



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Simulation et bases de données pour le diagnostic automatique

30 novembre 2021 – Journée CNES

Steve MAHAUT, Département Imagerie et Simulation pour le Contrôle (CEATech, Institut LIST, SACLAY)

- ▶ **Présentation du DISC (Département et Imagerie et Simulation pour le Contrôle)**
- ▶ **Simulation des procédés ultrasonores, électromagnétiques, radiographiques, et thermiques**
- ▶ **Outils d'apprentissage pour la simulation intensive et ses applications**
- ▶ **Exemples d'applications**

# Le département DISC (Imagerie et Simulation pour le Contrôle)

(Chiffres 2019)

- 20.181 chercheurs, dont ~2700 PhD/Post-Doc
- 5050 publications / 700 brevets par an (~ 7000 brevets actifs)
- 700 partenaires industriels

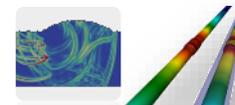
*Défense et sécurité nationale**Indépendance énergétique**Compétitivité industrielle**Excellence scientifique*

**Institut CEATech/LIST  
(Systèmes numériques)  
Saclay**





## • Plateformes

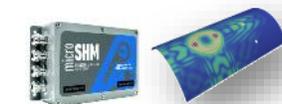
**CIVA**  
 N·D·E·I

**Plateforme de simulation**  
 (commercial & development versions)

- Modèles directs, outils statistiques
- Imagerie, analyse
- inversion/diagnostic
- Outils IA

**GERIM2**

**Plateforme d'équipement CND**

- Multi-éléments Ultrasons et courants de Foucault
- Tomographie robotisée
- Outils d'imagerie

**SacHeMs**  
 Supply High-end Equipment  
 for the Monitoring of Structure

**Plateforme Structural Health Monitoring**

- Équipements dédiés SHM
- Capteurs, software, algorithmes
- Prototypage et évaluation de systèmes SHM sur cas industriels

**Additive  
 Factory  
 Hub**

**Plateforme Fabrication Additive**  
 (SLM et WAAM, métalliques)

- Data Base (params machines, fab et contrôle) et chaîne numérique
- CND pièces finies et monitoring in process

- ~ 110 chercheurs (70 permanent, 25 PhDs)
- **Méthodes:** Ultrasons, Electromagnétisme, Radiographie/Tomographie, Thermographie...

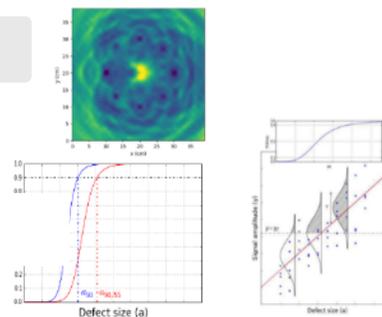

**CIVA**  
 N·D·E·I

## Simulation et outils numériques

Simulation, POD, Qualification

Imagerie, Analyse &amp; Diagnostic

Optimisation, outils d'aide aux opérateurs



## Instrumentation et Capteurs



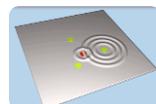
Capteurs flexibles, multi-éléments

Imagerie Temps-Réel



CND robotisé, adaptatif

## Méthodes de contrôle innovantes



Structural Health Monitoring (SHM)

Process monitoring (dont Fabrication additive)



CND et caractérisation de matériaux

# Outils de simulation

### ► Usages de la simulation :

- Compréhension des phénomènes, Conception et Optimisation de méthodes
- Prédiction de performances (qualification), Analyse de sensibilité (paramètres influents) : soutien à la justification technique
- Diagnostics, outils d'inversion basée sur modèles
- Formation

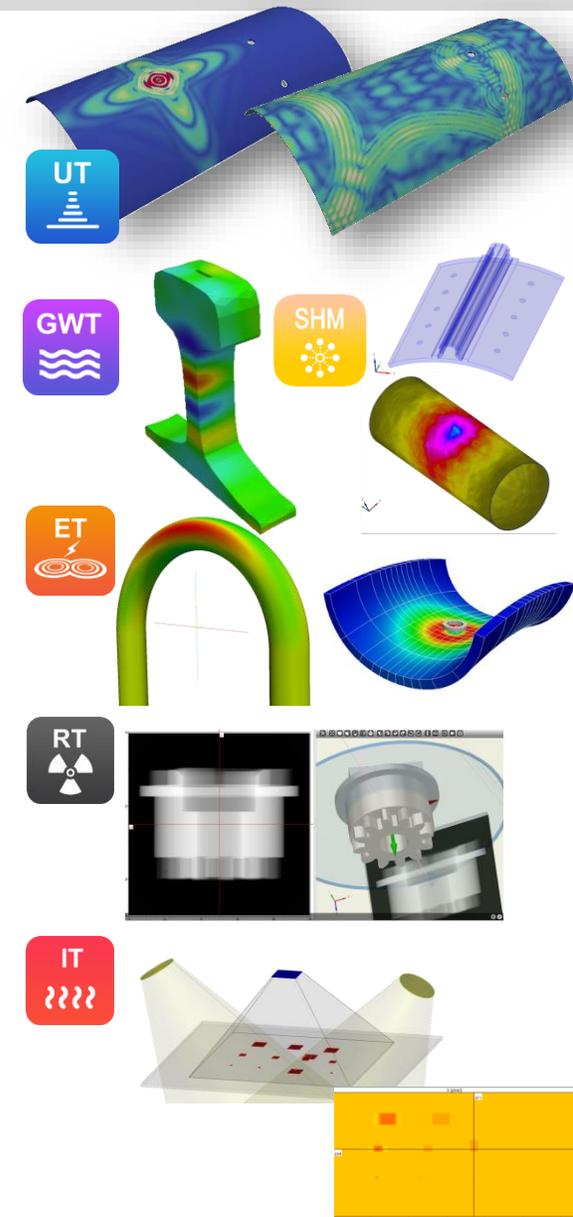
### ► Outils de simulation CIVA : modèles dédiés aux différentes techniques (Ultrasons, Electromagnétisme, Radiographie/Tomographie, Thermographie)

### ► Différentes approches :

- semi-analytiques
- Numériques
- hybrides (semi-analytique/numérique)

### ► Outils pour la simulation intensive : métamodèles

### ► Application : outils statistiques (PoD, analyse de sensibilité) et inversion (dont IA)



► **Méthodes semi-analytiques, ondes de volume**

- Calcul du champ ultrasonore (modèle « pinceaux »)
- Coefficients de diffraction pour interaction défaut
- Principe de réciprocité pour simulation d'inspection

► **Méthodes numériques**

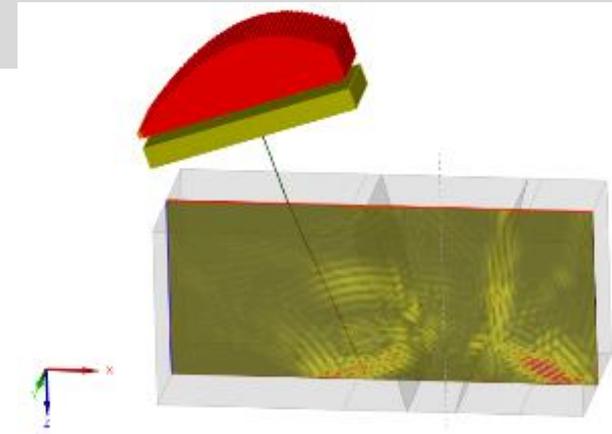
- Méthodes de type éléments finis ou différences finies
- Régime harmonique ou temporel

► **Méthodes hybrides**

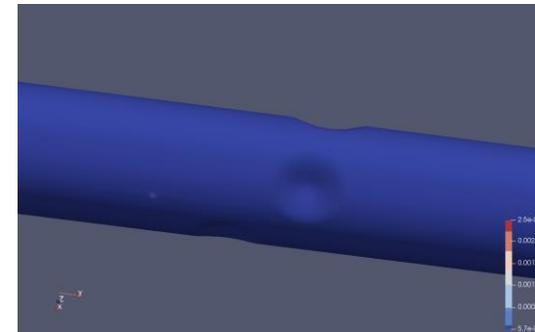
- Couplage méthodes SA (champ incident) / EF (interaction défaut ou singularité géométrique)

► **Modules dédiés par méthode et applications :**

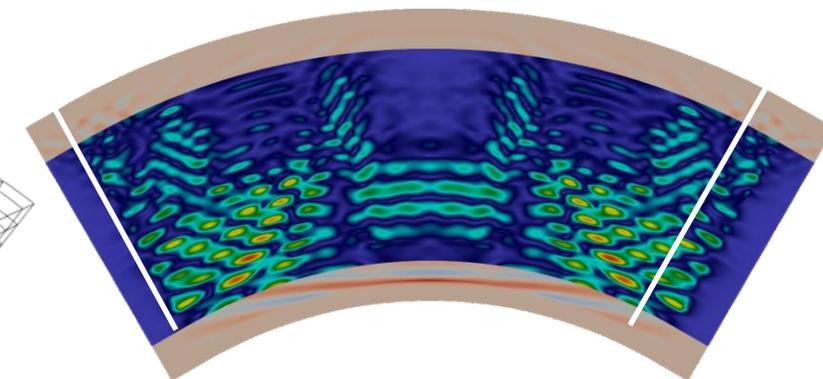
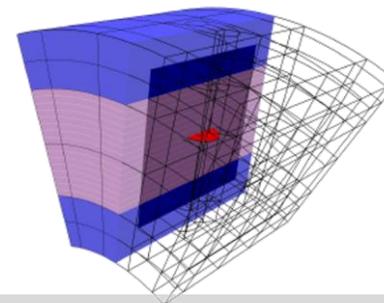
- Ondes de volume
- Ondes guidées
- Module composites
- Module soudures
- SHM



