



# HYBRIDATION DE CAPTEURS POUR LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DE MATÉRIAUX AÉRONAUTIQUES

Journée Scientifique du GIS ECND – PdL

Jeudi 7 novembre 2019

R. Cormerais<sup>1.2.3</sup>, R. Longo<sup>1.2</sup>, A. Duclos<sup>2</sup>,  
G. Wasselynck<sup>3</sup>, G. Berthiau<sup>3</sup>

1 - Groupe Signal, Image et Instrumentation - ESEO, Angers, France

2 - Laboratoire d'Acoustique de l'Université de Mans - UMR CNRS 6613, Le Mans, France

3 - Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique, Saint-Nazaire, France

## **1. Contexte et objectifs de la thèse**

## **2. Création d'une base de données**

- Simulation de données US
- Simulation de données CF
- Optimisation des paramètres de simulation

## **3. Fusion de données par réseaux de neurones artificiels**

- Méthode
- Résultats

## **4. Augmentation de données CF**

- Analyse en composantes principales
- Augmentation de données
- Résultats

## **5. Conclusion et perspectives**



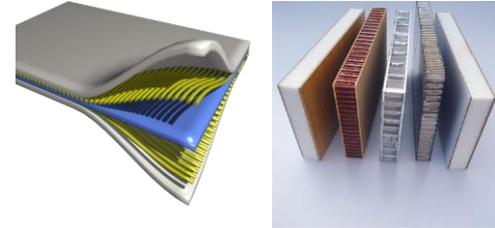
LAUM

A large, stylized graphic on the left side of the slide, consisting of a thick, curved line that starts in a dark red color and transitions to a lighter red color, forming a shape reminiscent of a stylized 'e' or a swoosh.

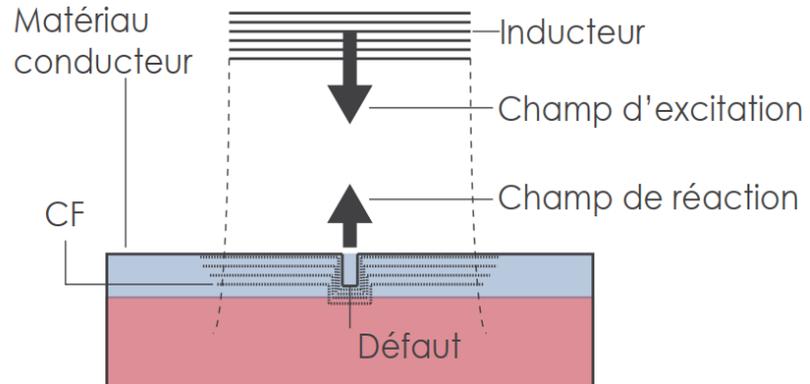
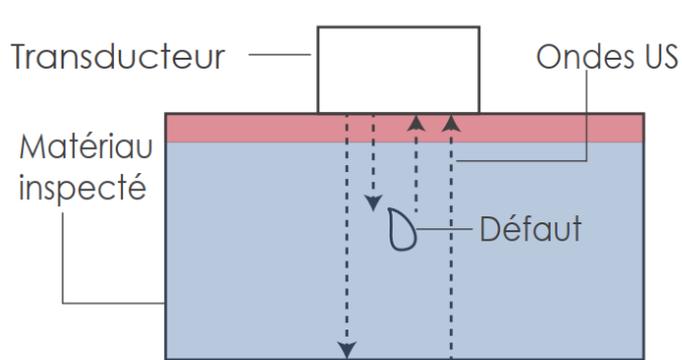
## CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

## Le contrôle non destructif est devenu un enjeu majeur du secteur aéronautique :

- **Matériaux complexes**
  - Sandwichs
  - Composites stratifiés
  - Natures et formes des défauts
- **Fiabilité des pièces d'avions**
  - Applications critiques
- **Coûts des nombreux contrôles**
  - Fabrication
  - Assemblage
  - En service



