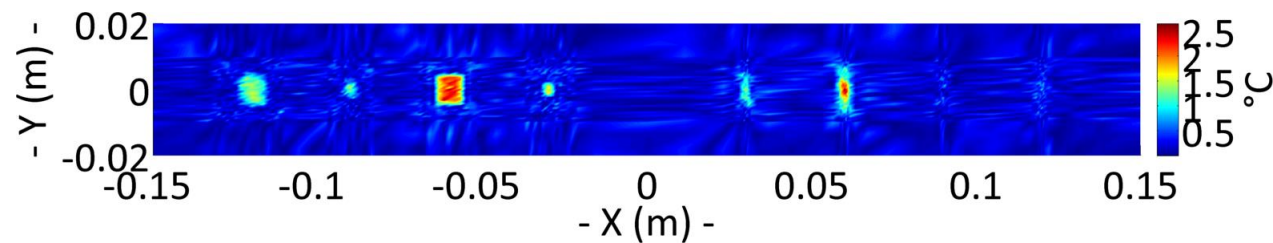


MODÉLISATION DU CND PAR INDUCTO-THERMIE DE MATÉRIAU COMPOSITE STRATIFIÉ

Permanents : G. Wasselynck, H.K. Bui, A. Pierquin, D. Trichet, G. Berthiau

Doctorants : A. Ba, B. Kane, B. Azzabi (*métallique*), F. Senghor, H.K. Bui, G. Wasselynck, B. Ramdane (*MCF Grenoble*), S. Bensaid (*MCF Bouira*)



Laboratoire IREENA



- 21 EC, 4 associés, 4 Post-Doc, 16 doctorants, 15 master/an
- **MEE** : **M**aitrise de l'**E**nergie **E**lectrique
 - EMR, transport, Smart Grid
 - Réseau isolé, ferme éolienne, dimensionnement technico-économique, tolérance au défaut, diagnostique câble
- **MDE** : **M**odélisation des **D**ispositifs **E**lectromagnétique
 - Conception et modélisation de machines électriques
 - Procédé de chauffage par induction
 - CND

Sommaire

- Contexte :
 - Composite
 - Technique Thermo-inductive
- Modélisation :
 - Approche multi-échelle
 - Intégration des défauts
 - Etude de détectabilité
- Suite :
 - Travaux en cours
 - Perspectives
 - Collaborations



CONTEXTE

Matériaux Composites

- Avec métaux :
 - Propriétés + Sollicitations mécaniques -> Forme de la pièce
- Avec composites :
 - Sollicitations mécaniques + Forme -> Propriétés
- Hautes performances : rapport poids/tenue, corrosion,...

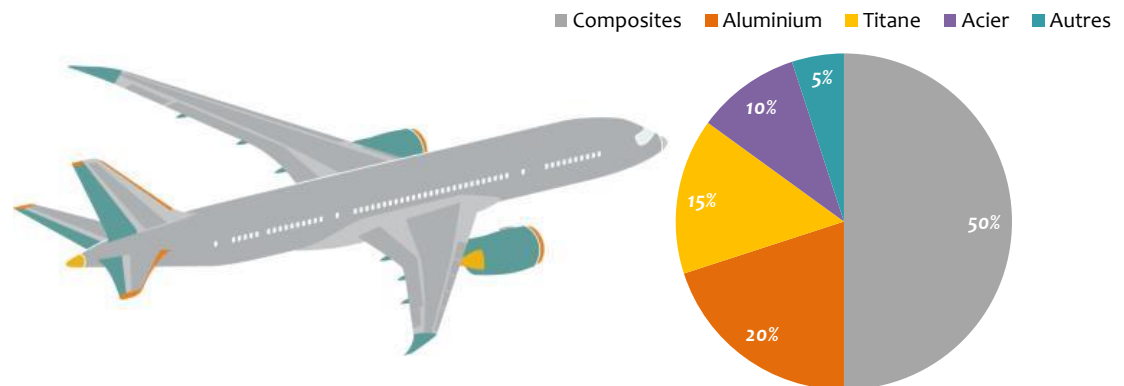


Image Boeing

Limite d'utilisation des composites

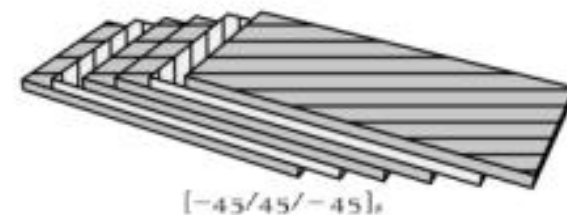
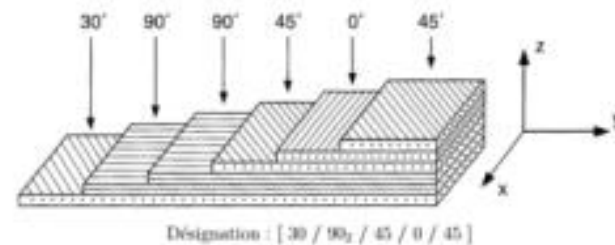
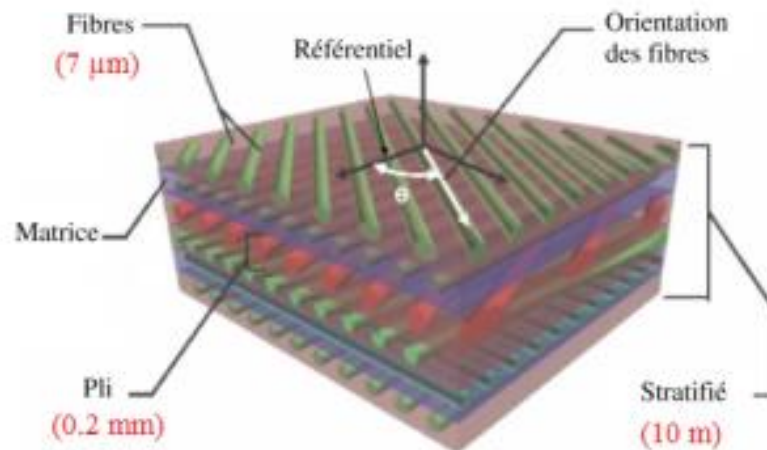
- Composite : 60 000 tonnes de composite/an
- Métaux : 1,8 Milliard de tonnes d'acier/an

- Limites de la production :
 - Cadence de fabrication faible ;
 - Procédés de fabrication énergivores ;
 - Difficultés d'**assemblage** ;
 - Procédure **CND** à qualifier ;
 - Recyclage complexes.

- IREENA : **Apport de l'induction magnétique**

Structure des composites étudiés

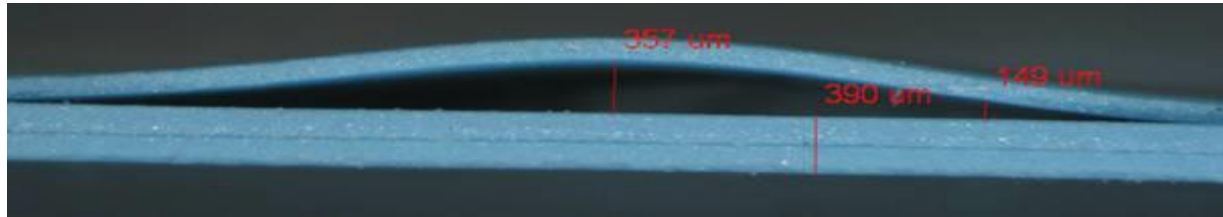
- Stratifié : Empilement de pli unidirectionnel (UD) ;
- Pli : Fibres de carbone longues dans matrice thermoplastique ;
- Plan de drapage : Orientation relative des plis UD pour la tenue mécanique.



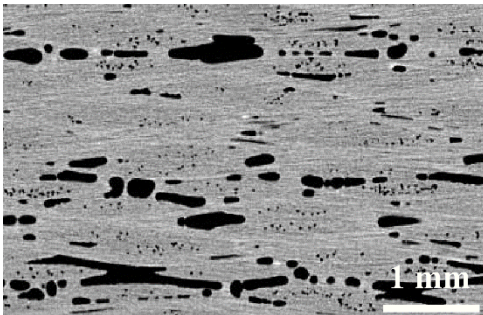
Défauts dans un composite

- 4 défauts les plus communs :