*Simulation CND soudure austénitique*



*Simulation propagation pipe corrodée*



*Simulation CND composite, ondulation de plis*

► **Méthodes semi-analytiques pour géométries canoniques (plans/cylindres)**

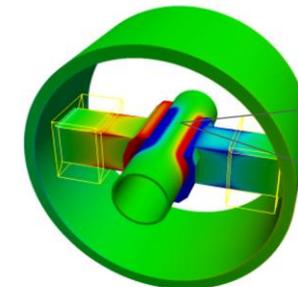
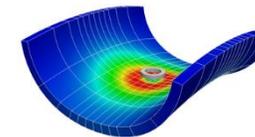
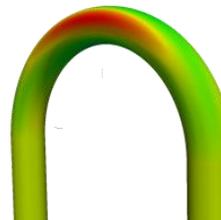
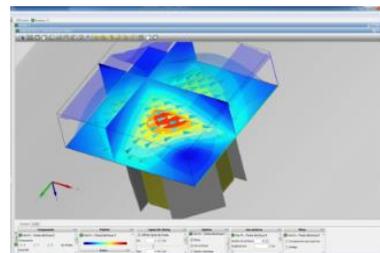
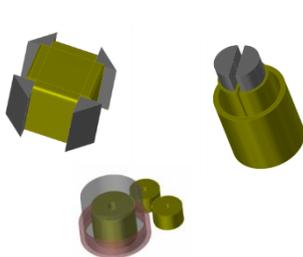
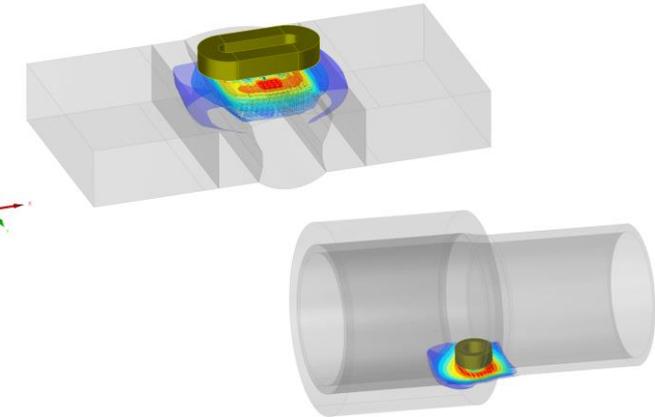
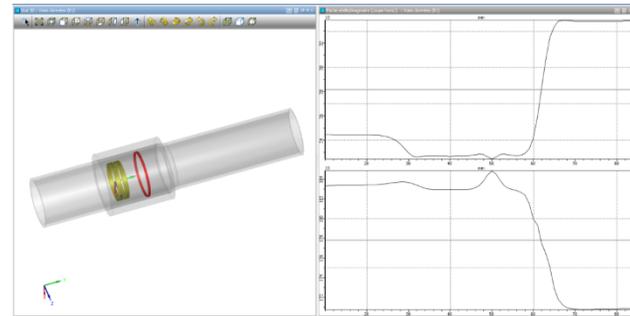
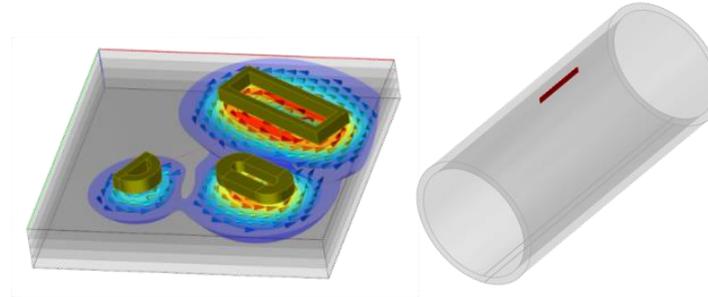
- Méthodes modales / Dyades de Green / réciprocity

► **Solveur 2.5D (Finite Integration Technique)**

- Méthode numérique, étendue au configs 3D (2D axisymétrique)

► **Solveur 3D (SIE : équations intégrales de surface)**

- Méthode aux éléments de frontière, 3D



Circuit magnétique & tube inspecté

► **Modélisation interaction photon/matière**

- rayonnement direct (Beer-Lambert)
- rayonnement diffusé (Monte Carlo, basé sur code MODERATO)

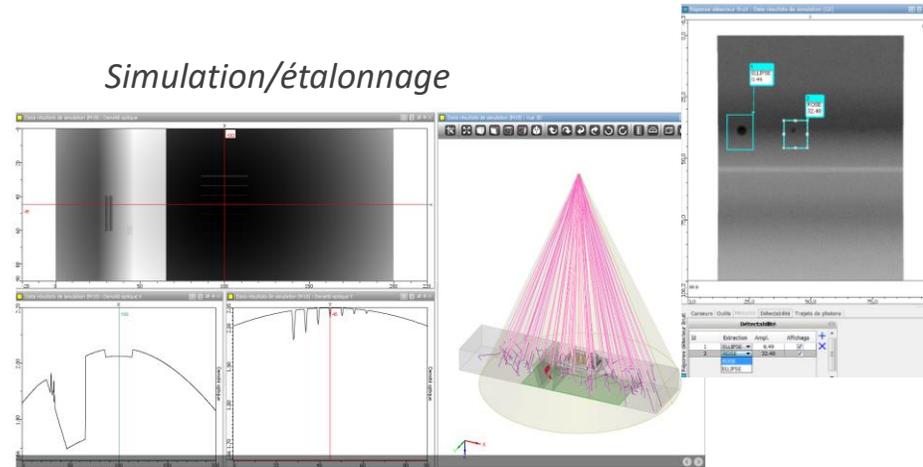
► **Paramétrages :**

- Sources : X, gamma, accélérateurs linéaires
- Pièces paramétriques ou CAO3, hétérogènes
- Détecteurs : films argentiques et radio numérique
- Prise en compte sensibilité (MTF, résolution, DQE...)
- Défauts et indicateurs de qualité d'image (IQI)

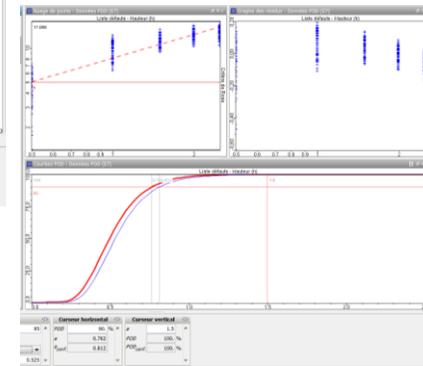
► **Reconstruction tomographique :**

- Algorithme FDK (CPU/GPU), extension mvt hélicoïdal
- Algorithmes itératifs (SIRT/SART)
- Algorithme 2D basé sur compressed sensing

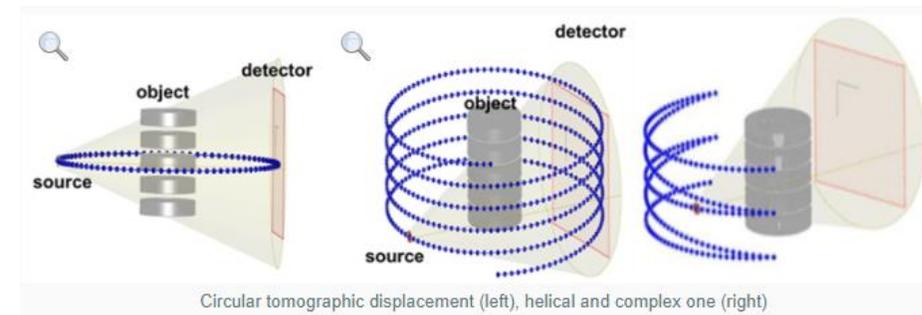
Simulation/étalonnage



Critères de détectabilité



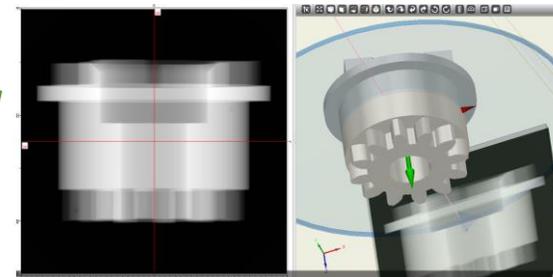
PoD



Trajectoires Tomos

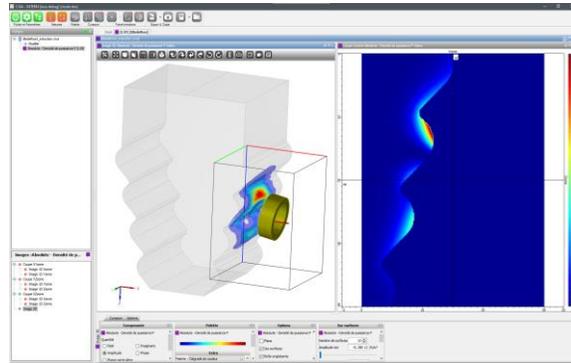


Simulations  
projections



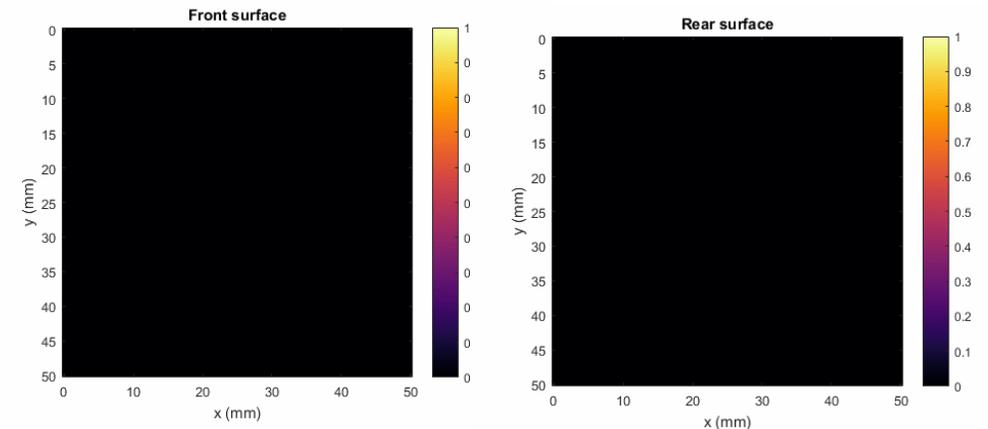
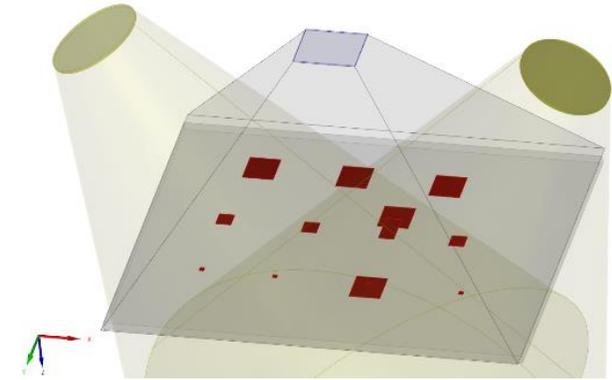
Reconstruction tomographique