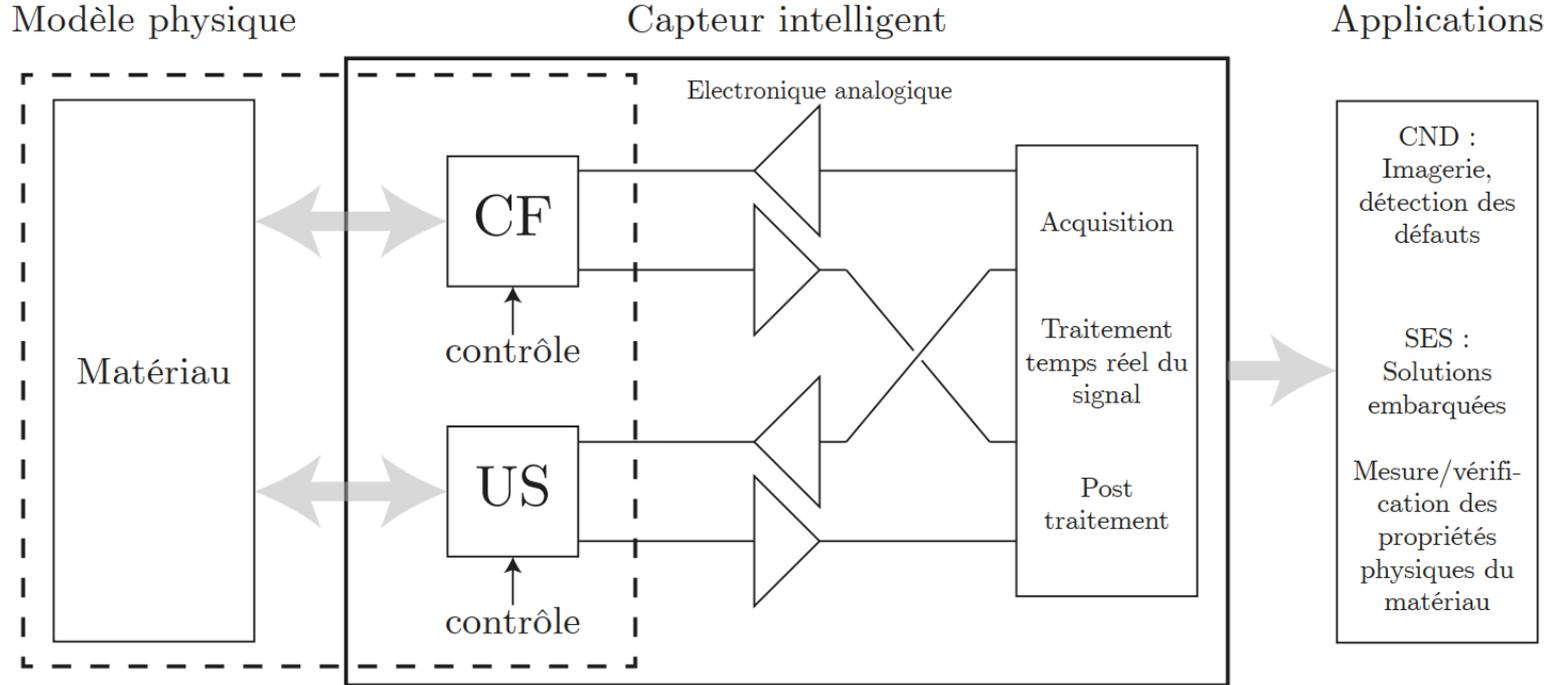
**Exploiter la complémentarité des ultrasons (US) et des courants de Foucault (CF) avec des algorithmes de fusion de données pour le contrôle non destructif de matériaux aéronautiques :**



## Fusion de données :

Combinaison d'informations issues de plusieurs sources pour obtenir une information plus sûre, pertinente et/ou avec un coût moins élevé