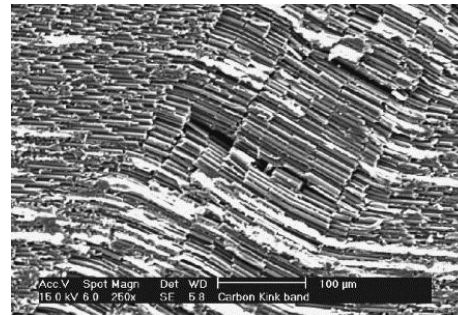
Délaminage



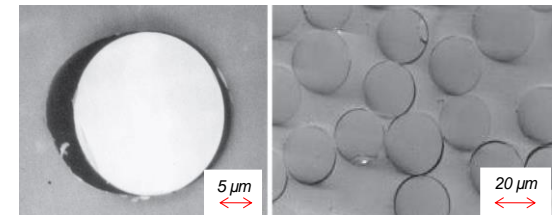
Porosité



Rupture de fibre



Décohésion fibre/matrice



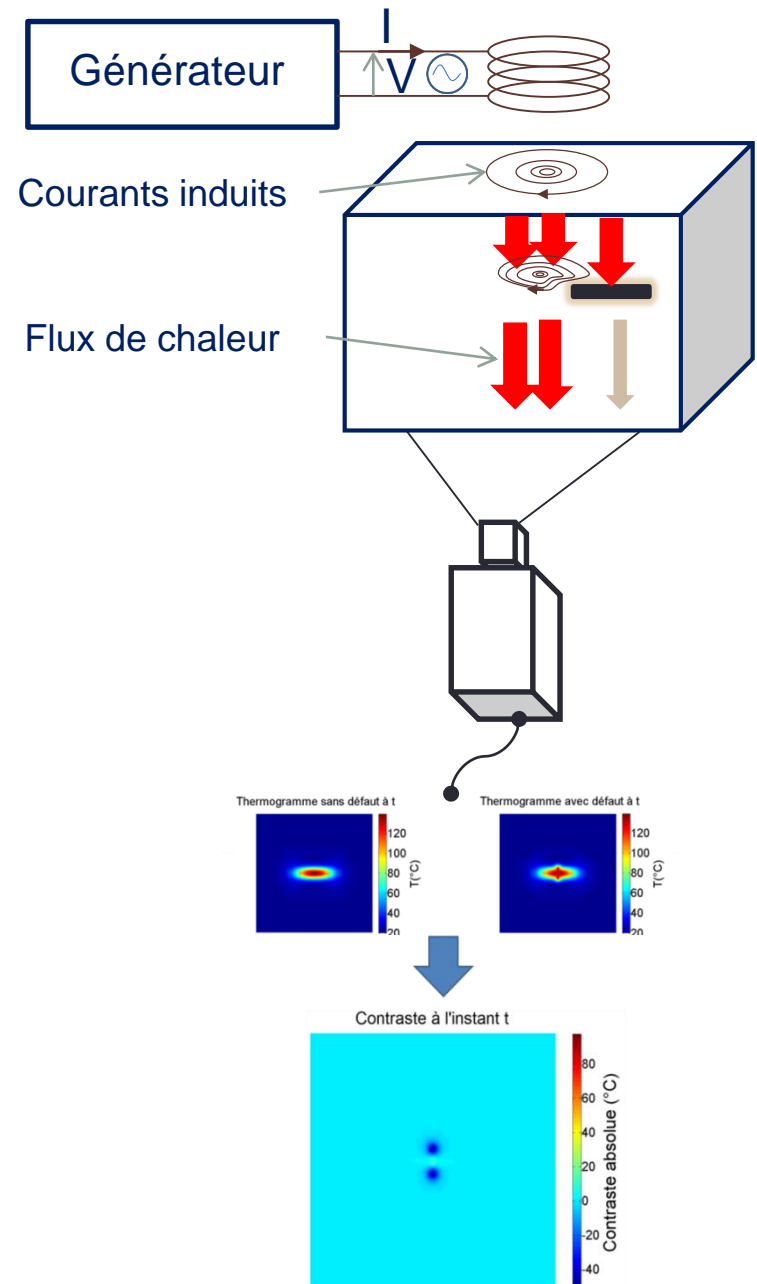
KASTNER, J., PLANK, B., SALABERGER, D. et SEKELJA, J. (2010). Defect and Porosity determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography. *International Symposium on NDT in Aerospace, We.1.A.2.*

GAMSTEDT, E. K. et SJOGREN, B. A. (1999). Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. *Composites Science and Technology*, 59:167–178.

YERRAMALLI, C. S. et WAAS, A. M. (2003). A failure criterion for fiber reinforced polymer composites under combined compression–torsion loading. *International Journal of Solids and Structures*, 40(5):1139–1164

CND Thermo-inductif

- Double mécanisme de détection :
 - Perturbation des courants induits et du flux de chaleur
- Pas de contact
- Mesures surfacique
- Détection « 3D » :
 - Courant induits : plan ;
 - Flux de chaleur : épaisseur.



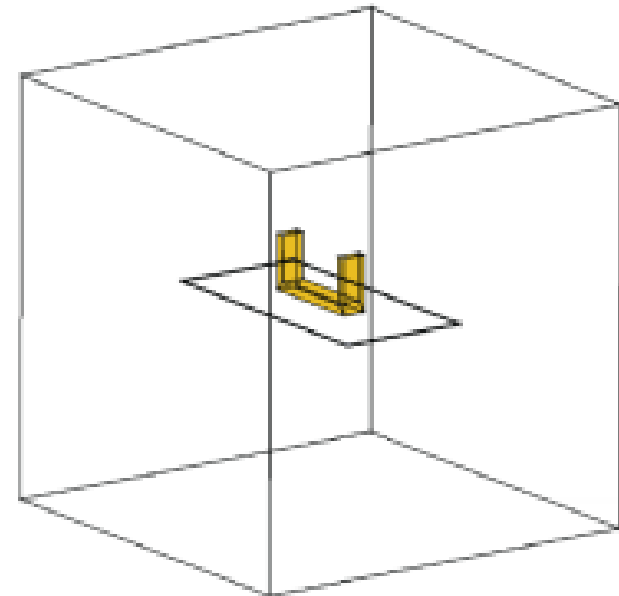
Besoin de modélisation

- Nécessité d'optimisation :
 - Forme inducteur, fréquence, entrefer, quel traitement d'image, ...
- Contrainte de modélisation :
 - Composite : Forte anisotropie, facteur d'échelle, hétérogénéités, phénomènes 3D, distribution aléatoire des fibres ;
 - CND : Couplage Magnétique-Thermique, réaction d'induit sur l'inducteur ;
 - Défauts : saut de propriétés, facteur d'échelle.

Compréhension fine de la circulation des courant dans le composite

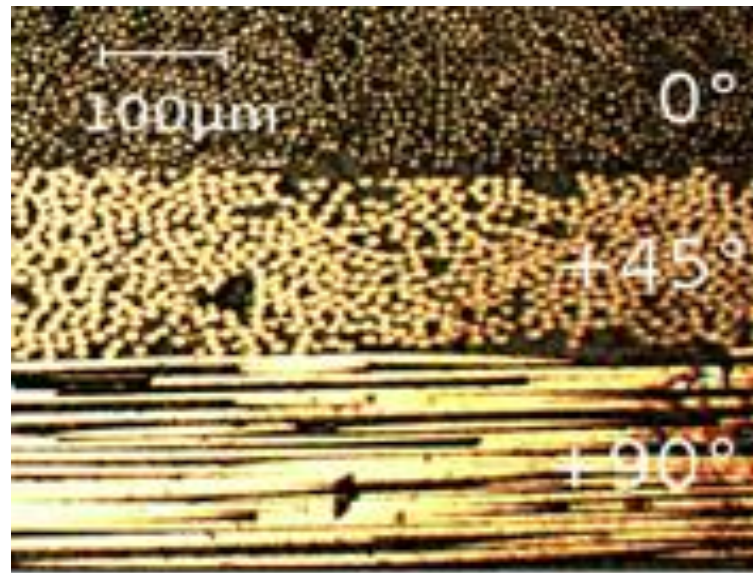
Compréhension de la circulation des courants induits

- Expérience 1 : chauffage par induction de composite UD
 - Courant 106A, fréquence 275kHz, tps de chauffe 30s
 - UD à 90° : Pas de chauffe
 - UD à 0° : ≈ 10 degrés
 - [0, 45, 90, 135, 135, 90,45,0]2s : Plusieurs centaines de degrés
- Conclusion :
 - Anisotropie
 - Influence du plan de drapage



Compréhension de la circulation des courants induits

- Expérience 2 : Coupe micrographique



- Conclusion :
 - Fibre ondulée et non droite
 - Contact électrique entre fibres -> Percolation électrique

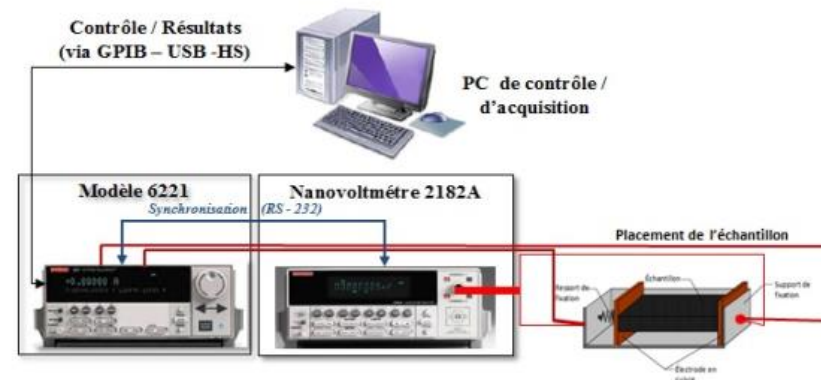
Compréhension de la circulation des courants induits

- Expérience 3 : Essai volt-ampèremétrique

	Conductivity ($S.m^{-1}$)			
	UD σ_{\parallel}	UD σ_{\perp}	UD σ_t	QI σ_t
Measures	35062±872	7.29±0.52	1.46±0.21	2.56±0.42

- Conclusion :

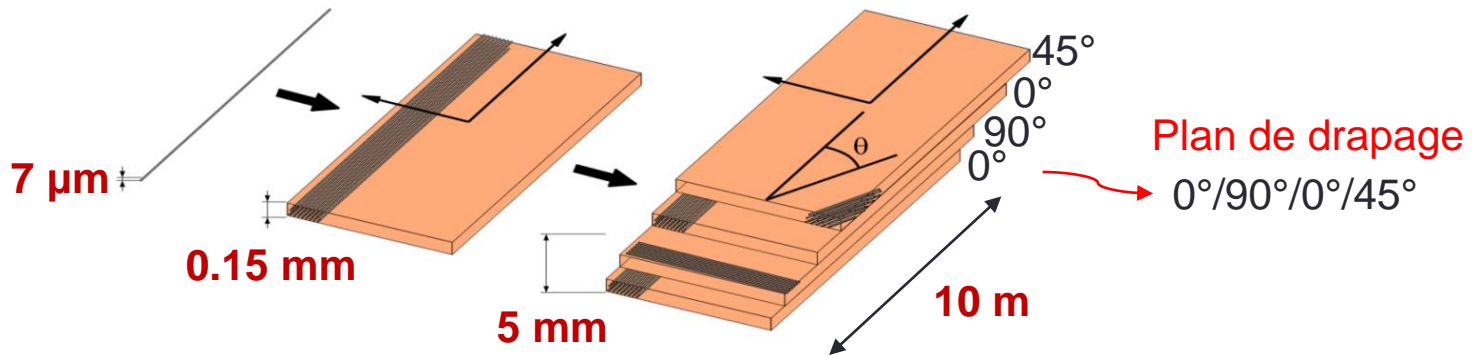
- Anisotropie ;
- Conductivité dans l'épaisseur dépend du plan de drapage.