- ▶ Premier module de simulation thermographie (CIVA 2021)
- ▶ Simulation du contrôle par Thermographie active
- ▶ Simulation de l'échauffement par induction électromagnétique
  - Utilisation solveur FIT module Electromagnétique



- ▶ Applications :

- Inspection de structures composites
- Inspection de pièces métalliques



# Simulation intensive

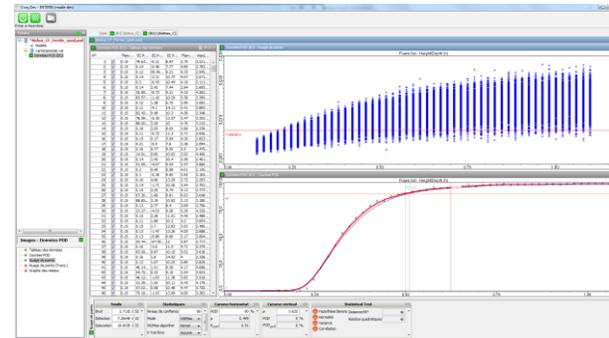
► 3 applications principales requérant des outils de simulation (quasi) temps-réel

- Simulation de courbes PoD (et autres outils statistiques)
- Outils de diagnostic (détection/classification/caractérisation)
- Optimisation de méthodes CND

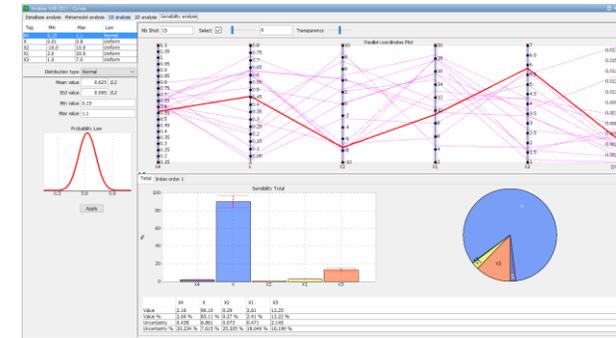
► Solution : remplacement de modèles directs par un métamodèle

- Etape 1 : construction d'une base de données adaptative
- Etape 2 : ajustement d'un interpolateur (métamodèle)
- Etape 3 : substitution du modèle direct par le métamodèle pour l'application (PoD, inversion, analyse de sensibilité, etc...)

*Courbes PoD sur données synthétiques*



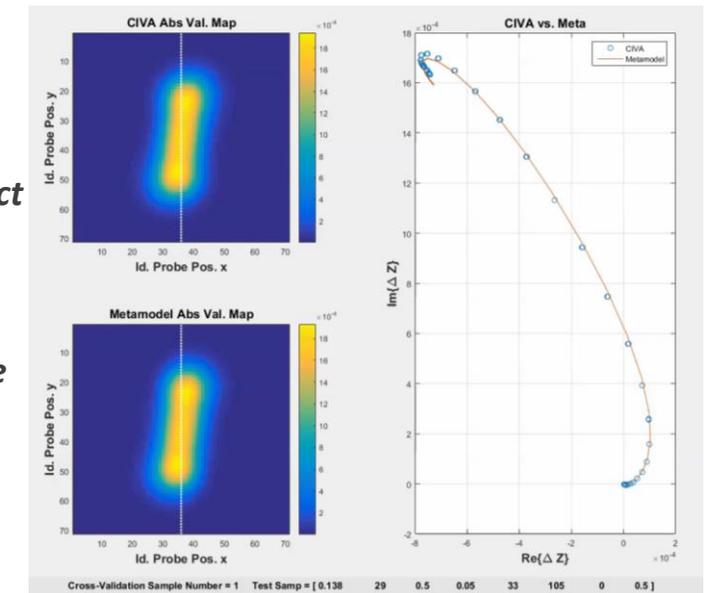
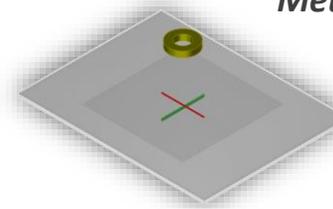
*Analyse de sensibilité*



*Modèle direct*

Vs

*Métamodèle*



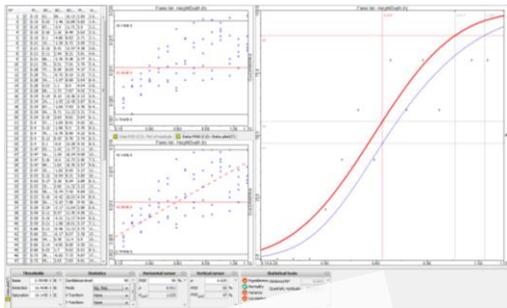
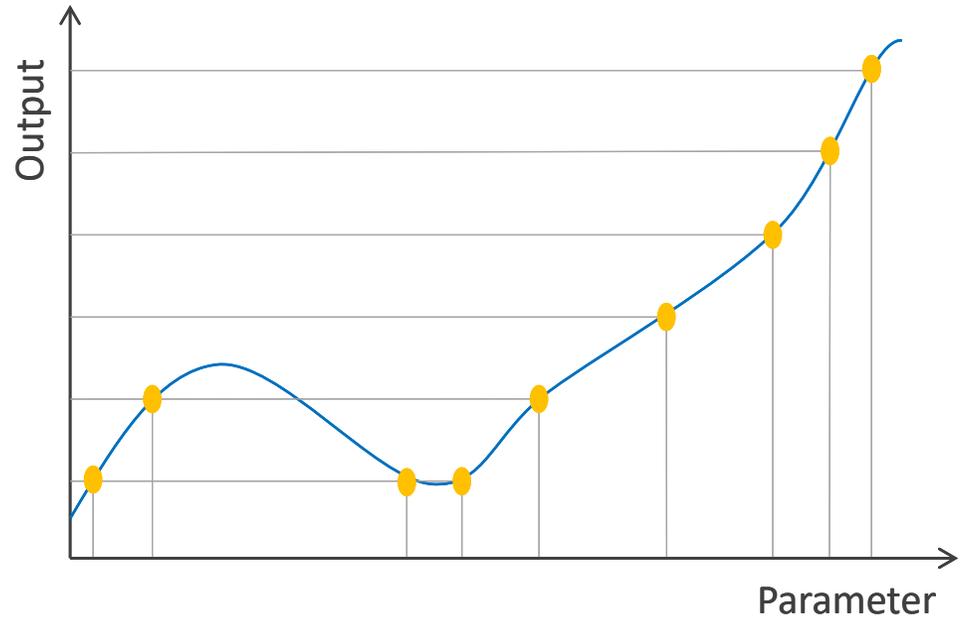
### ► Options pour la construction de la base de données

- Design of experiment (grid, LHS, Sobol sequence, ...)
- Adaptive design (Output space filling, sparse grid)

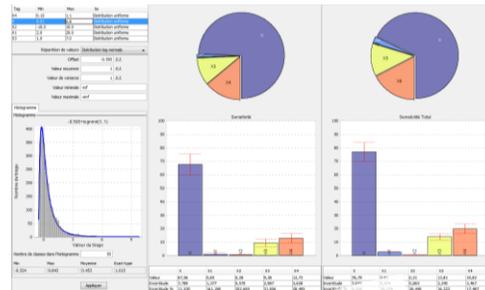
### ► Techniques de régression (construction métamodèle)

- Interpolation multilinéaire
- Krigage, Process Gaussiens, régression noyaux
- Outils sparse grid et CNN (notebooks Python)

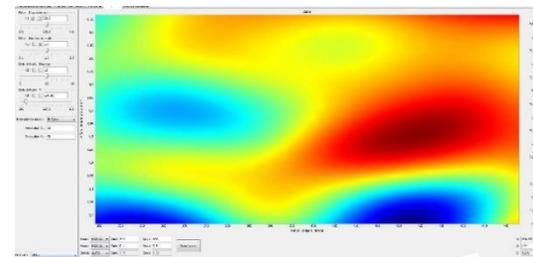
### ► Usages des métamodèles



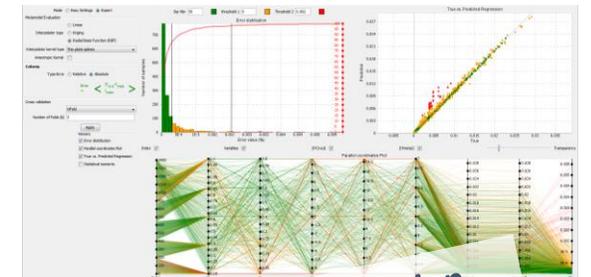
Études PoD



Analyse sensibilité  
(paramètres influents)