## Objectif final : capteur intelligent pour le CND



**Fiabilité**

**Simplicité**

**Rapidité**

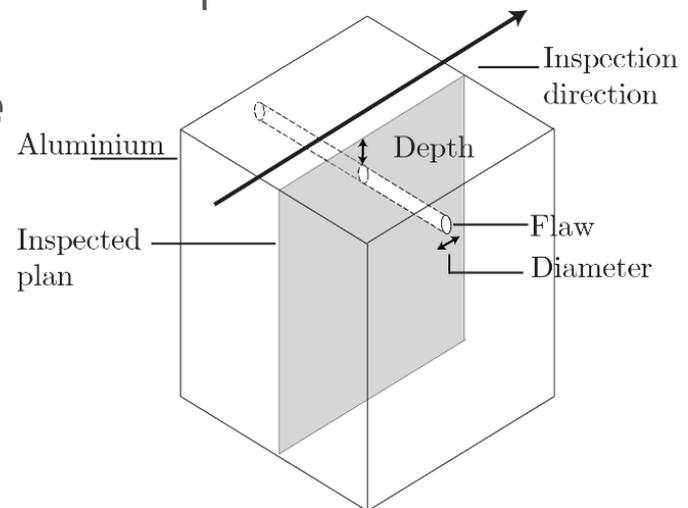


LAUM



## CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

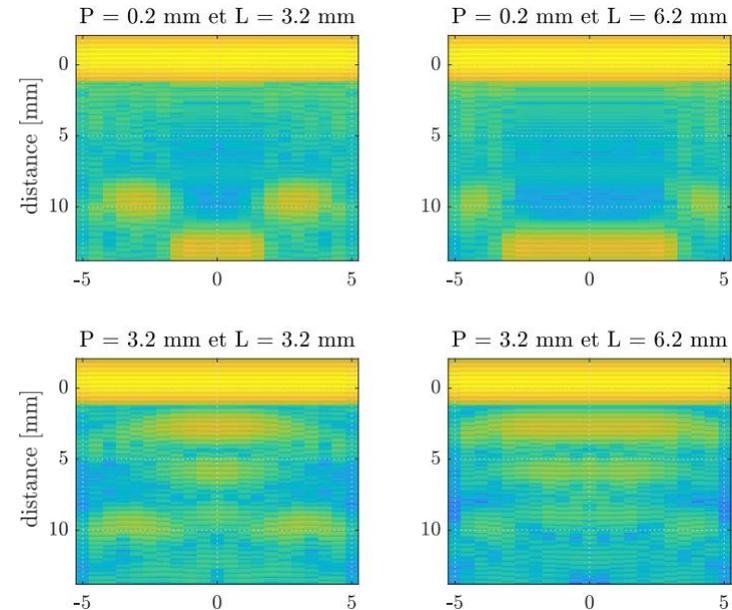
- **Pourquoi créer une base de données ?**
  - Obtenir les **données US et CF d'un même défaut** pour étudier la complémentarité de ces techniques
  - Utiliser ces données pour développer et tester des **algorithmes de fusion** de données
  - Développer des **algorithmes d'inversion** couplés ou non aux algorithmes de fusion
- **Génération d'une base de données simulée**
  - Méthode aux différences finies pour les US
  - Méthode des éléments finis pour les CF
  - Bloc d'aluminium
  - 6400 défauts simulés :
    - Rayon de 0,1 à 8 mm
    - Profondeur de 0,1 à 8 mm



Exemple de géométrie simulée

## Données US :

- **Utilisation de la toolbox K-WAVE [1]**
  - Simulation de la propagation d'ondes mécaniques
- **Hypothèses des simulations**
  - Milieux homogènes et isotropes
  - Ondes longitudinales seulement
  - Simulation 2D
- **Paramètres des simulations**
  - Transducteur de 6,35 mm de diamètre utilisé en mode pulse-echo
  - Impulsion gaussienne de 3 cycles de fréquence 5 MHz

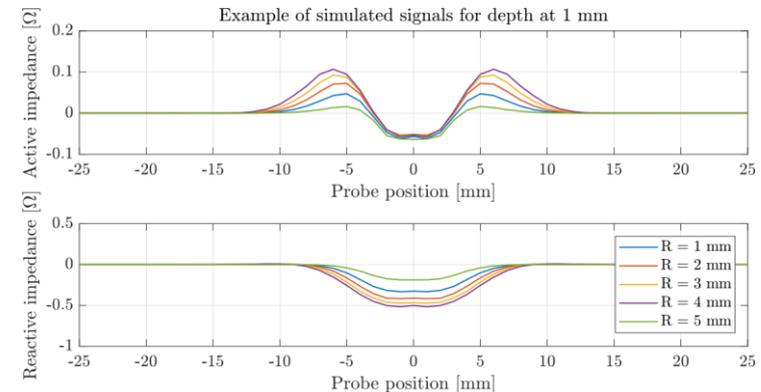


Exemples de signaux US simulés

[1] Bradley E. Treeby and Benjamin T. Cox "k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields," *Journal of Biomedical Optics* 15(2), 021314 (1 March 2010)