MODÉLISATION

Approche multi-échelle

Fibre de carbone Pli **unidirectionnel Stratifié**
= Plis d'orientations **différentes**



3 Echelles : micro (fibres), méso (plis), macro (pièces)

Échelle micro

- Comportement aléatoire
- Forte anisotropie
- Apparition de contacts
- Complexité numérique

Échelle méso

- Facteur d'échelle
- Anisotropie par couche

Échelle macro

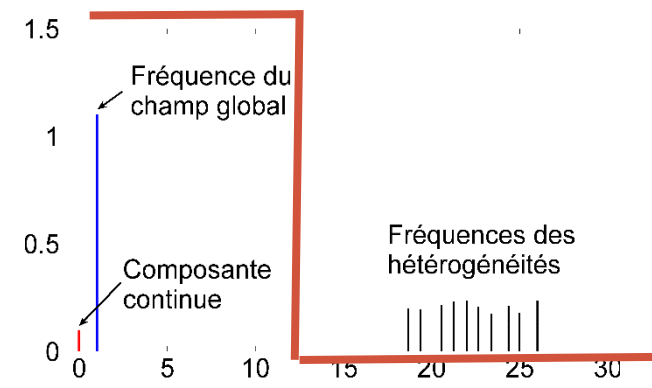
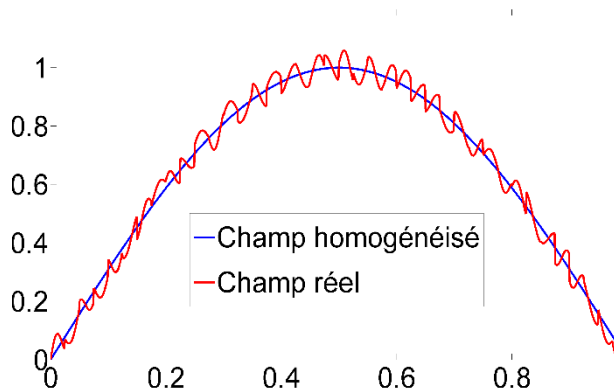
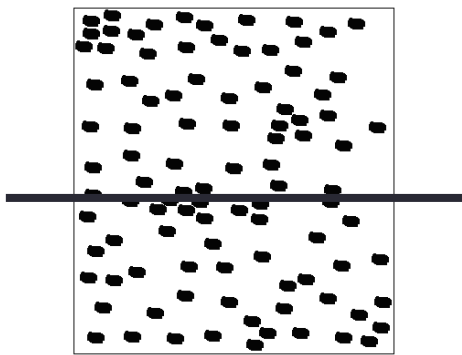
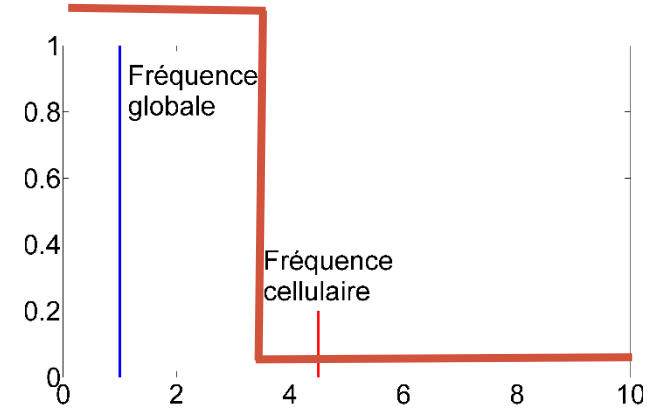
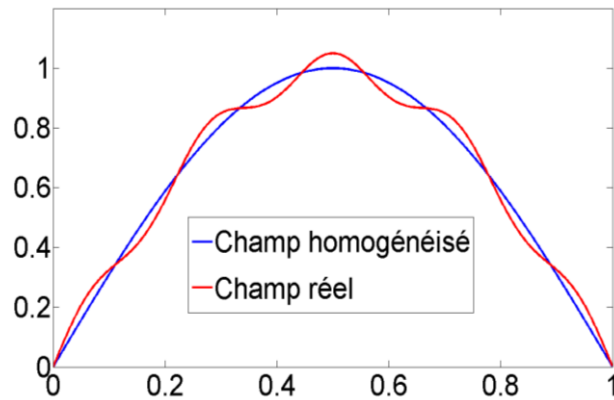
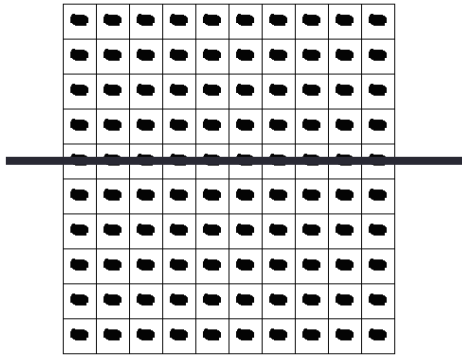
- Multi-physique non linéaire
- Prise en compte du mouvement
- Prise en compte du générateur



Modèle d'homogénéisation avec prise en compte de la percolation électrique

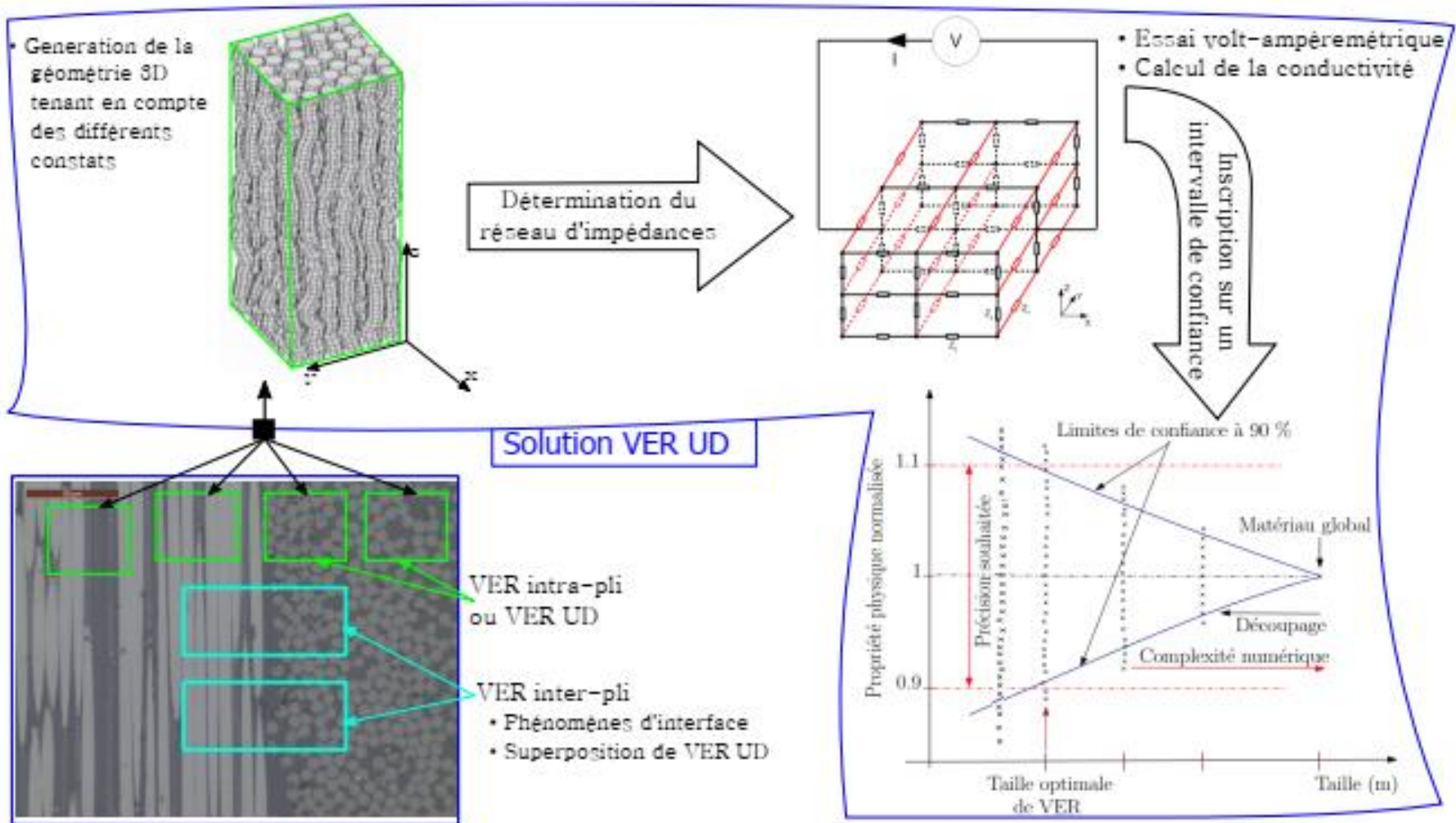
Résolutions EF multi-couche

Homogénéisation



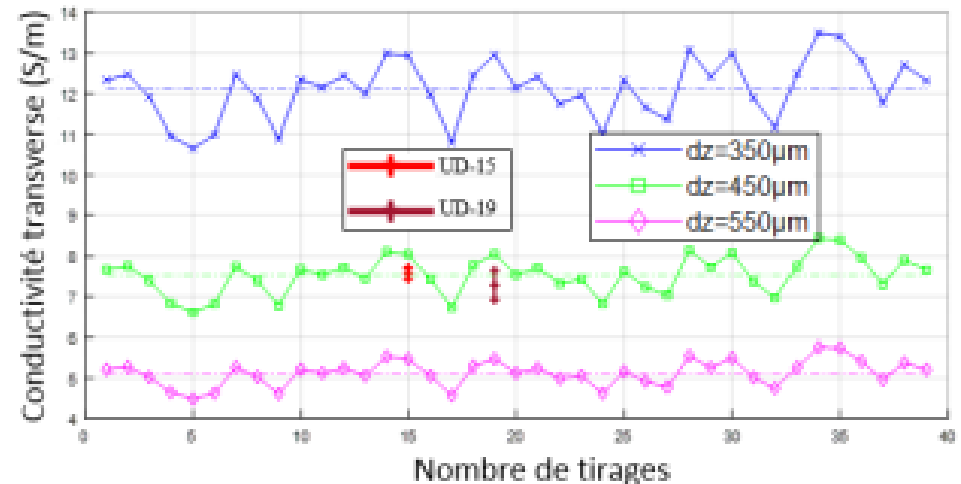
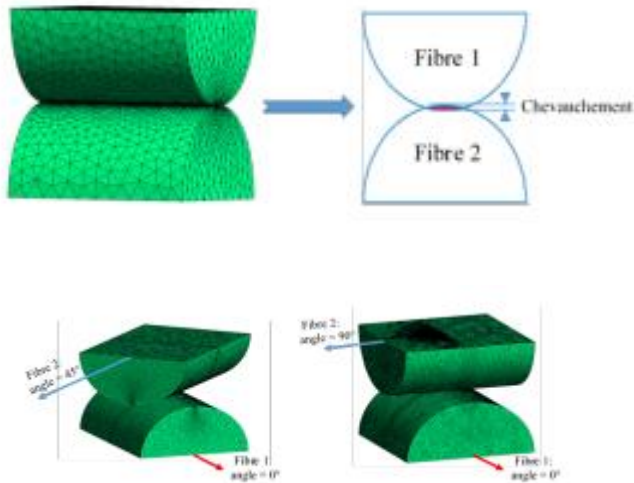
Objectif : Conserver la fréquence du champ global