Simulation temps réel



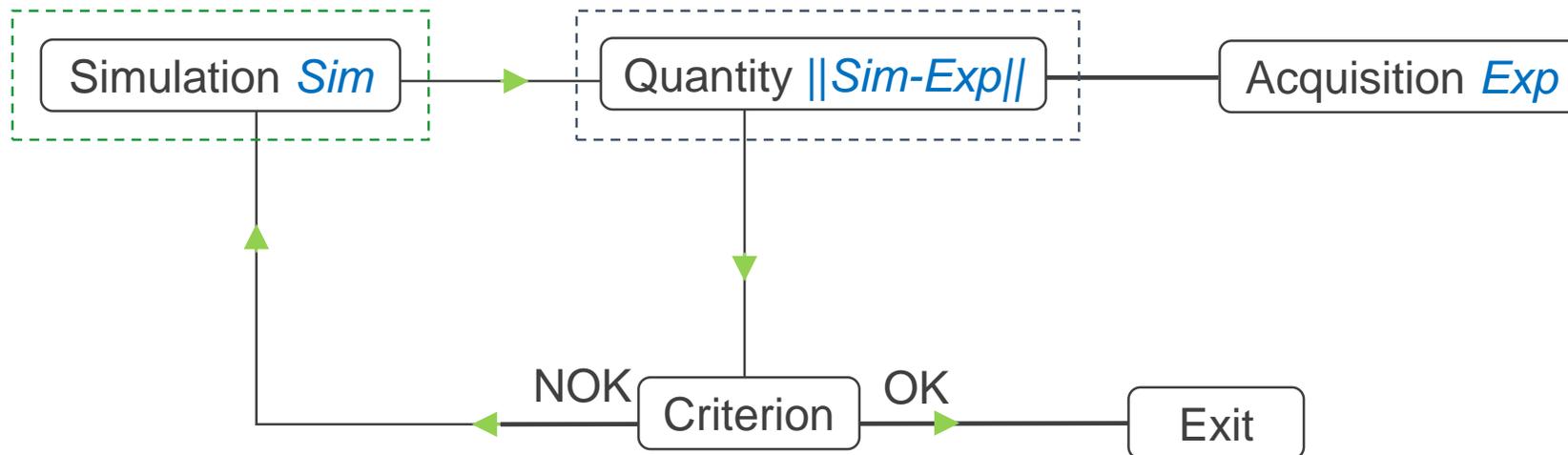
Evaluation précision  
métamodèle

## Caractérisation de défauts par méthodes itératives

- ▶ Définition d'un critère représentatif de l'écart/accord entre simulation et expérience
- ▶ Minimisation de ce critère par méthodes d'optimization itératives

Coût de calcul intensif  
→ Utilisation métamodèle

**Verrou : choix du critère (ne pas travailler sur données brutes)**

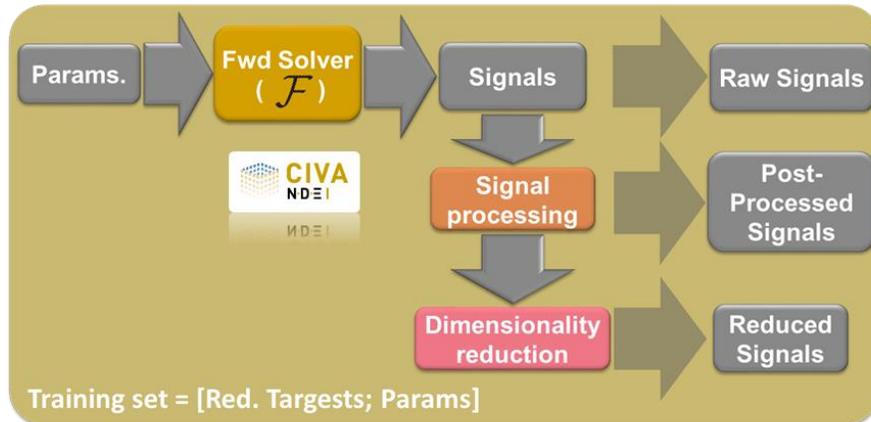


## Génération d'une base de données pour apprentissage d'un modèle (Machine Learning ou autre)

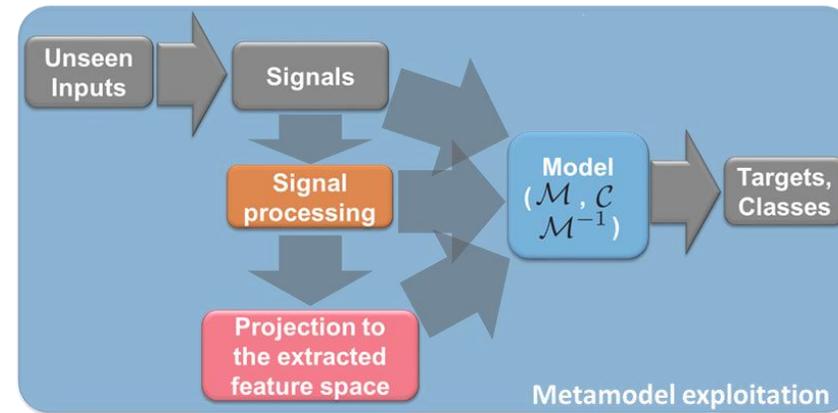
## ► 2 étapes :

- constitution de la base de données et apprentissage du modèle ( peut être long...)
- Exploitation du modèle pour classification/inversion

## 1. Off-line phase (possibly time consuming)



## 2. On-line phase (possibly almost real time)



# Exemples d'application

*Inspection de soudures T par méthode TFM (focalization ultrasons multi-éléments) > Intégration et automatisation de la procédure d'analyse*



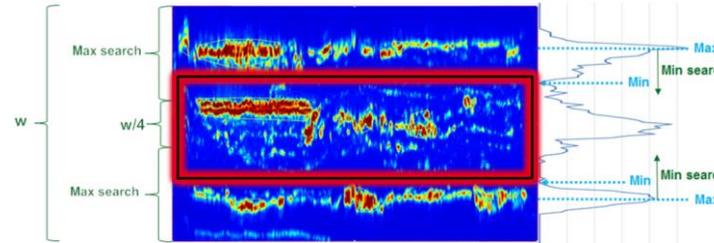
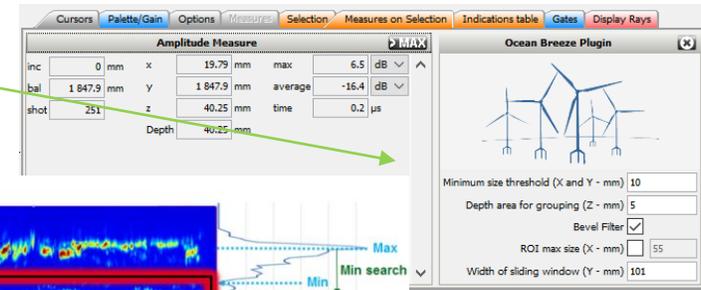
EXTENDE  
CIVA



~ 7 kms de soudures à analyser (GEKKO - EDDYFI)



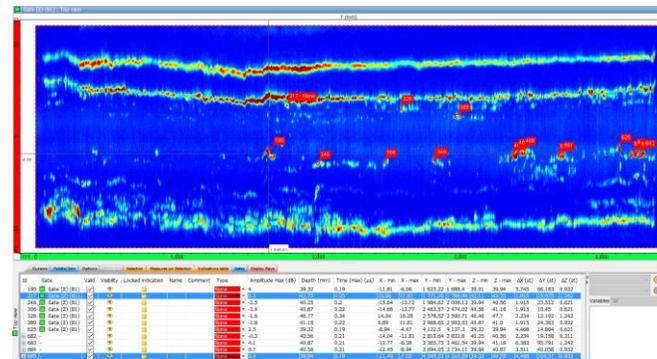
Plug-in analyse automatique



Détection, filtrage, regroupement



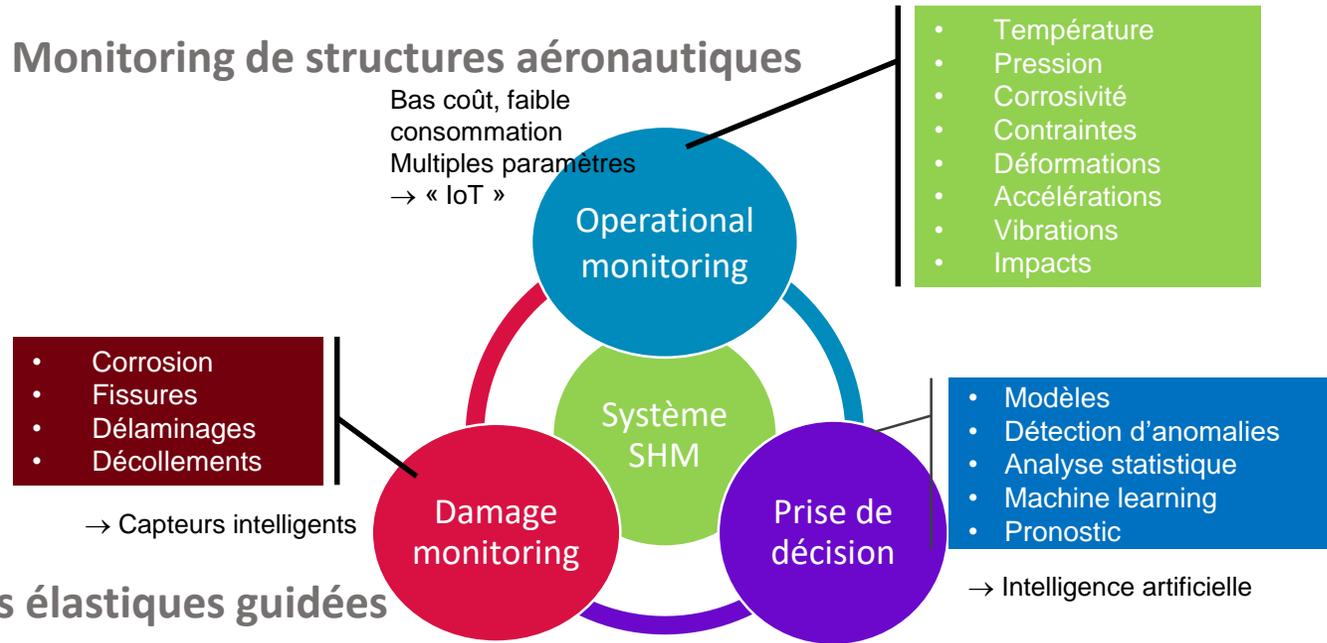
Table d'indications et rapport d'analyses