## Données CF :

- **Utilisation de codes à éléments finis**
  - Formulation en potentiel vecteur électrique et potentiel scalaire magnétique  $T - \Omega$  [2]
- **Hypothèses des simulations**
  - Contre réaction des CF sur la sonde non prise en compte
- **Paramètres des simulations**
  - Bobine haute de 2.25 mm avec un rayon interne et externe de 2.22 et 2.48 mm
  - Parcourue par un signal sinusoïdal de 1 kHz

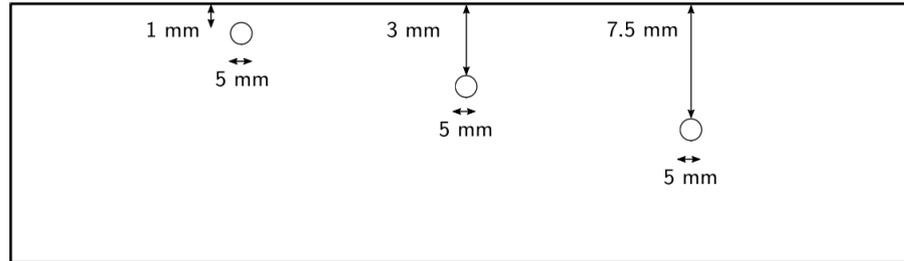


Exemples de signaux CF simulés

[2] T. Henneron, Contribution a la prise en compte des Grandeurs Globales dans les Problèmes d'Électromagnétisme résolu avec la Méthode des Éléments Finis. Université Lille1 - Sciences et Technologies (2004)

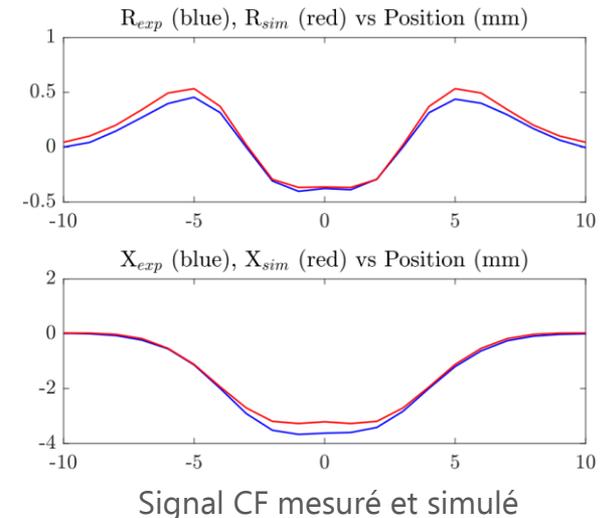
## Optimisation des paramètres de simulation :

- **Mesures sur une pièce d'aluminium contenant trois défauts**



- **Estimation des paramètres des capteurs et du matériau pour obtenir des simulations réalistes :**

- Géométrie, présence de ferrite, entrefer et nombre de spires de la sonde CF
- Conductivité du matériau inspecté
- Hauteur de couplant et du capteur US
- Vitesse de propagation des ondes dans le matériau





LAUM



# FUSION DE DONNÉES PAR RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

- **Réseau de Neurones à Propagation Avant (RNPA)**

- Peut reproduire des fonctions complexes
- Pas besoin de modèle analytique
- Nécessite une base de données pour être entraîné

- **Un RNPA est composé d'unités de calcul élémentaire interconnectées**

- Chaque neurone calcule la somme pondérée de ses entrées
- Chaque neurone renvoie l'image de son entrée par sa « fonction d'activation »
- L'entraînement d'un réseau consiste à optimiser les poids du réseau pour réaliser la fonction désirée