Echelle microscopique



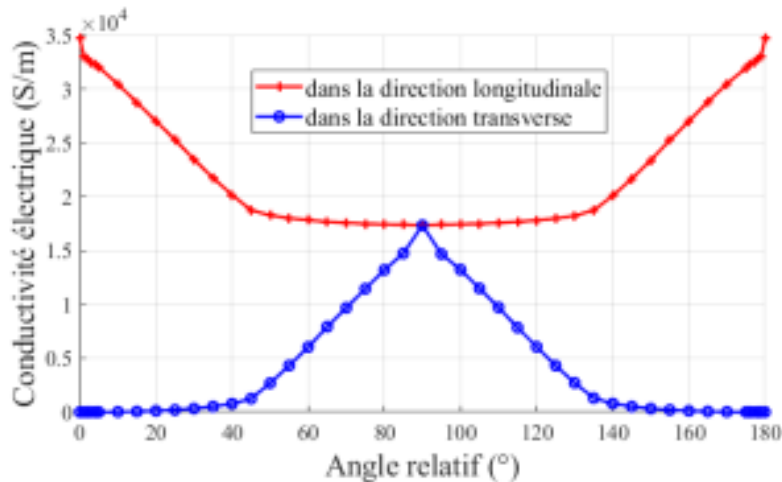
Echelle microscopique : dans le pli

- Paramètres du modèle microscopique :
 - Taux de remplissage, diamètre fibre : Coupe micrographique
 - Résistance de contact : Modèle EF
 - Dimension de la cellule : Etude statistique (loi de Student)
 - Période d'ondulation des fibres : Essai volt-ampéremétrique



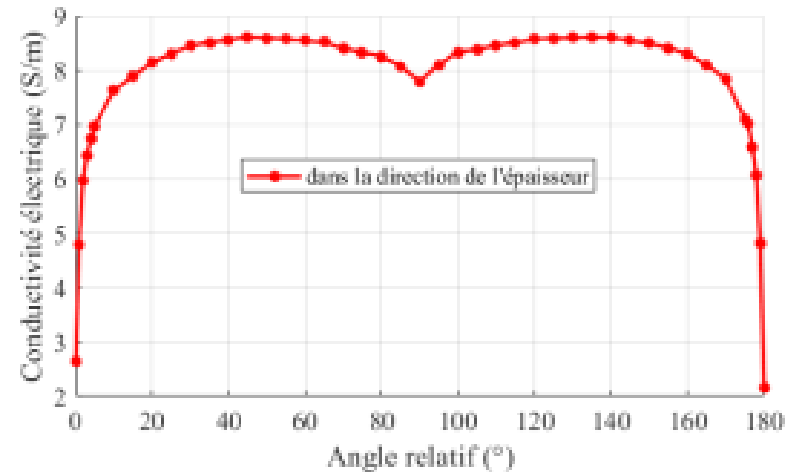
Echelle microscopique : Effet interpli

Longitudinale et Transverse



- 0° - 45° : Un seul pli
- 45°-90° : « Connexion » du seul pli

Epaisseur



	0/0	0/45	0/90
σ_z (S/m)	2,46±0,40	8,74±0,25	7,71±0,22
Nb contacts	24±4	4519±266	6490±319

Echelle microscopique

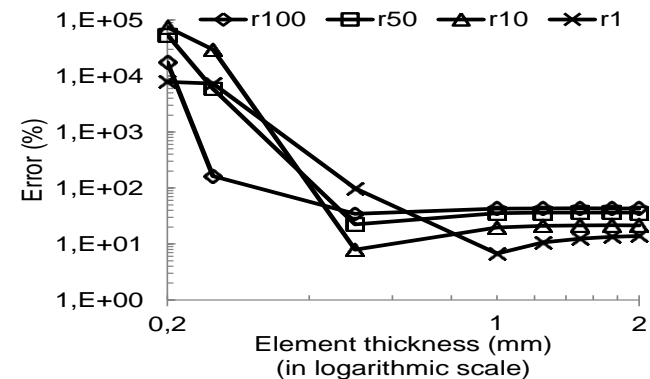
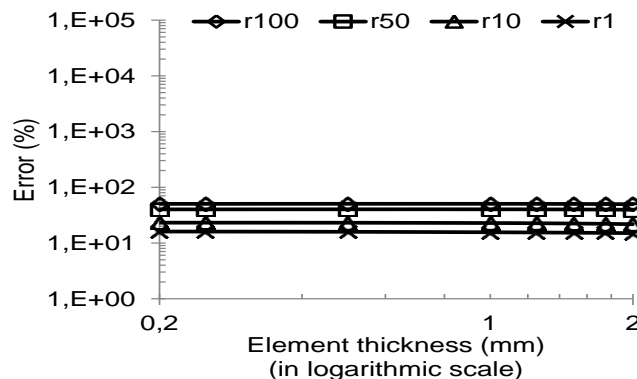
- Validation par mesure volt-ampéremétrique

		σ (S/m)		σ_{\perp} (S/m)		σ_z (S/m)	
		Mesurée	Calculée	Mesurée	Calculée	Mesurée	Calculée
Plan de drapage	UD-7	32732 ± 1743	34724 $\pm 0,81$	8,63 $\pm 0,14$	7,25 $\pm 0,09$	1,68 $\pm 0,06$	1,40 $\pm 0,12$
	UD-19	35062 ± 872	34724 $\pm 0,37$	7,29 $\pm 0,52$	7,27 $\pm 0,06$	1,46 $\pm 0,21$	1,28 $\pm 0,08$
	QI-11	Non Mesurées				3,16 $\pm 0,14$	4,27 $\pm 0,32$
	QI-19					2,56 $\pm 0,042$	3,07 $\pm 0,25$

→ Modèle Macroscopique

Echelle macroscopique

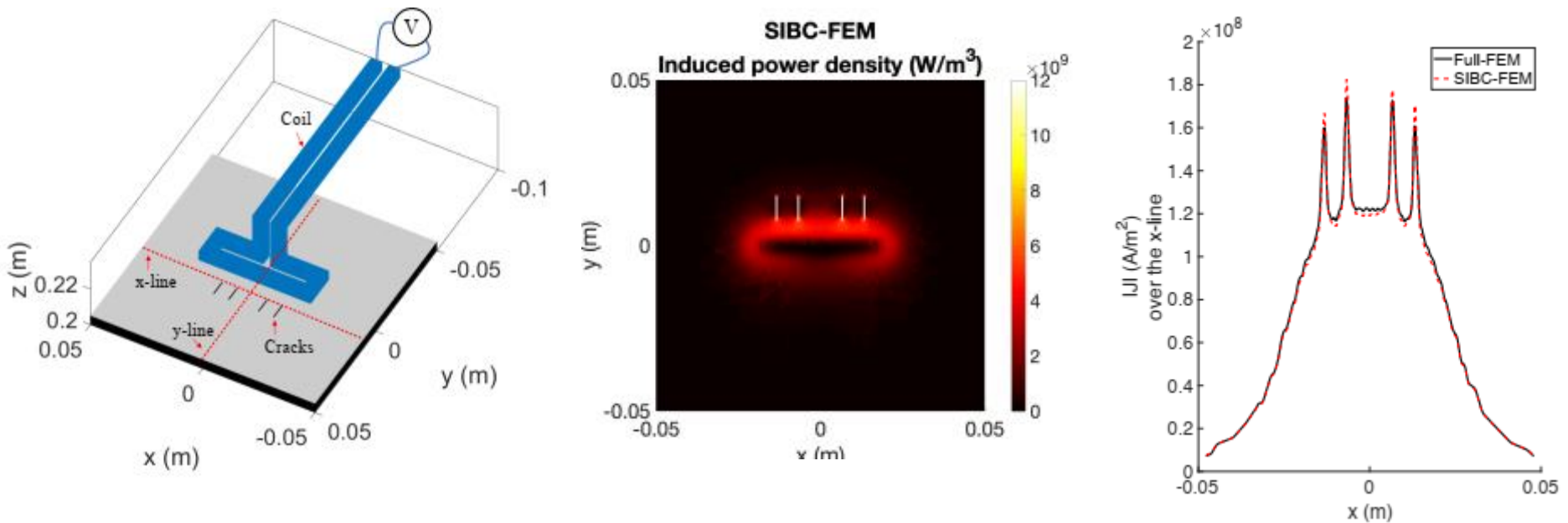
- Modèle EF 3D magnéto-thermique
 - Résolution magnétique : Formulation $A-\varphi$ ou $T-\Omega$
→ Puissance de chauffe
 - Résolution thermique
- Faible épaisseur des plis et anisotropie :
 - Eléments hexaédrique :



- Eléments dégénérés de Whitney

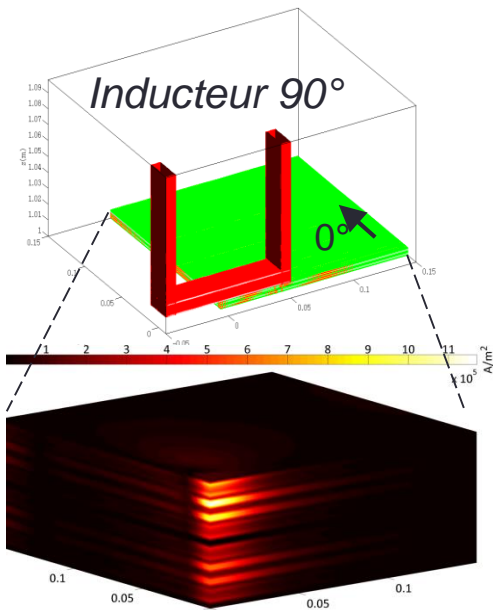
Echelle macroscopique

- Prise en compte réaction induit sur inducteur :
 - Maillage de l'inducteur → Augmentation du temps de résolution
 - Impédances de surface (SIBC) : 3D → 2D