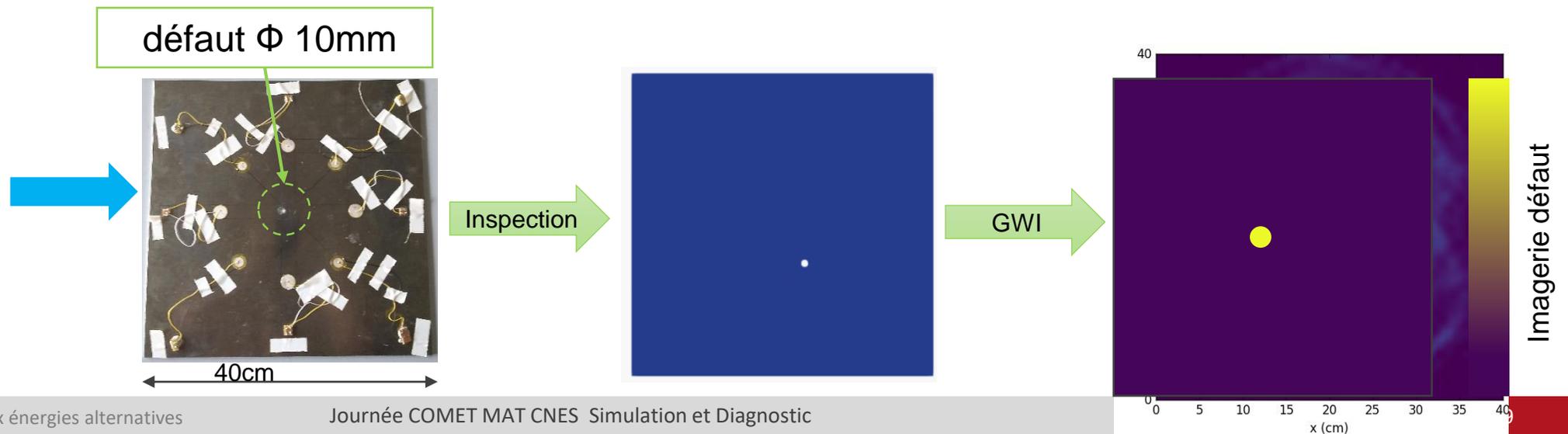
**Bilan 4 h.mois VS 1 h.jour**

**Utilisé en production (maintenance champs éoliennes)**

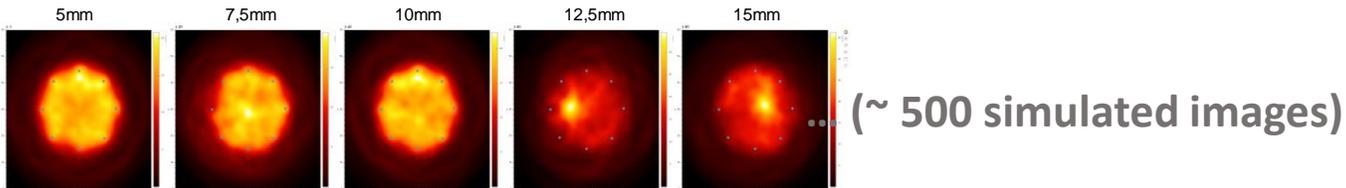
► Contexte : Structural Health Monitoring de structures aéronautiques



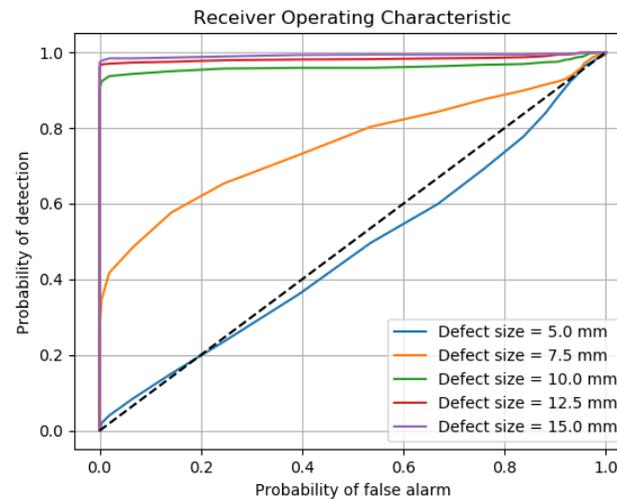
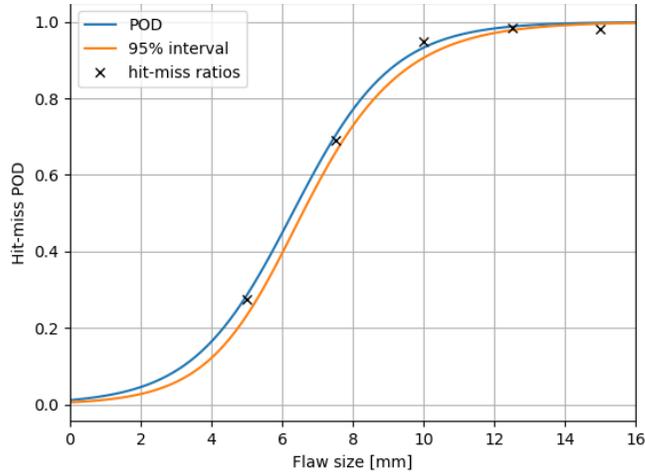
► Application : SHM par ondes élastiques guidées



► Génération d'une base de données simulées par métamodèle (module CIVA SHM)



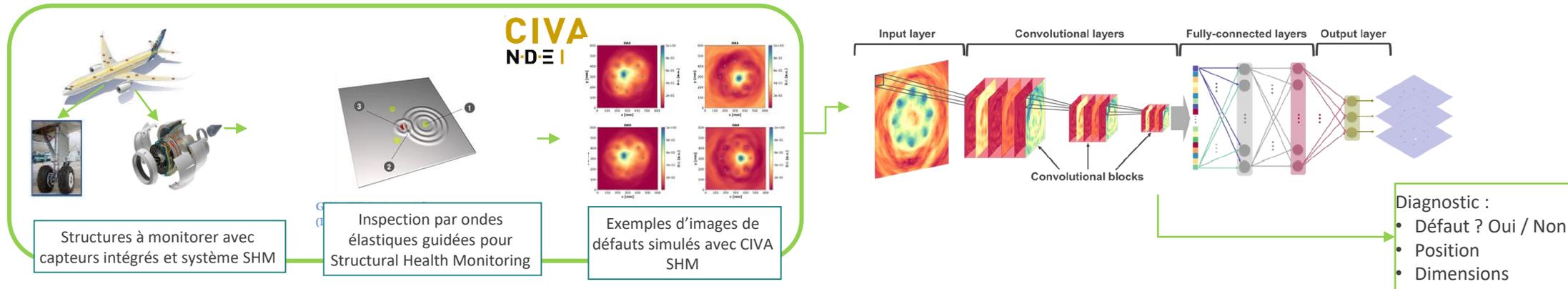
► Calcul de courbes PoD / ROC



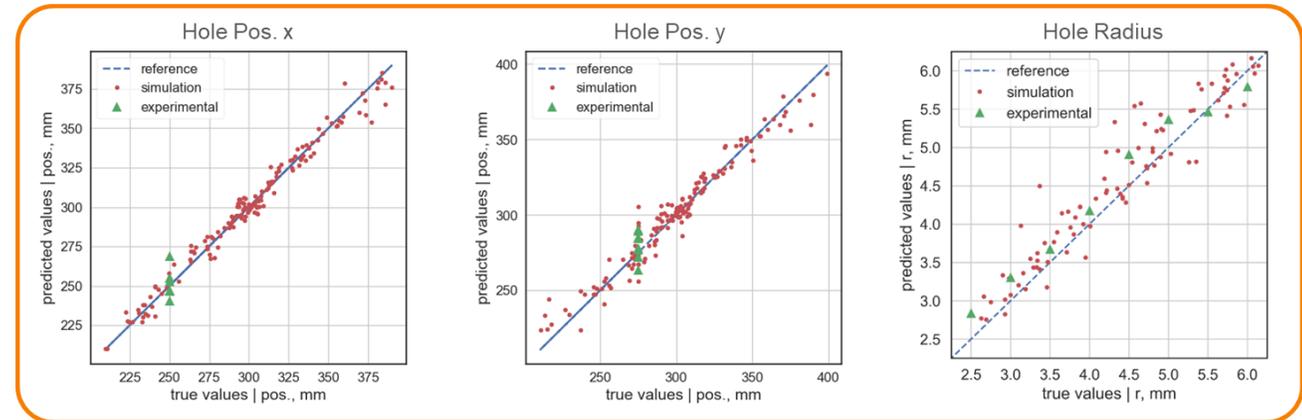
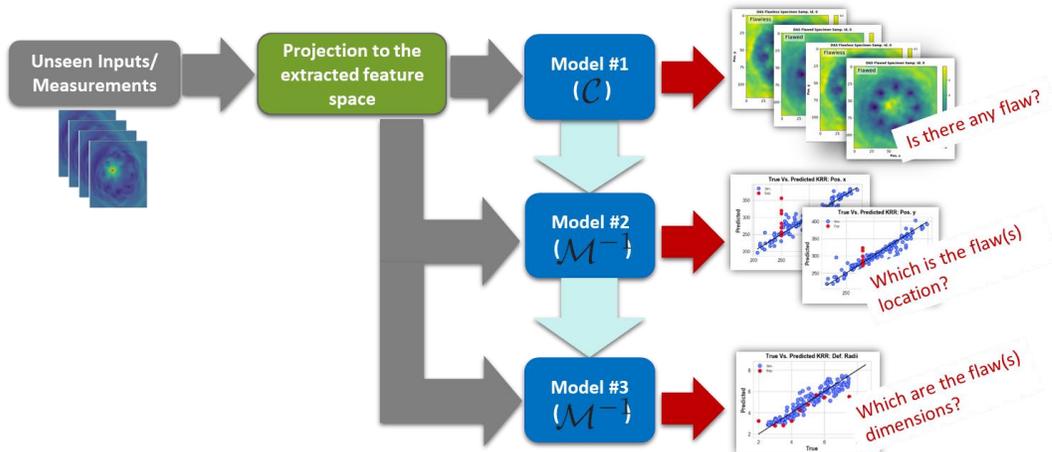
- Quelle taille de défaut détectable avec une probabilité donnée ?
- Quel taux de fausse alarme ?
- Quelle probabilité de détecter un défaut de dimension donnée ?