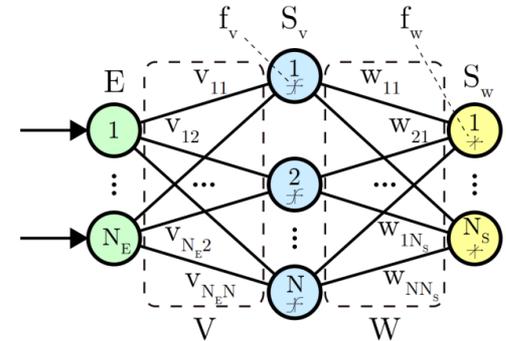
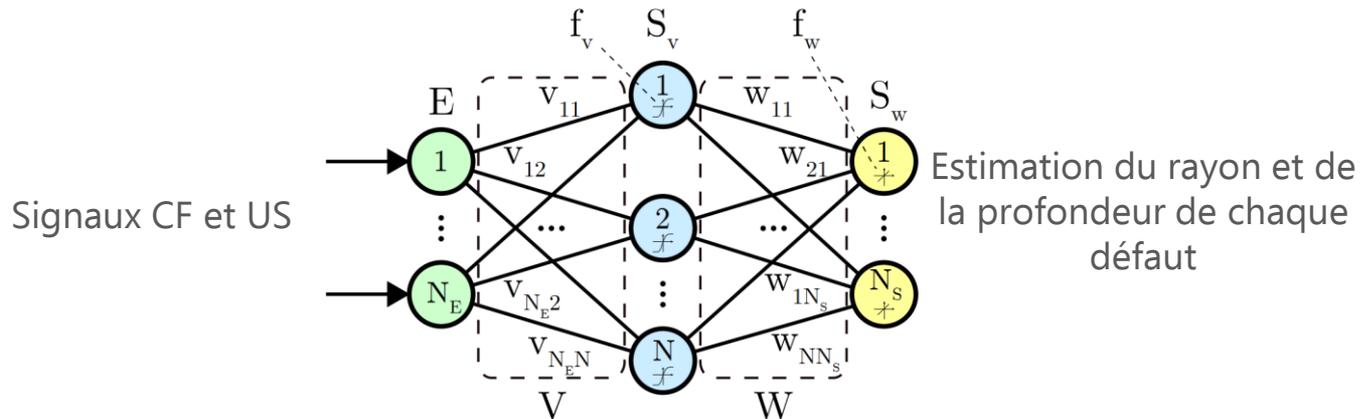


Schéma d'un réseau de neurones artificiel composé de  $N_E$  entrée, d'une couche cachée de  $N$  neurones et d'une couche de sortie de  $N_S$  neurones

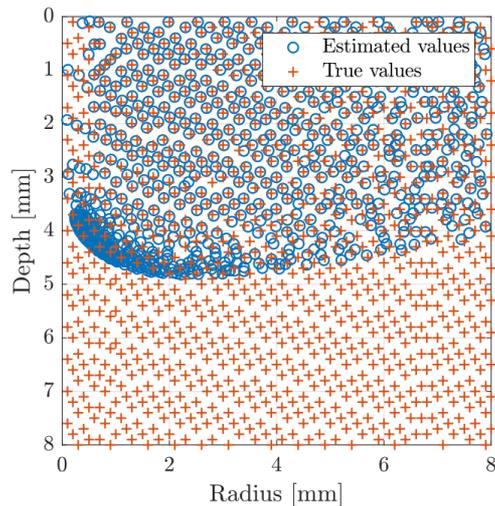
- **Méthode :**

- 80% des signaux simulés sont utilisés comme entrées d'un réseau de neurones artificiels pour l'entraîner à estimer le rayon et la profondeur des défauts
- 20% des signaux simulés sont utilisés pour estimer la capacité de prédiction du réseau après l'entraînement
- Pour mettre en avant les avantages d'utiliser les CF et les US, le réseau est entraîné avec les données issues de chaque technique séparément puis avec les deux méthodes