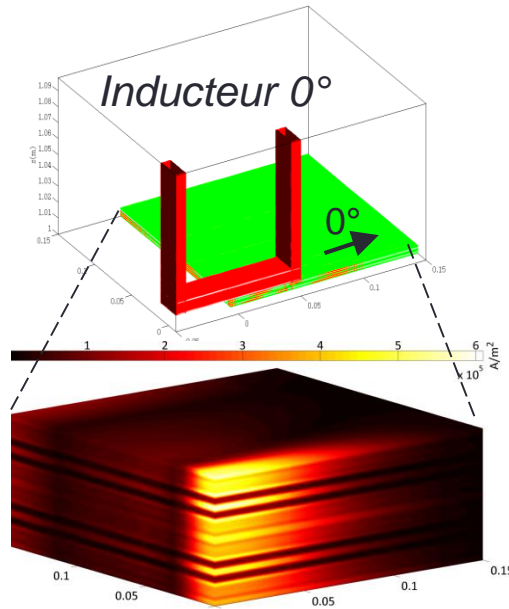


	Full FEM	SIBC-FEM
Durée inversion (s)	3374	508

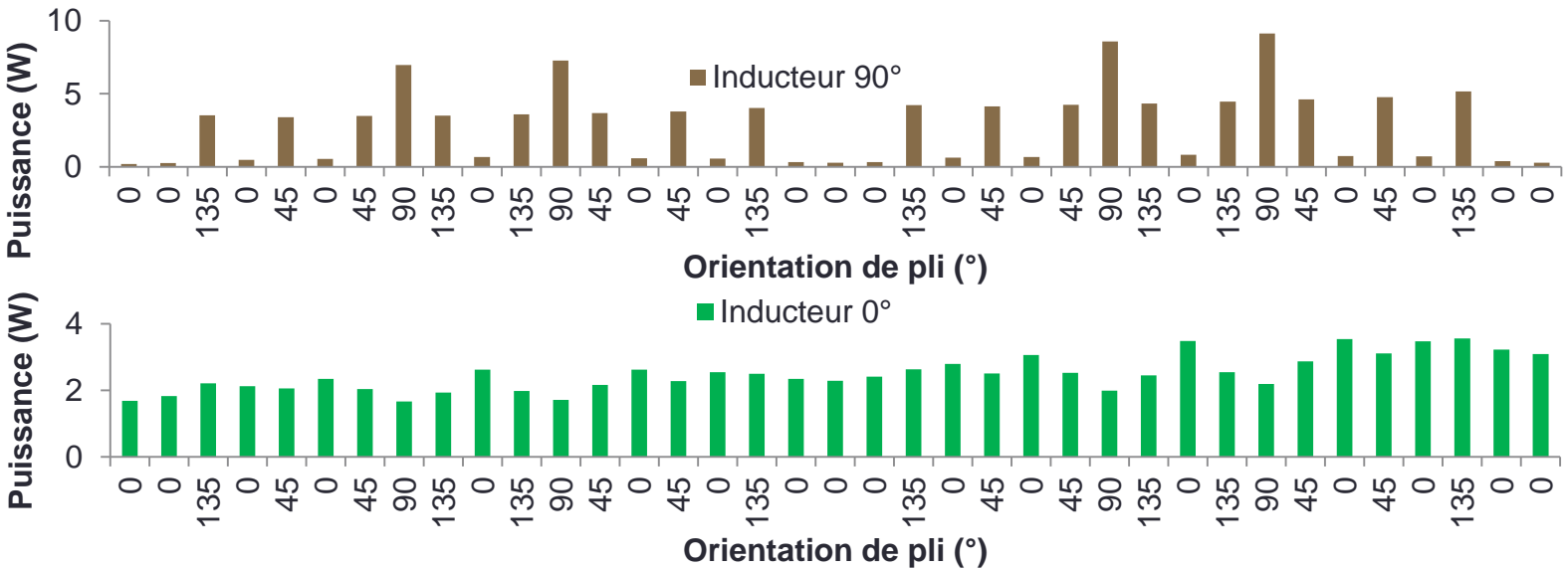
Validation



1 quart de la plaque



1 quart de la plaque

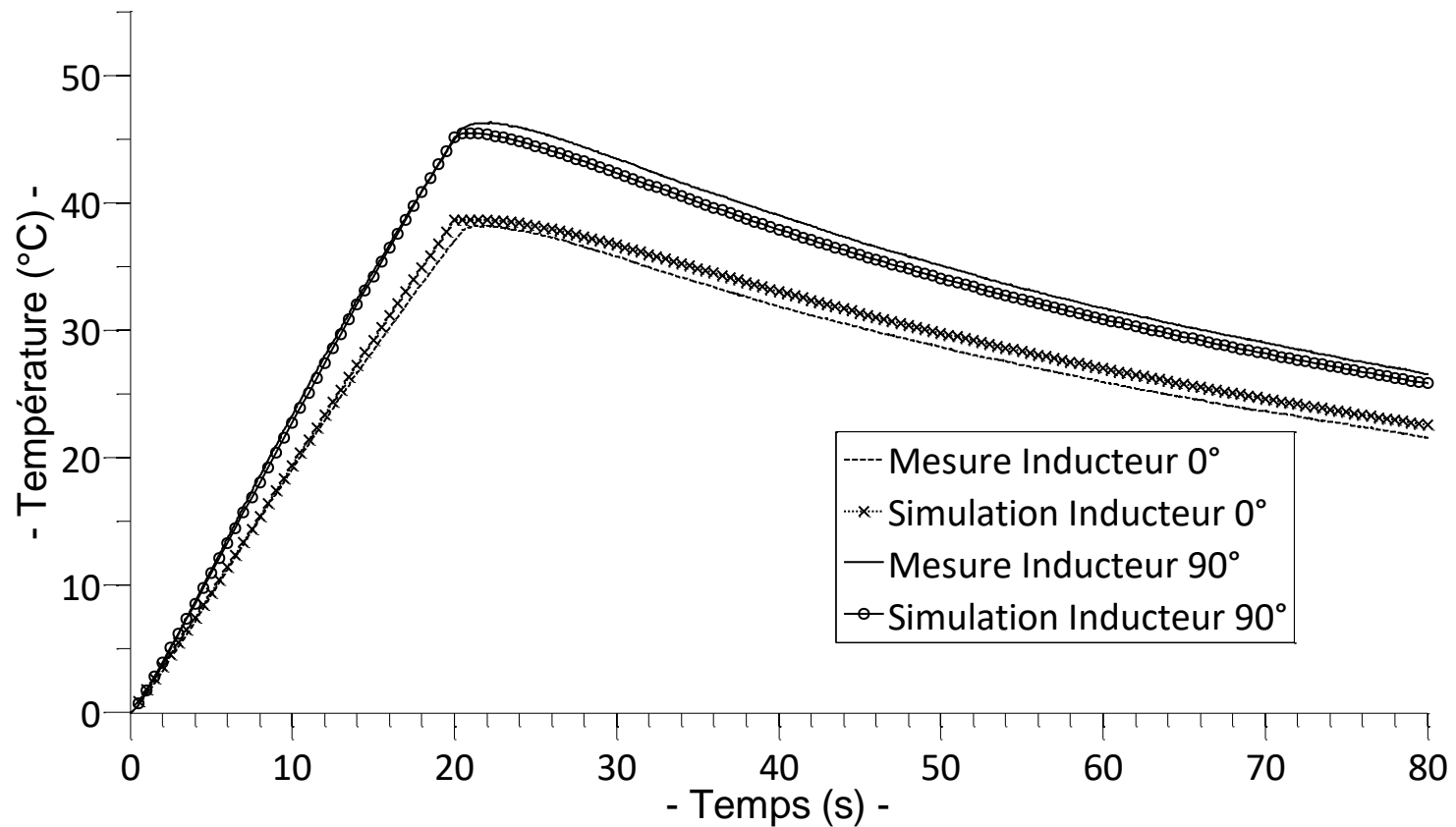


Côté inducteur

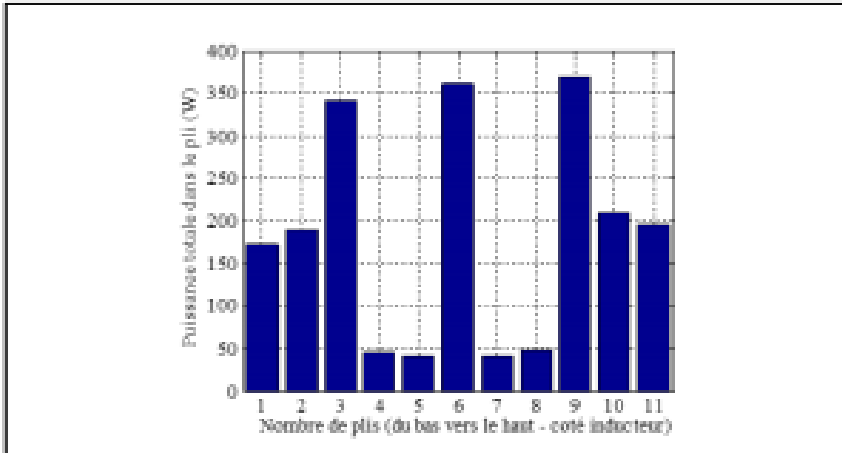
Côté inducteur

Validation

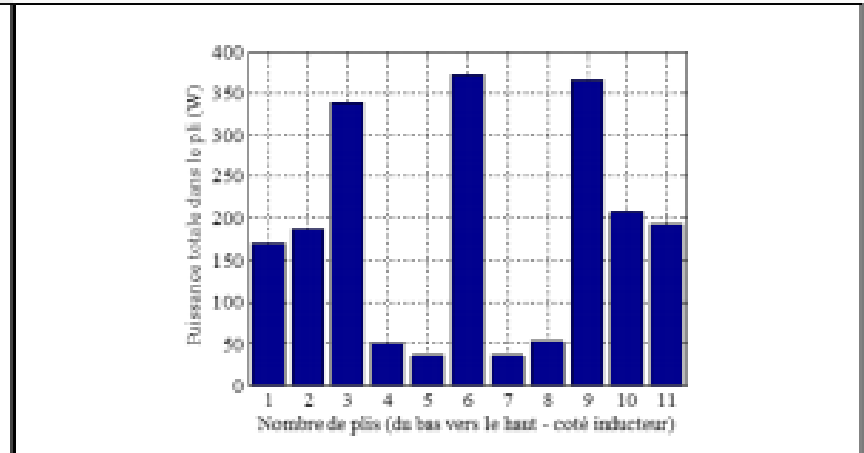
- Au centre de la plaque



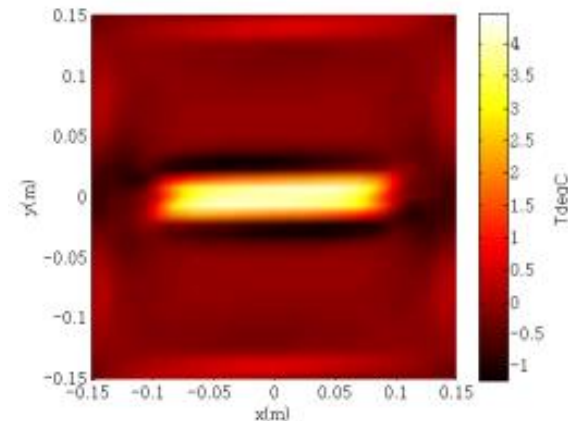
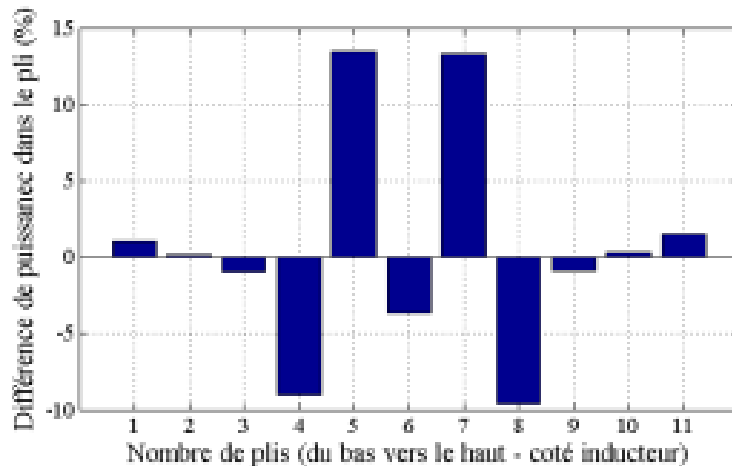
Influence des contacts interplis



Sans prise en compte
 $P_{induite} = 2,015kW$



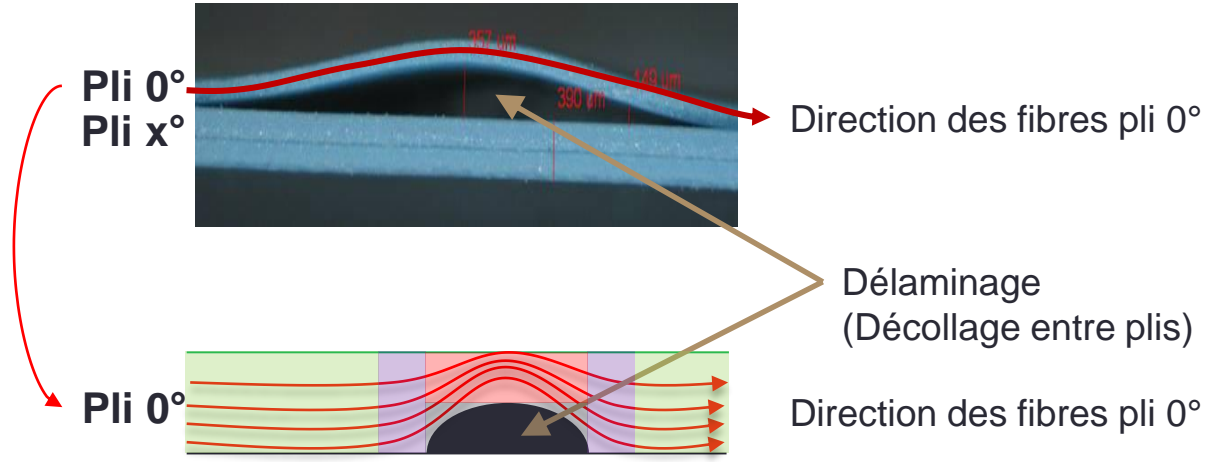
Avec prise en compte
 $P_{induite} = 2,012kW$



Différence pour $T_{max} = 400^{\circ}C$

Intégration d'un délaminage