Démonstration de performances sur données simulées

## ► Génération d'une base de données simulées et apprentissage d'un algo (CNN)



## ► Application sur données réelles



Inversion sur données expérimentales après apprentissage sur données simulées

AI (CNN) sur données simulations puis appliqué sur données réelles

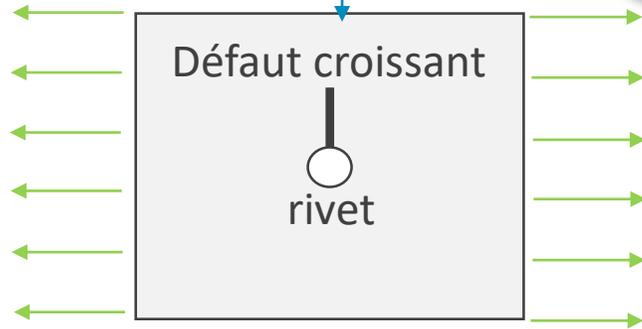
► Use case : propagation d'une fissure à partir d'un rivet



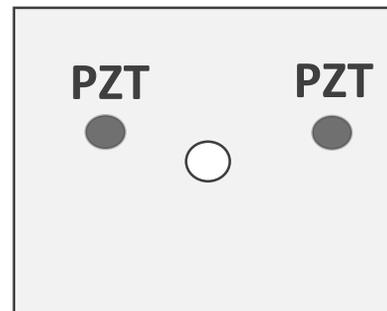
Fuselage fissuré



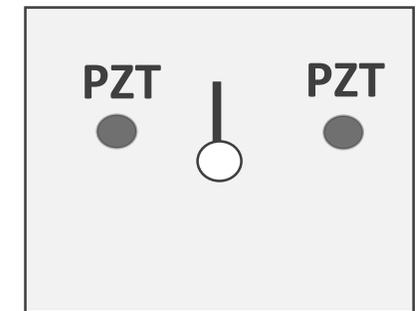
Monitoring défaut de fatigue



Fatigue

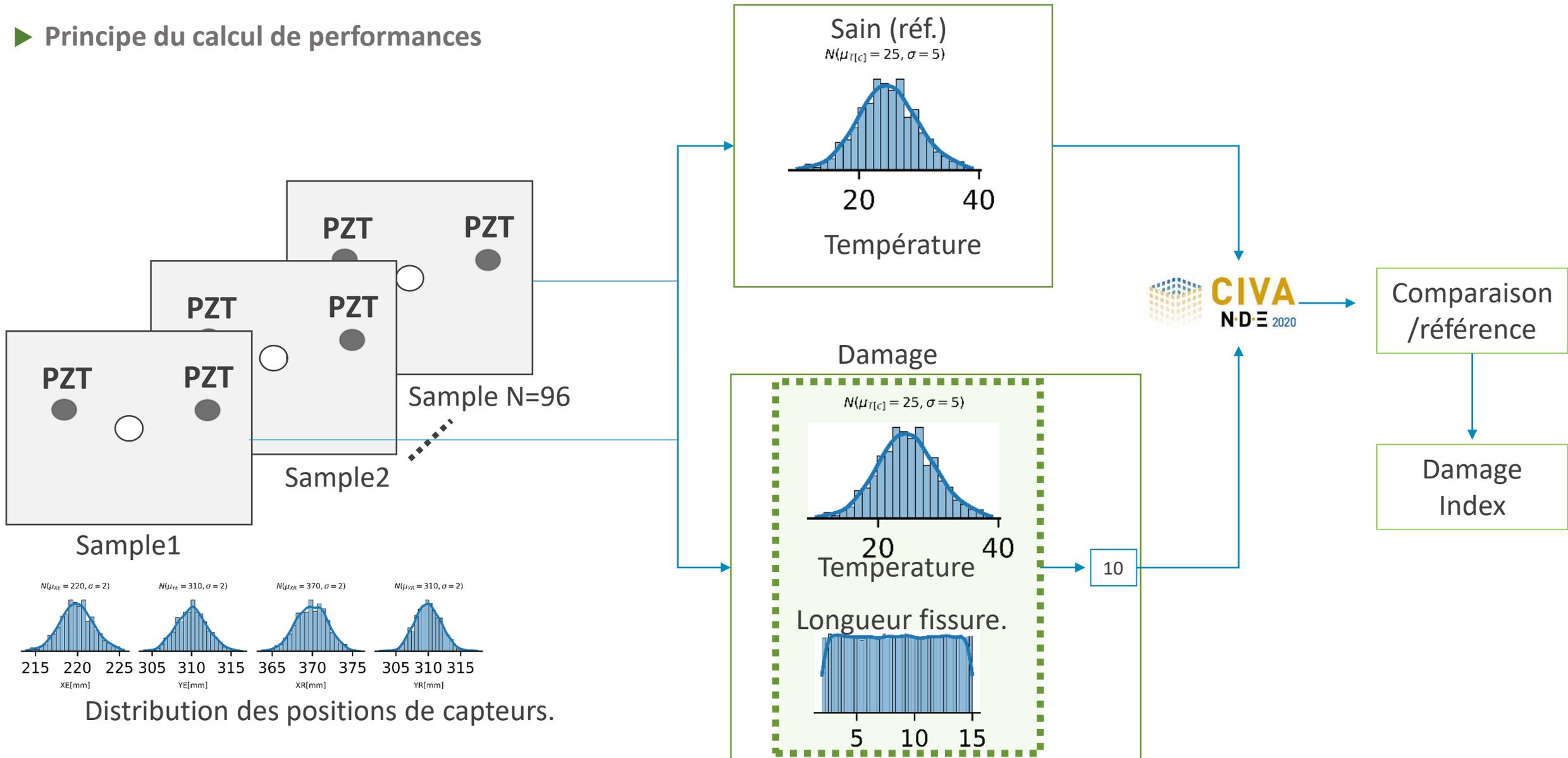


Etat sain

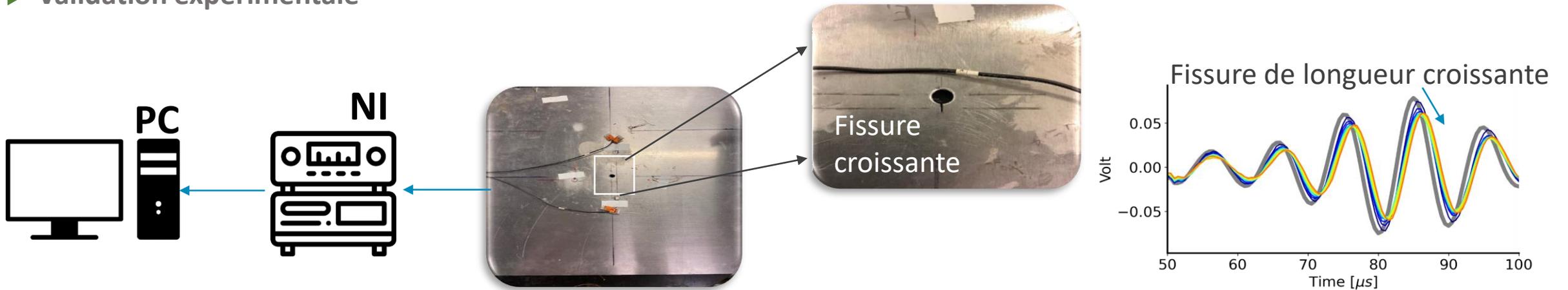


Etat endommagé

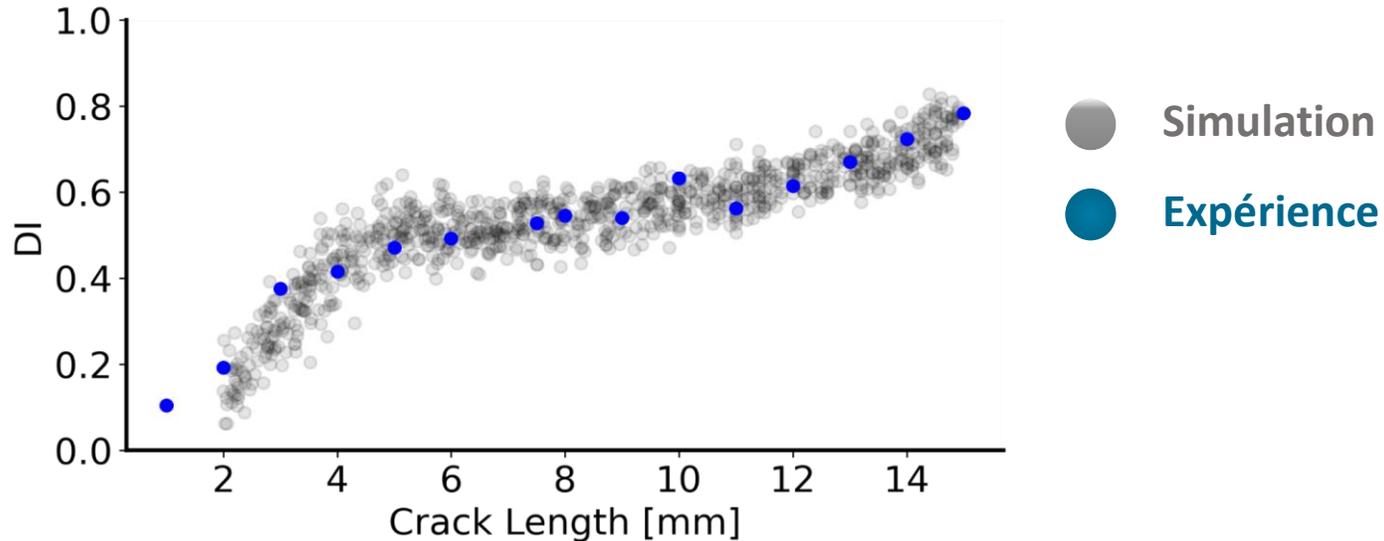
► Principe du calcul de performances



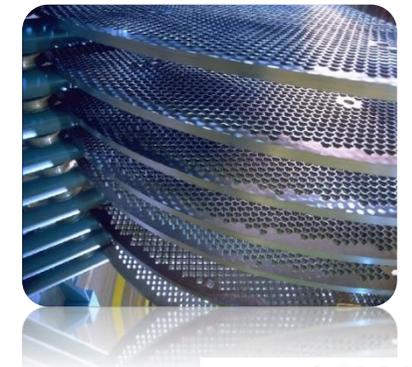
## ► Validation expérimentale

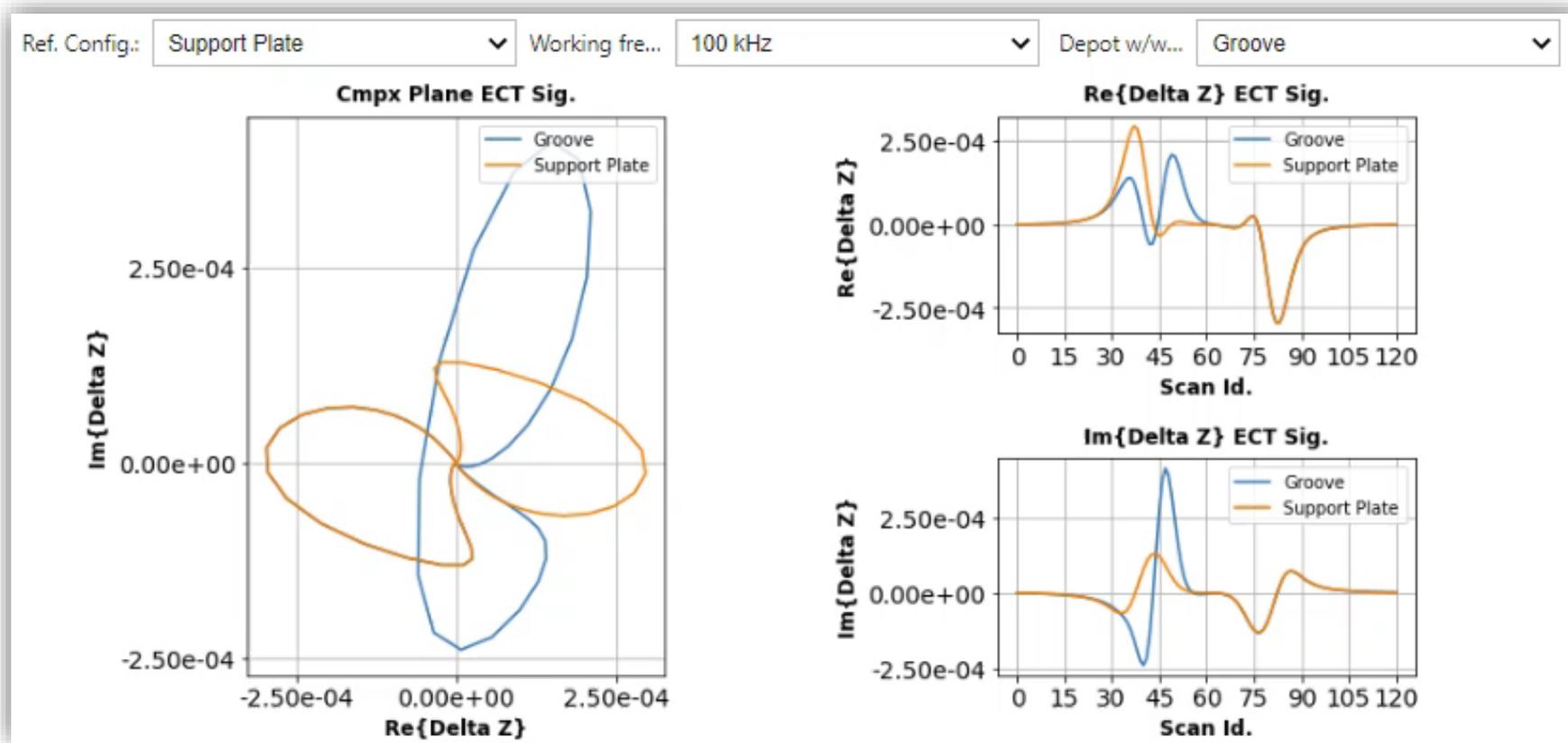
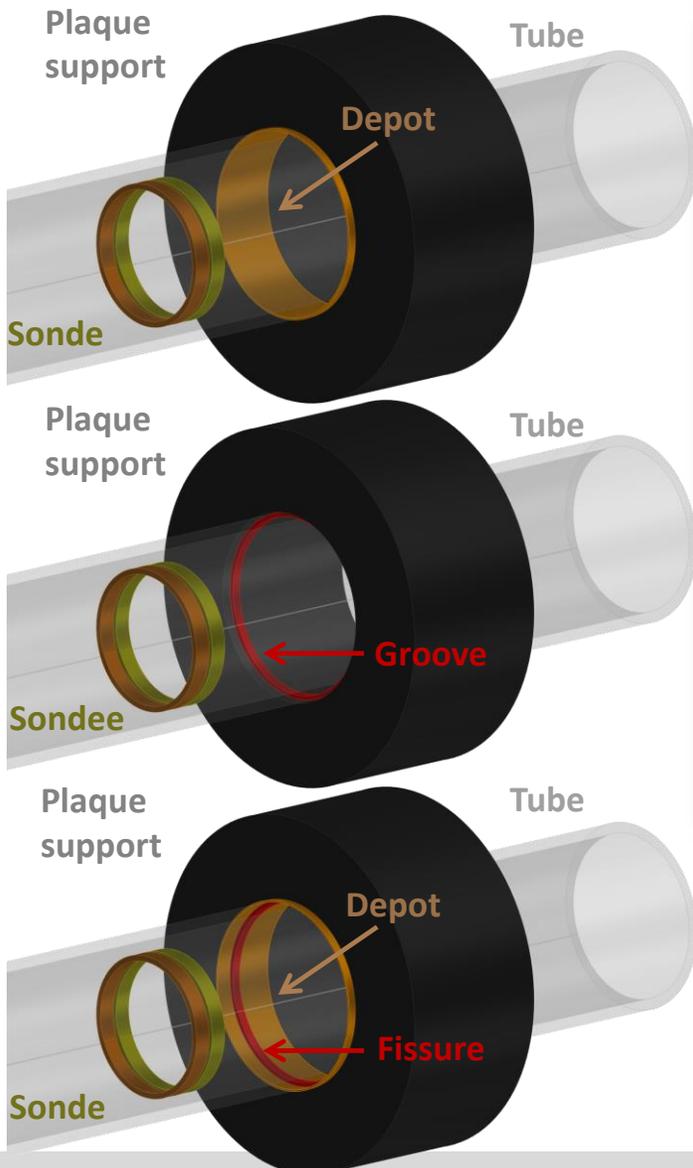


Comparaison: Damage Index (DI) =  $\frac{\max(\|S_{\text{damage}} - S_{\text{sain}}\|)}{\max(\|S_{\text{sain}}\|)}$



- ▶ Caractérisation de défauts par méthodes non-itératives