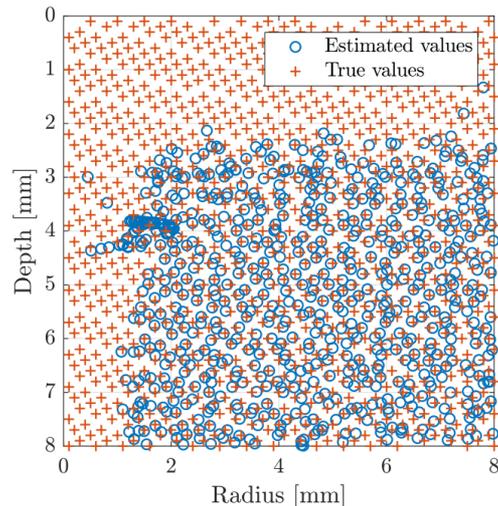


## • Résultats :

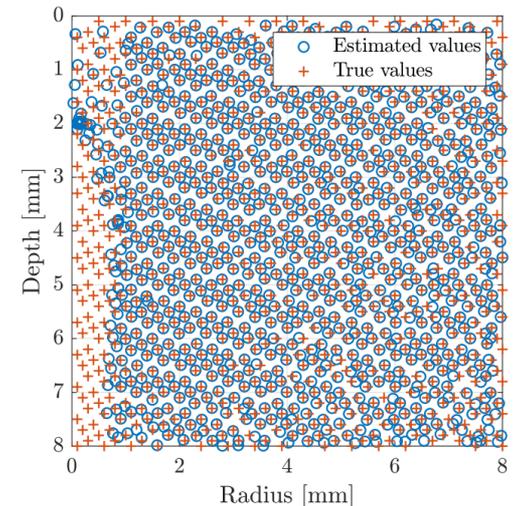
- L'utilisation des signaux issus des deux méthodes d'inspection permet au réseau de neurones d'estimer correctement les dimensions des défauts



Prédictions obtenues en entraînant le réseau avec les signaux CF



Prédictions obtenues en entraînant le réseau avec les signaux US



Prédictions obtenues en entraînant le réseau avec les deux méthodes



LAUM

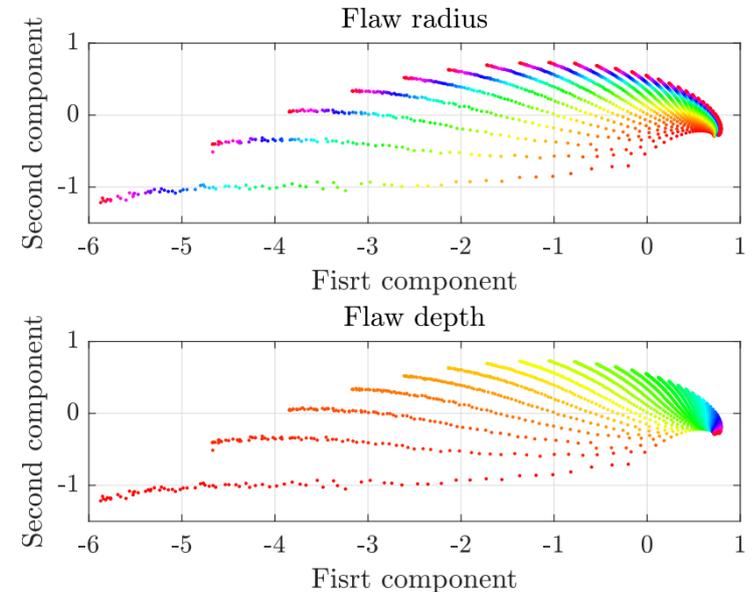


## AUGMENTATION DE DONNÉES CF

## Base de données CF :

- **Utilisation de codes à éléments finis**
  - Formulation en potentiel vecteur électrique et potentiel scalaire magnétique  $T - \Omega$
  - Modélisation en trois dimensions
  - Temps de calcul d'environ **2000 heures** pour l'ensemble des 6400 défauts
- **Est-il possible de se passer d'un certain nombre de simulations pour réduire les temps de calcul ?**
  - Simuler un nombre de défaut moins important
  - Compléter la base de données à l'aide d'un algorithme d'augmentation de données

- **Analyse en composante principale [3] :**
  - Un ensemble d'observations est projeté dans une nouvelle base composée de variables indépendantes (composantes principales)
  - La majorité de l'information contenue dans les observations est condensée dans les composantes principales de plus grande variance
- **Analyse des signaux CF simulés :**
  - Les deux premières composantes principales permettent de différencier les différents des défauts simulés