Simplification de la géométrie



Même que le pli 0°

Permettre aux courants de contourner

Conserver la résistance électrique

$$\begin{bmatrix} \sigma_{||} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

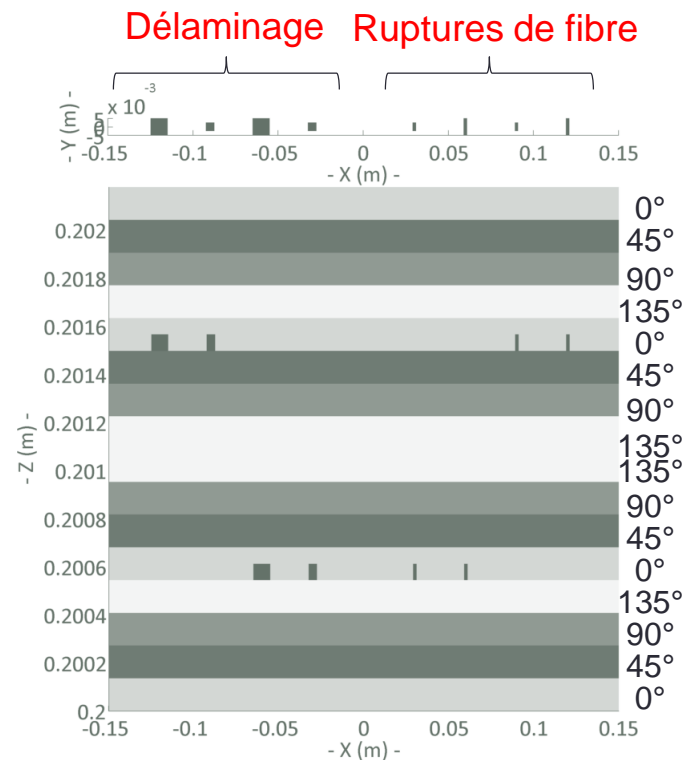
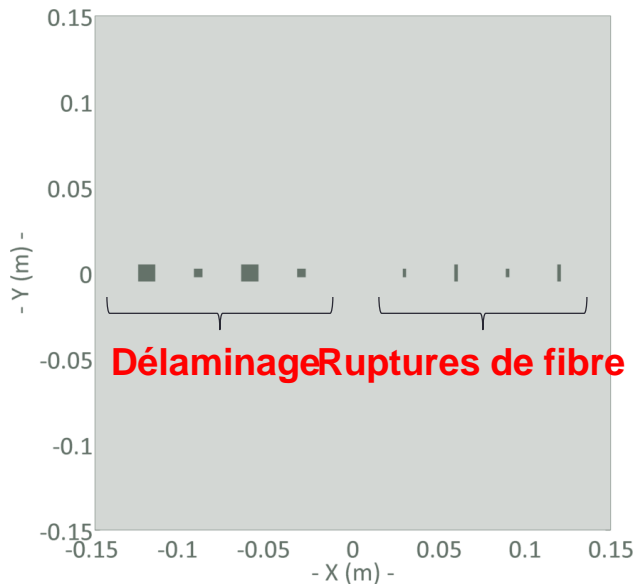
$$\begin{bmatrix} \sigma_{||} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{||} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x * \sigma_{||} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

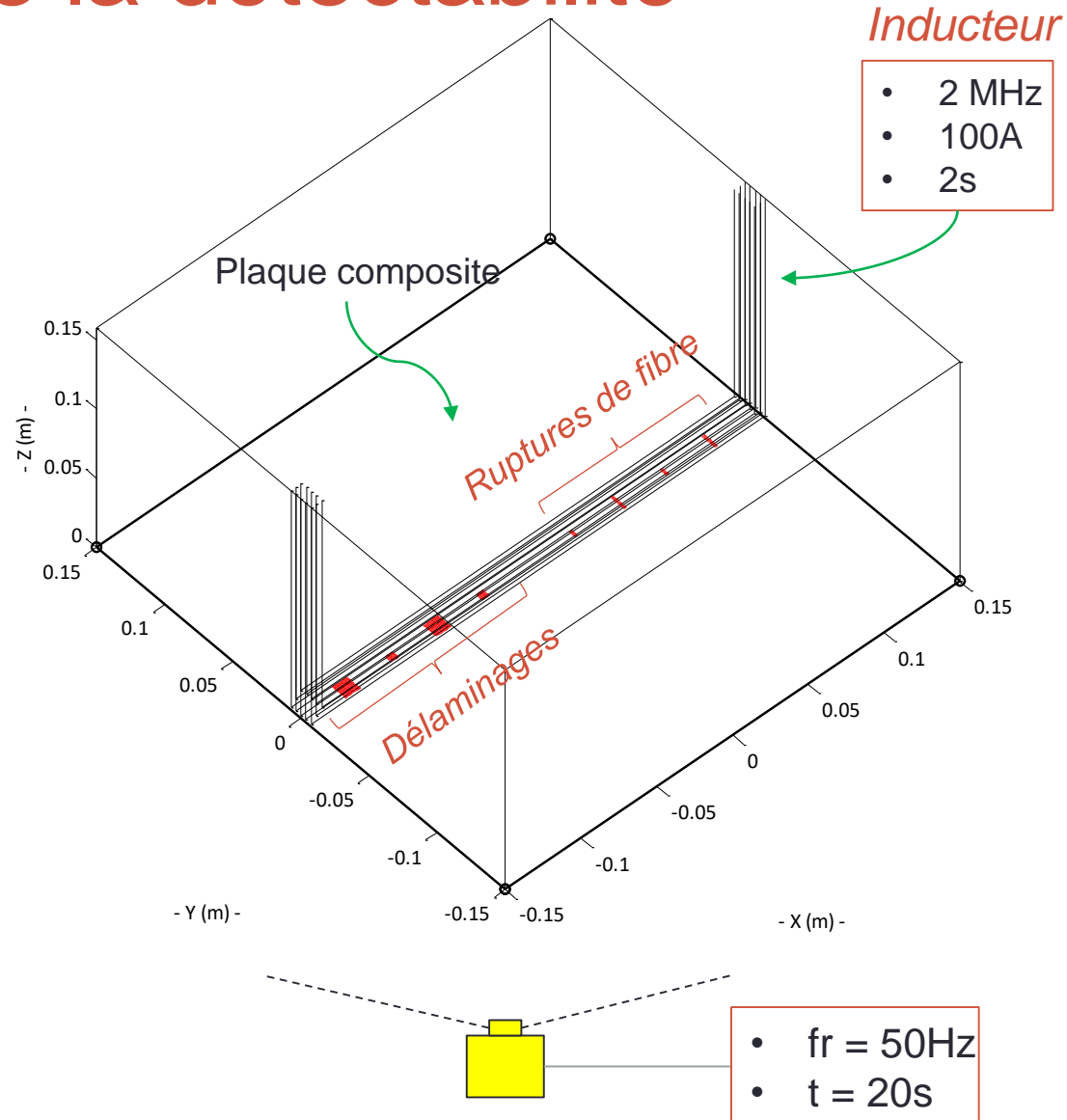
Etude de la détectabilité

- Défauts :
 - Rupture de fibres : difficulté de détection avec thermographie ;
 - Délainage : difficulté de détection avec courants induits.