- ▶ Application à la classification automatique dans le contexte de l'inspection de tubes générateurs de vapeur par courants de Foucault
- ▶ Cas particulier des tubes générateurs de vapeurs (GV)
  - Détection de défauts proches des plaques supports
  - Détections d'amincissement proche des plaques
  - Discrimination entre défaut, dépôt magnétique et signaux des supports plaque





## Observations[1]:

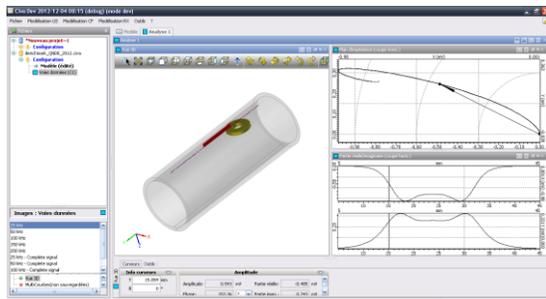
- Variation du signal CF en présence de dépôt
- Le signal CF est “masqué” en présence d’un dépôt

[1] Skarlatos et al., (2009). Modelling of steam generator tubes inspection in the proximity of support plates area via a coupled finite elements–volume integral method approach. *Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XII), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 51-58.

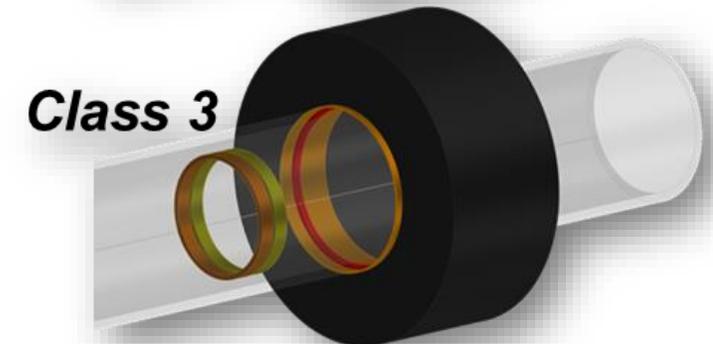
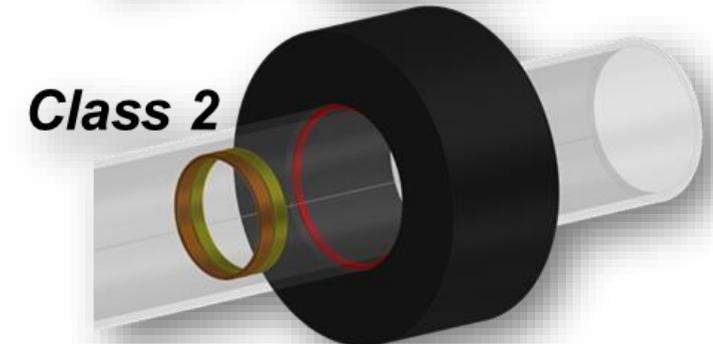
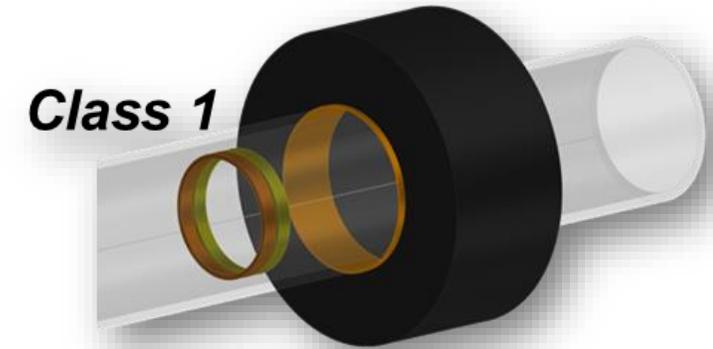
Class Id.	Class Type
<b>Class 1</b>	<b>Deposit only</b>
<b>Class 2</b>	<b>Groove only</b>
<b>Class 3</b>	<b>Deposit and Groove</b>