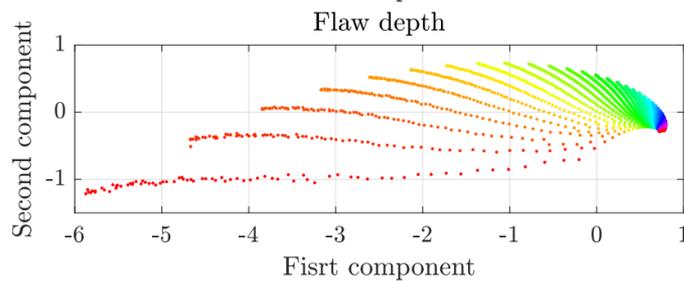
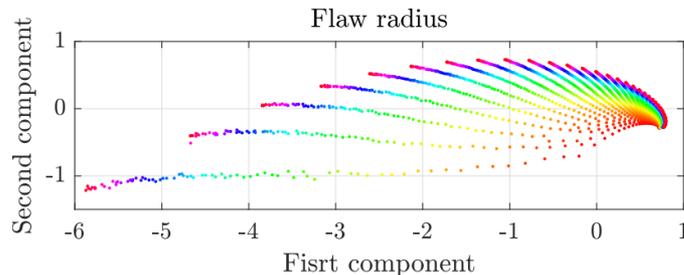


Base de donnée CF représentée en fonction des deux premières composantes principales

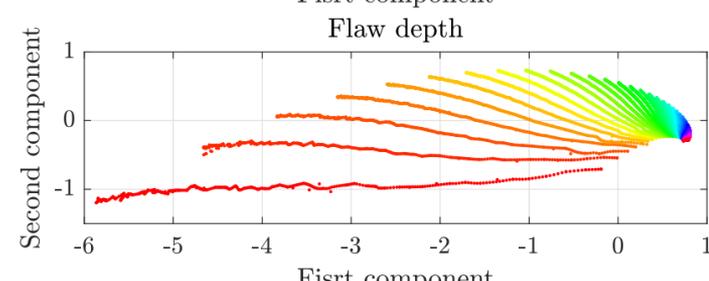
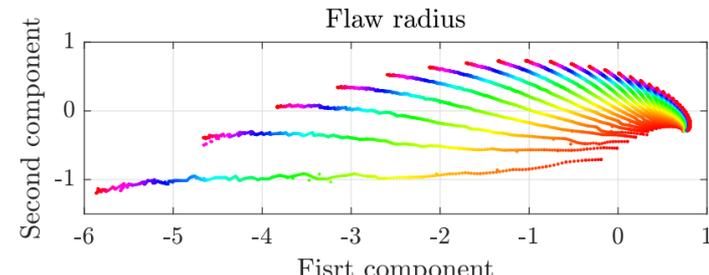
[3] Jolliffe, *Principal Component Analysis*. International Encyclopedia of Statistical Science. Springer, Berlin, Heidelberg, (2011).

- **Interpolation en trois dimensions :**

- Développement d'un algorithme d'augmentation exploitant cette nouvelle représentation
- Ajout de points artificiels aux diamètres et profondeurs désirées

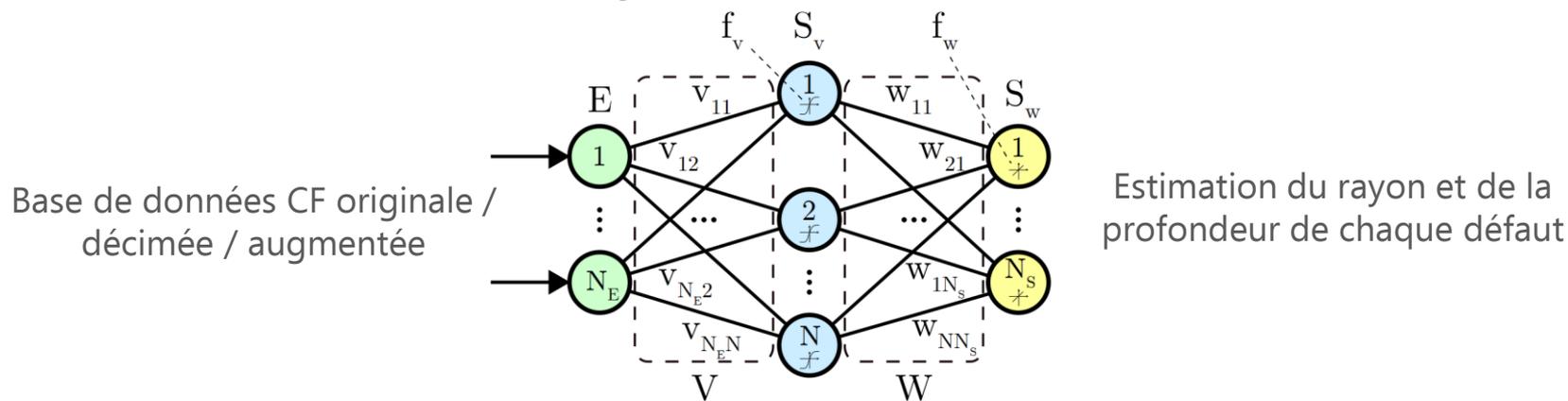


Base de données simulée



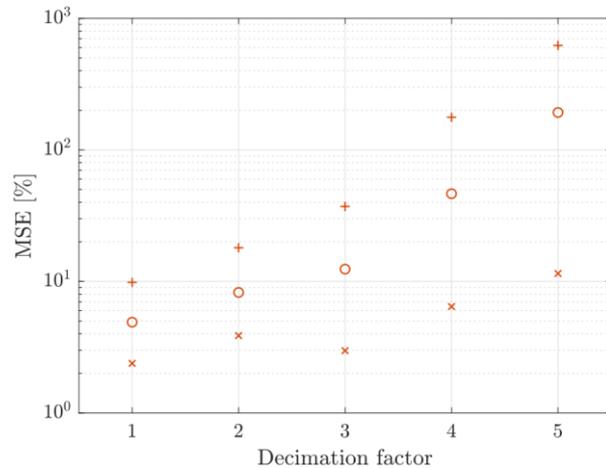
Base de données augmentée

- **Évaluation de l'algorithme d'augmentation de données :**
  - Décimation de la base de données d'entraînement
  - Remplacement des points par l'algorithme d'augmentation de données
  - Évaluation des performances du réseau de neurones sur la base de données de test (inchangée)

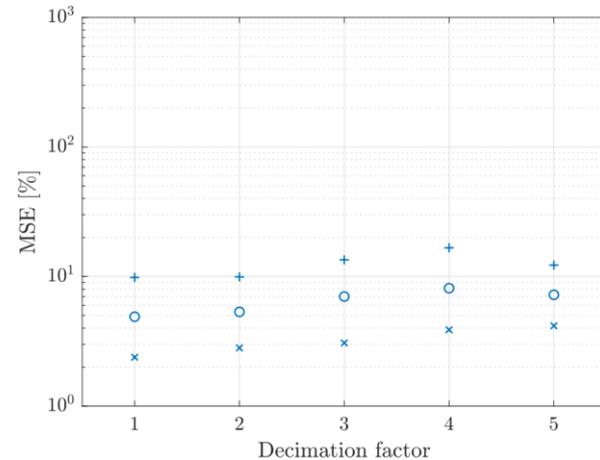


## • Résultats :

- Pour un facteur de décimation de cinq, l'erreur quadratique moyenne est réduite de 200 à 7% en utilisant l'augmentation de données
- L'augmentation de données permet de diminuer le nombre de simulations nécessaires pour l'entraînement du réseau par un facteur cinq sans dégrader significativement les estimations



Erreur moyenne, min et max obtenues en entrainant le réseau avec la base de données décimée



Erreur moyenne, min et max obtenues en entrainant le réseau avec la base de données augmentée



LAUM



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- **Base de données CND présentant la réponse des US et CF à 6400 différents défauts**
- **Résultats prometteurs de la fusion de données par réseaux de neurones artificiels appliquée à des données CND**
- **Algorithme d'augmentation de données permettant d'entraîner des réseaux de neurones artificiels en partant d'une base de données moins couteuse en temps de calcul (pour les CF uniquement)**

## Travaux à venir :

- **Validation de la fusion de données et de l'augmentation de données avec des mesures expérimentales**
- **Mise au point d'un démonstrateur implémentant les fusion de de données**



LAUM



MERCI DE VOTRE ATTENTION