- Plaque 16 plis avec 8 défauts :

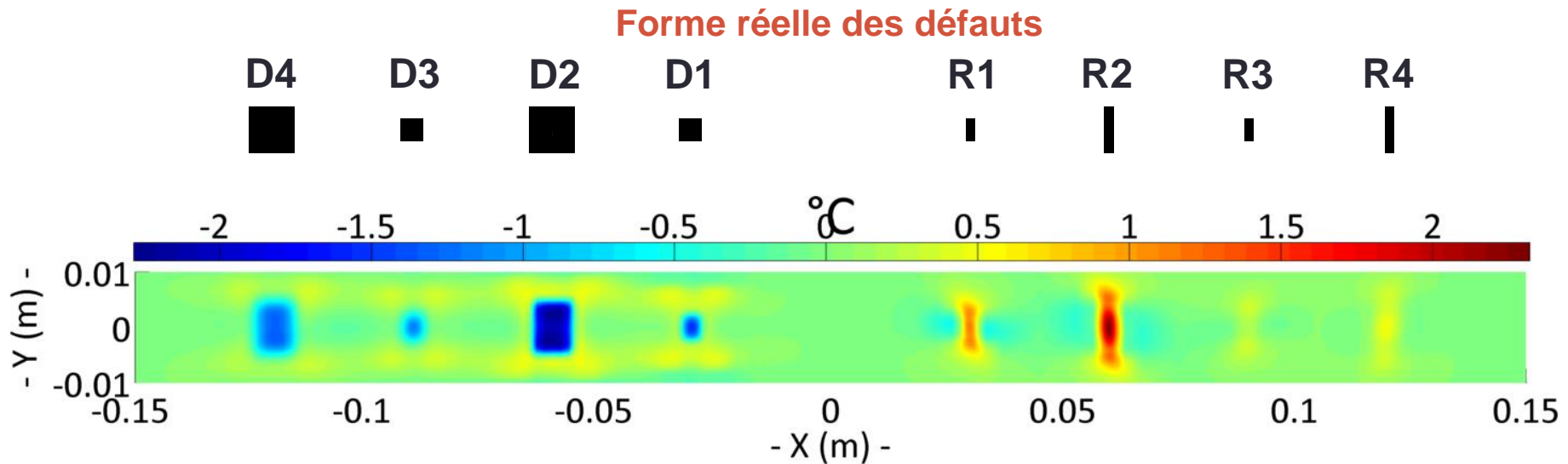


Etude de la détectabilité



Etude de la détectabilité

- Contraste absolu : $C_a(x, y, t) = t_d(x, y, t) - t_s(x, y, t)$

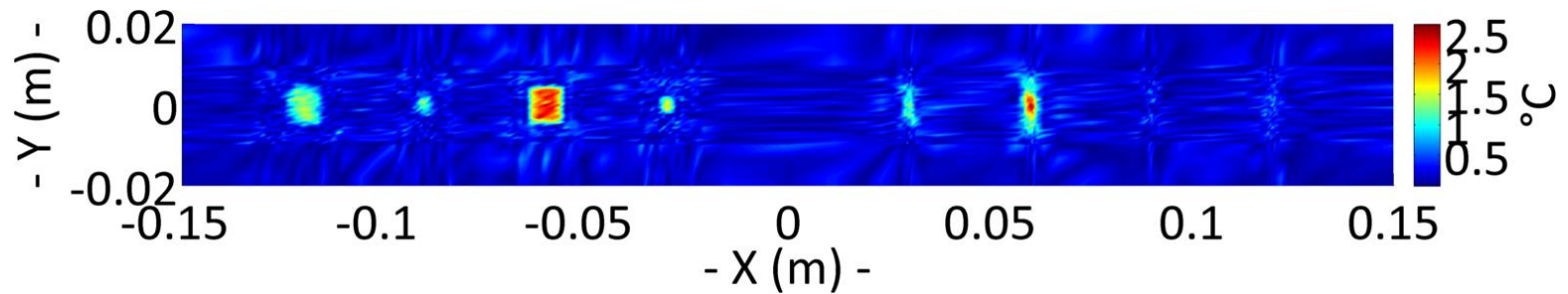


Cartographie C^a thermo – inductive à t = 2s

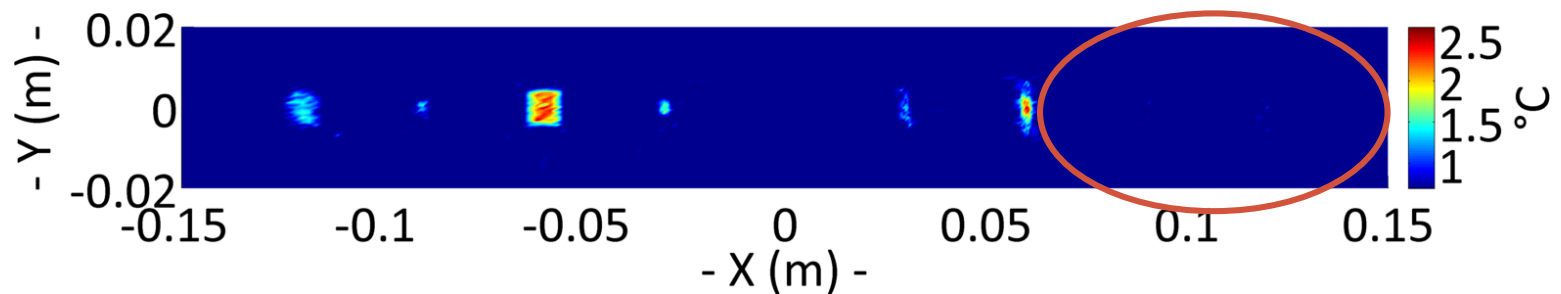
- $C_a > 0$ pour rupture de fibre
- $C_a < 0$ pour délaminage

Etude de la détectabilité

- Ajout du bruit

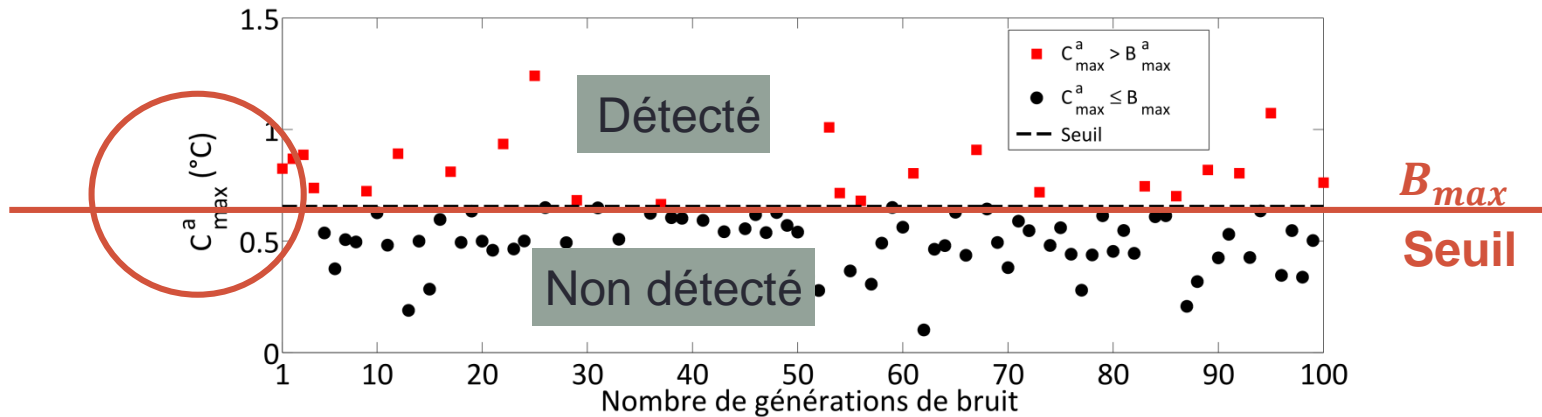


- Seuillage



Etude de la détectabilité

- Probabilité de Détection (PoD)



ϵ	PoD (%)							
	D4	D3	D2	D1	R1	R2	R3	R4
0.20°C	79	54	95	83	1	8	0	0

8 fois détectées/100 tests

Etude de la détectabilité

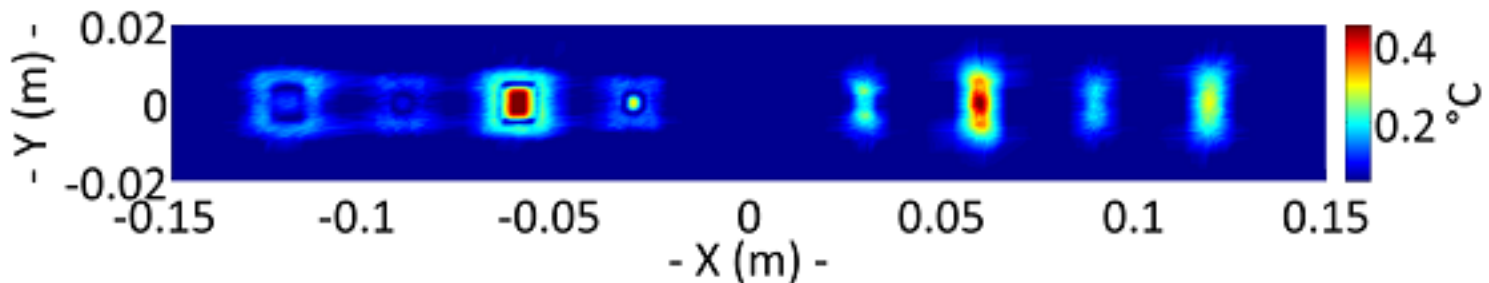
- Autres contrastes :