Id.	Flaw Parameters	Var. Range
1	Deposit thickness [mm]	[1e-2, 2e-1]
2	Deposit length [mm]	[2, 10]
3	Groove length [mm]	[0.5, 2.0]
4	Groove height [mm]	[0.127, 0.762]
5	Groove z-position [mm]	[65.5, 75]

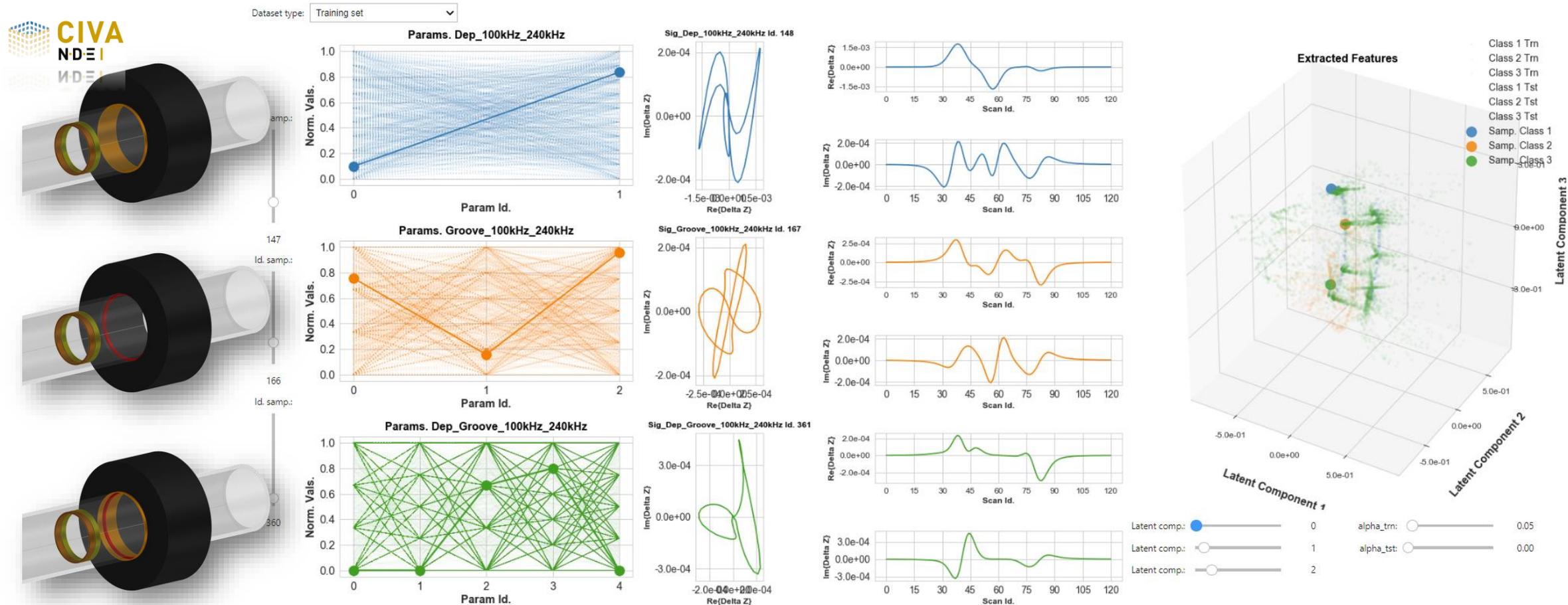
Génération de 6 bases de données



Class Type	Training set nb. samples	Test set size nb. samples
Deposit only	350	250
Groove only	370	250
Deposit and Groove	2650	250



## ► Réduction de dimensionnalité des signaux CFs des 3 classes avant apprentissage



Learning extracted features vs. parameters

Classifier  
(C)

## ► Evaluation de différents classifieurs sur données simulées : Matrices de confusion

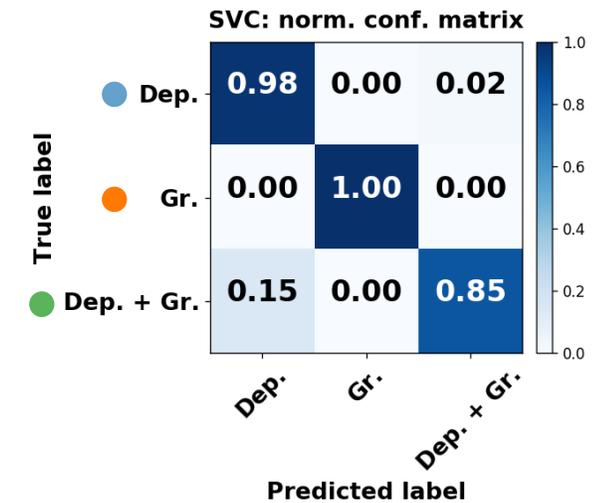
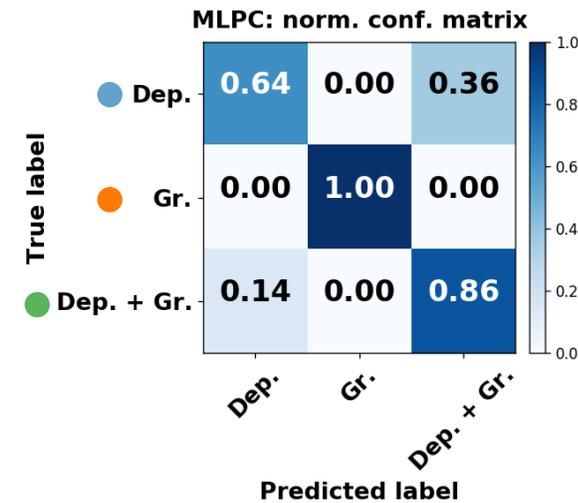
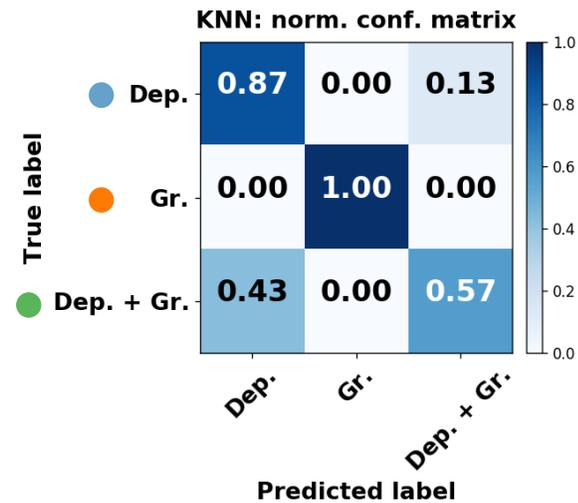
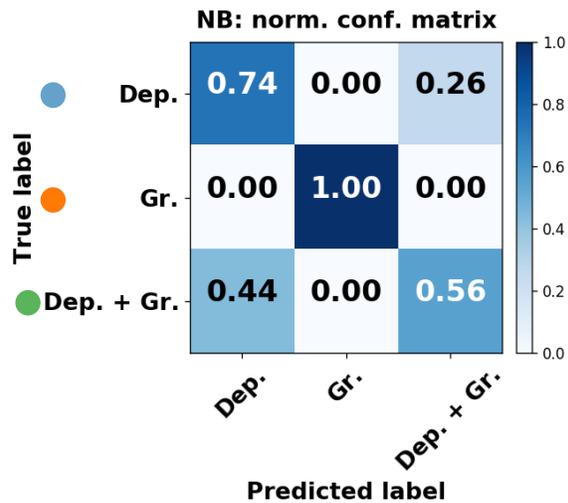


Naïve Bayes

KNN

MLPC

SVC



- Meilleurs résultats avec SVC
- Autres classifieurs : difficulté à discriminer “Deposit” vs. “Groove + Deposit”
- “Groove” signaux toujours bien détectés

### ► Simulation directe :

modèles semi-analytiques, numériques ou hybrides, en fonction des techniques et complexités des use case (de l'ordre de qqes secondes à qqes heures)

### ► Simulation intensive :

- Besoins de modèles quasi-temps réel pour simulations (multi) paramétriques et algorithmes d'inversion
- Métamodèles construits à partir de bases de données adaptatives et de méthodes de régression

### ► Applications :

- Outils statistiques (PoD, analyse de sensibilité, courbes ROC...)
- Diagnostic à partir de modèles évalués sur données simulées :
  - Détection
  - Positionnement
  - Caractérisation (dimensions)

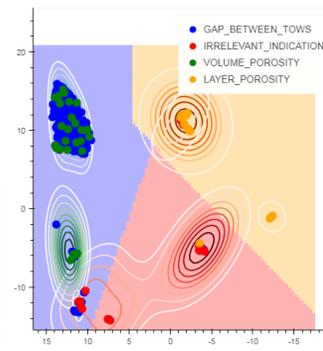
### ► Autres applications (déjà étudiées, non présentées ici)

- Evaluation algos sur données expérimentales supervisées
- Fourniture de BdD hybrides (mixte simulation / expérience)
- Utilisation de modèles pour transfert learning
- ....

Large database created with CIVA (10<sup>6</sup> images)



Automated detection using supervised learning





DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE