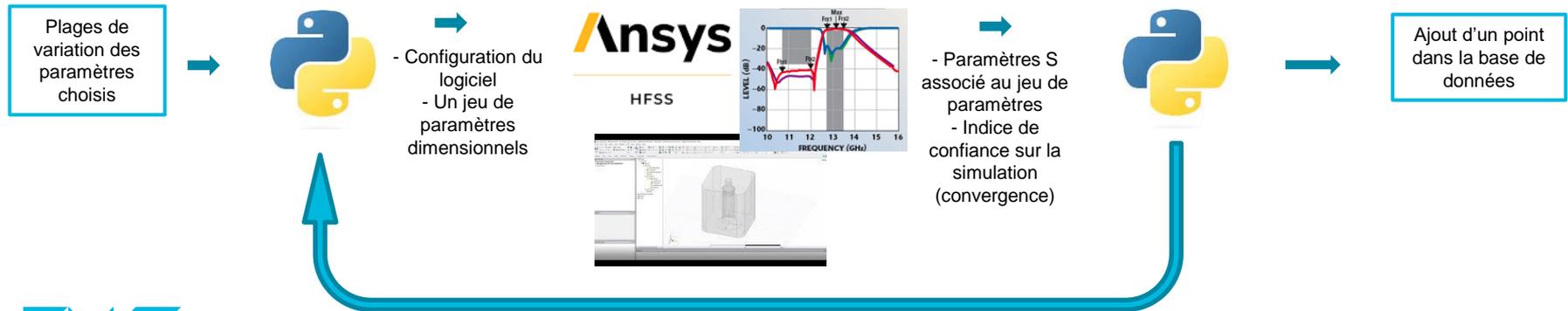


- ▶ Problématique:
  - pour une topologie donnée,
  - à partir d'une réponse électrique (paramètres S),
  - obtenir les dimensions physiques correspondantes
- ▶ Problème d'ordre élevé/non-linéaire → Utilisation d'algorithmes d'apprentissage
- ▶ Entraînement (apprentissage) d'un algorithme sur une base de données → Création d'un modèle
  - Quelle base de données?
  - Configuration de l'algorithme (réseau de neurones)?
  - Apprentissage?
  - Critère de pertinence du modèle créé?

# CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

9

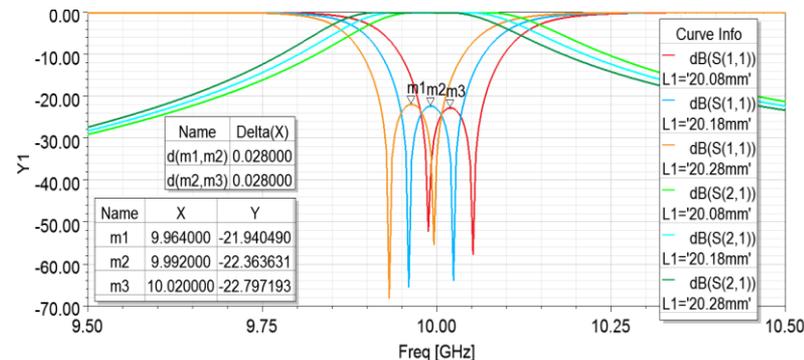
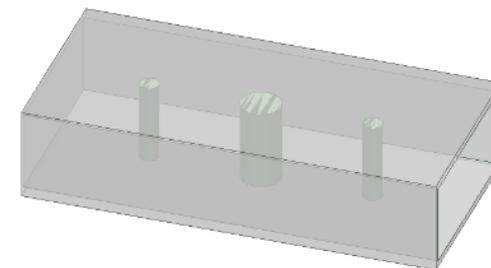
- ▶ Base de données (corpus d'apprentissage)
  - Fiable
  - Représentatif (qualité, volume et répartition des données sur les gammes de valeurs fixées)
- ▶ Idéalement, dans notre cas, mesures électriques (paramètres S) associées aux valeurs dimensionnelles (longueurs largeurs...)
  - Long, fastidieux
  - Utilisation d'outils logiciels pour générer une base de données



# CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

10

- ▶ Cas choisi : filtre d'ordre deux, en bande X (autour de 10 GHz)
- ▶ Trois paramètres dimensionnels (2 diamètres, 1 longueur)
- ▶ Pour chaque simulation, 2001 points fréquentiels (2 paramètres – S11, S21)
- ▶ 10 valeurs différentes pour chaque dimension
- Valeurs distribuées linéairement sur les intervalles
- ▶ 1000 'points' dans la base de données
- ▶ Plusieurs jours à plusieurs semaines pour obtenir ces 1000 simulations



On a maintenant une base de données sur laquelle entrainer un algorithme d'apprentissage – réseau de neurones

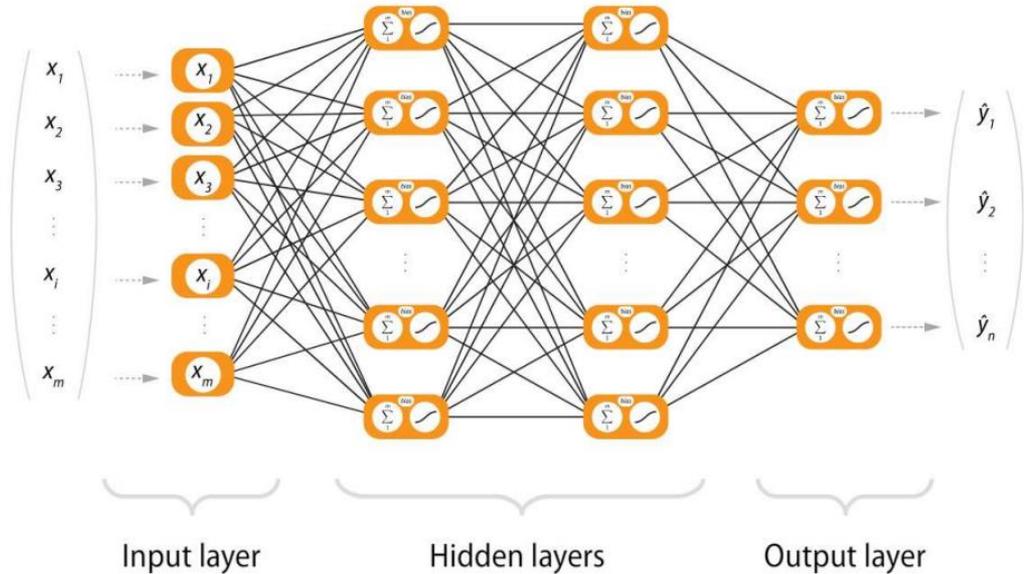
- ▶ On utilise un réseau de neurones (Neural Network) organisé en couches:

- ▶ Une couche d'entrée  
nombre de neurones  
correspondant à nos  
paramètres d'entrée  
(2001 ou 4002 ou 8004)

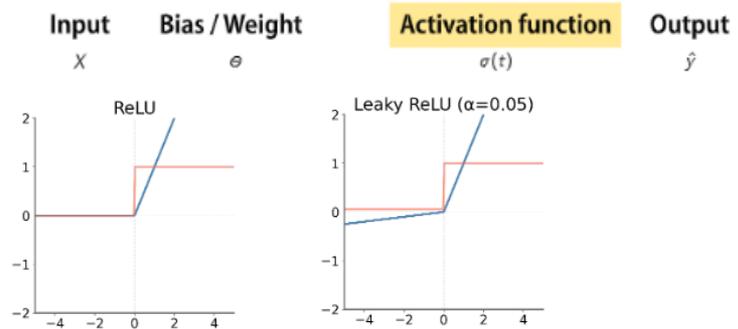
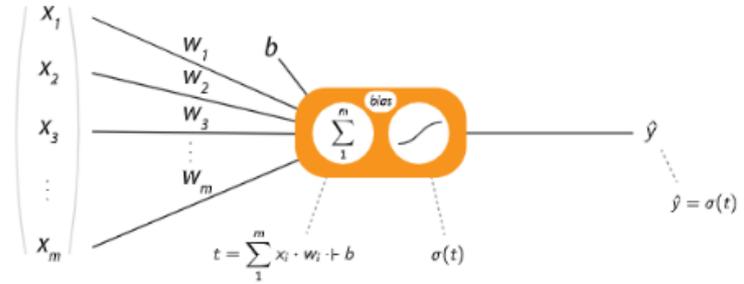
- ▶ Une couche de sortie  
nombre de neurones  
correspondant à nos  
paramètres de sortie (3)

- ▶ Des couches cachées  
nombre de neurones  
à déterminer

- ▶ Tous les neurones d'une couches sont reliés à tous les neurones de la couche suivante



- ▶ Récupère à son entrée les sorties des neurones de la couche antérieure
- ▶ Opère une somme pondérée ( $\rightarrow$  weights) à partir de ses entrées
- ▶ Pour avoir une transformation affine, introduction d'une entrée additionnelle: le bias
- ▶ Pour introduire des non-linéarités, fonction d'activation appliquée sur le résultat de la somme pondérée
- ▶ Exemples de fonctions d'activation
- ▶ La sortie du neurone (le résultat de ces opérations) constitue l'entrée des neurones de la couche suivante

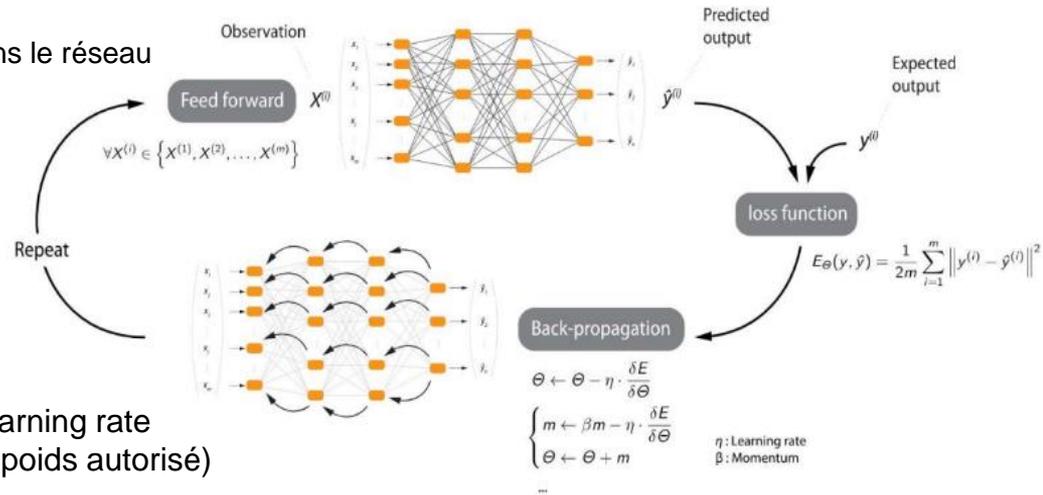


- ▶ Objectif: faire converger un réseau de neurones générique vers la modélisation de notre base de données (spécifique)
- ▶ NN pas tout à fait générique: choix à priori du nombre de couches cachées & de la fonction d'activation
- ▶ Faire apprendre notre réseau = trouver les weights & bias qui vont modéliser notre base
- ▶ Notion d'optimisation/convergence/contre-réaction/bouclage

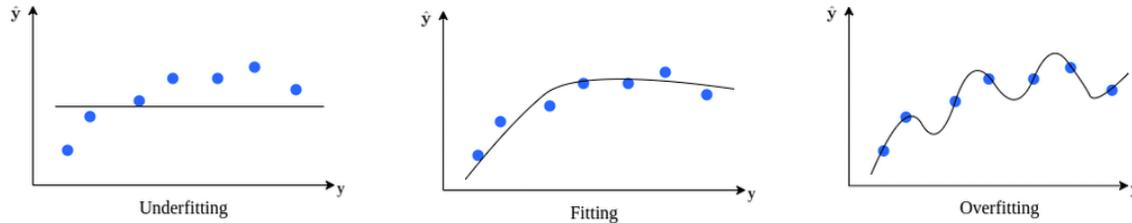
- époque
- Passage de toutes les données d'entrées de la base dans le réseau
  - Calcul des paramètres de sortie du réseau
  - Calcul d'une fonction de coût à partir de la différence valeur attendue/valeur calculée
  - Correction des weights and bias du réseau
  - Re-bouclage jusqu'à obtenir (idéalement) un coût nul

▶ La correction des weights and bias se fait par rétro-propagation.

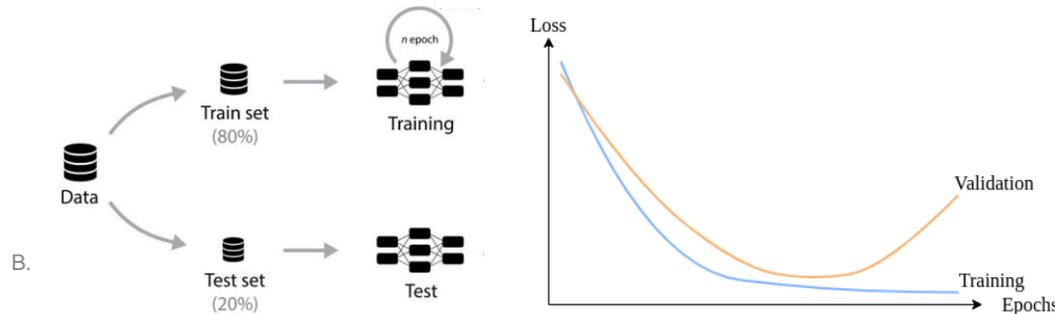
▶ Pour le concepteur, choix du type d'optimiseur et du learning rate (taux maximal de variation des poids autorisé)



- ▶ Ainsi, le réseau va converger vers un modèle descriptif du comportement de la base de donnée
- ▶ MAIS risque de sur-spécialisation (over-fitting) du réseau



- ▶ Pour empêcher cette sur-spécialisation, division de la base de données en deux parties
  - Train – données pour l’entraînement (env.70-80% des données)
  - Validate – données exclusivement utilisées pour l’évaluation de l’algorithme (pas de rétro-propagation sur ces données)



- ▶ L'apprentissage automatique, une technique intéressante pour les problèmes complexes/multi-paramètres/non-linéaires...
- ▶ ... qui nécessite un volume de données important (temps de simulation/échantillons)
- ▶ ... qui nécessite une expertise poussée:
  - dans son dimensionnement: nombre de couches, nombre de neurones par couche, fonction d'activation
  - dans son entraînement: optimizer, learning rate, répartition train/validate
  - dans la forme des données : normalisation, pré-conditionnement, répartition linéaire des points de la base, calcul de la fonction de coût...
- ▶ ... qui pose plein de questions:
  - projection/re-calibration d'un réseau entraîné en simulation → mesures
  - entraînement sur des faibles volumes de données (IA frugale)
  - ...
- ▶ particulièrement pertinent dans le cadre de la fabrication additive en raison de la versatilité des procédés

- ▶ Des technologies de rupture déjà utilisées et néanmoins prometteuses...
- ▶ ...mais qui ne répondront pas à tout à elles seules!
- ▶ Complétude des approches plastique métallisé et full métal
  - Plastique métallisé → coût, possibilité d'avoir accès à un diélectrique si métallisation sélective  
(hybridation intrinsèque planaire/volumique)
  - Impression direct métal → résistance mécanique/thermique/puissance admissible, accès à des formes et facteurs de forme intéressants (hybridation avec des technologies planaires, céramique par exemple?)
- ▶ Travail sur l'impression de matériaux ayant des propriétés/fonctionnalités particulières/ impression multi-matériaux



**IMT Atlantique**

Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

COLLOQUE IMT "MODÉLISATION, CONTRÔLE ET  
OPTIMISATION DES PROCÉDÉS"

**CONCEPTION PAR INTELLIGENCE  
ARTIFICIELLE ET FABRICATION  
ADDITIVE DE DISPOSITIFS  
RADIOFRÉQUENCES**

**B. POTELON/ C. PERSON**

**IMT-ATLANTIQUE**