ϵ	D4	D3	D2	D1	R1	R2	R3	R4
0.20°C	100	100	100	100	53	100	100	100

C_{amp} FFT

- Optimisation de paramètres :
 - Temps de chauffe 5s

ϵ	D4	D3	D2	D1	R1	R2	R3	R4
0.20°C	100	100	100	100	53	100	100	100



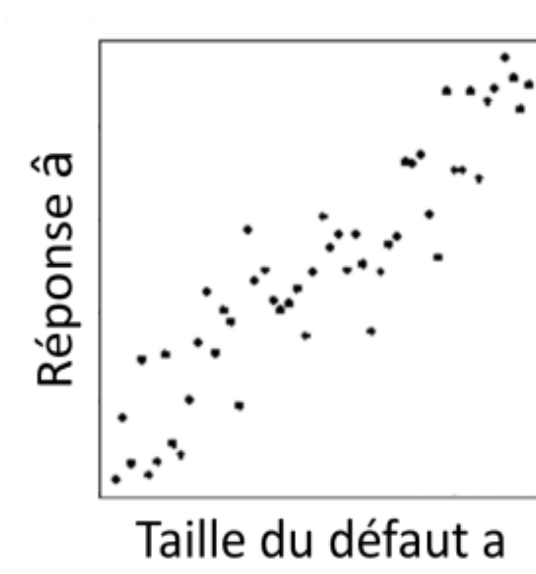
Récapitulatif

- Compréhension plus fine des phénomènes physiques dans les composites ;
- Mise en place d'un modèle pour obtenir la réponse thermique ;
- Outils d'étude de performance de la technique thermo-inductive.

SUITE

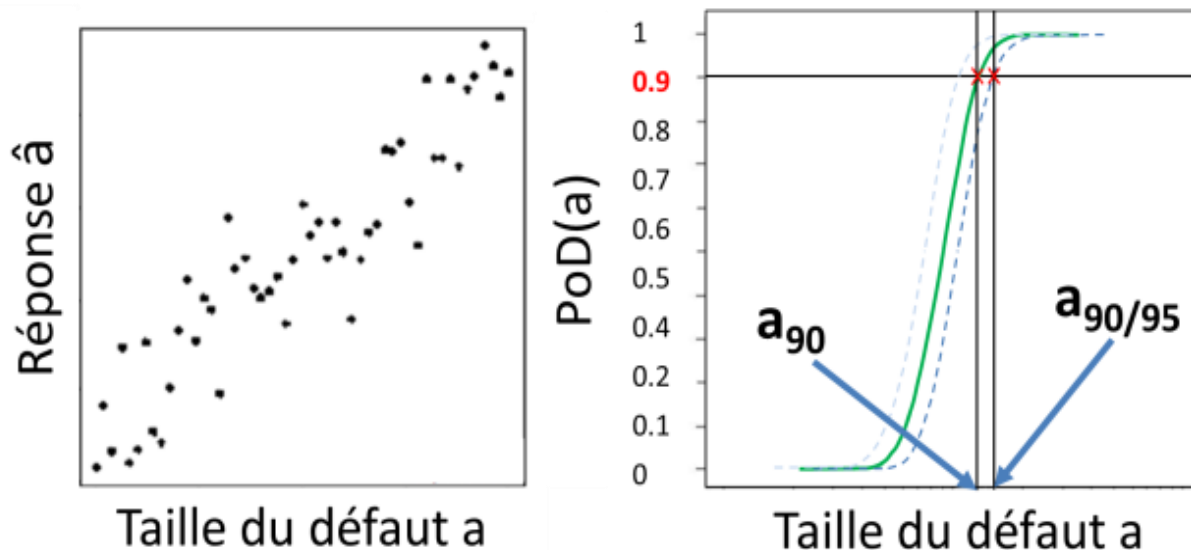
Principe de la MAPOD

- Etude paramétrique :
 - Paramètre caractéristique : taille du défaut ;
 - Paramètres influents : entraînent une incertitude.



Principe de la procédure PoD

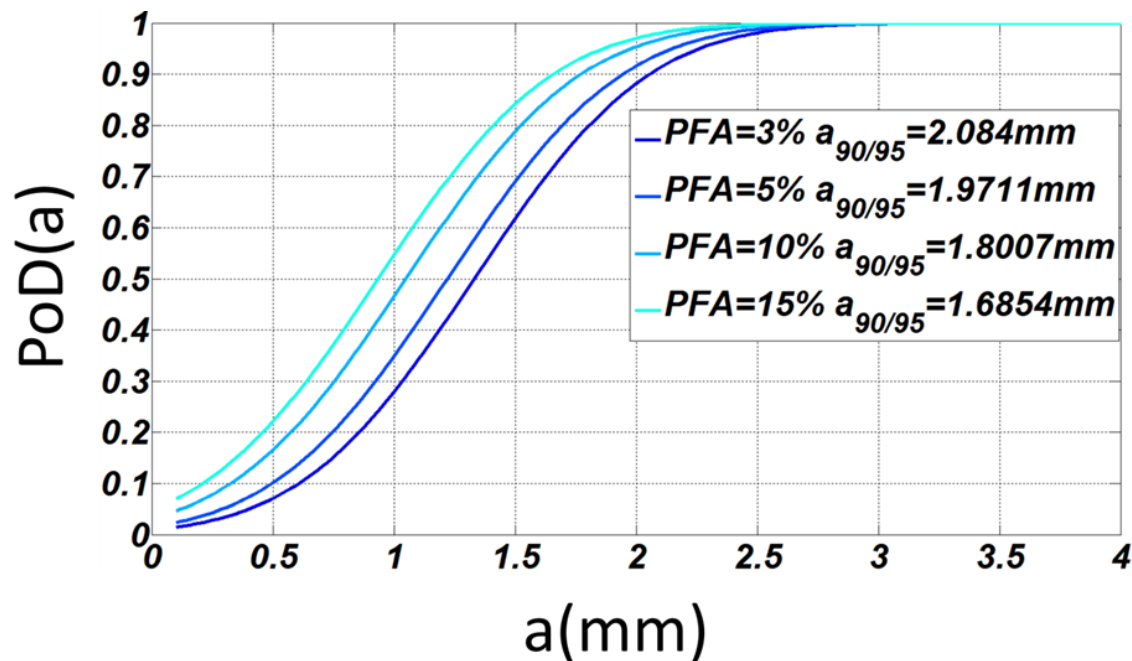
- Etude paramétrique :
 - Paramètre caractéristique : taille du défaut ;
 - Paramètres influents : entraînent une incertitude.



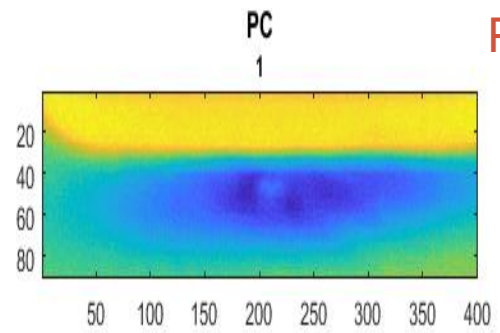
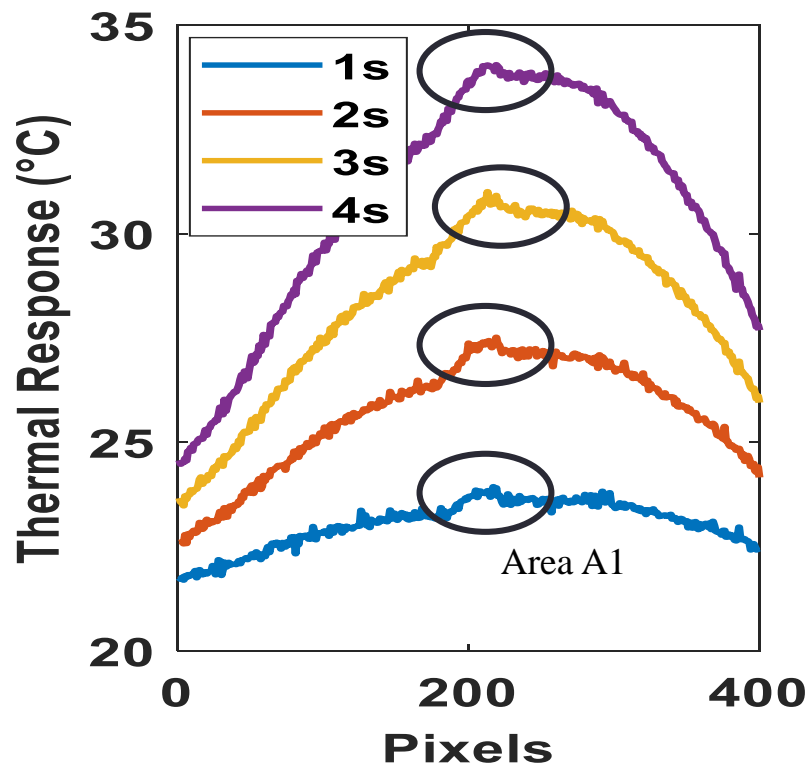
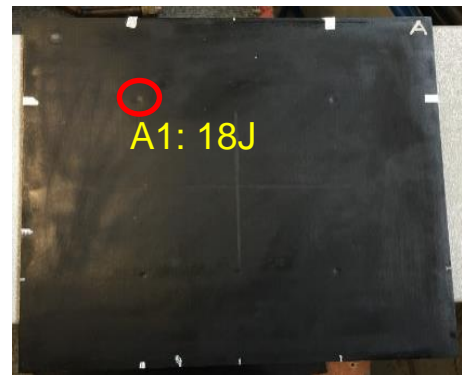
- a_{90} : taille du défaut pour avoir 90% de probabilité de détection ;
- $a_{90/95}$: taille du défaut avec 95% de chance d'avoir une probabilité de détection de 90%

MAPoD

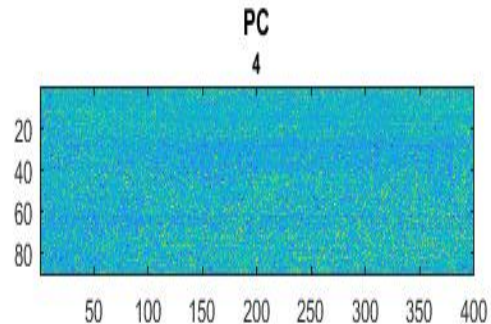
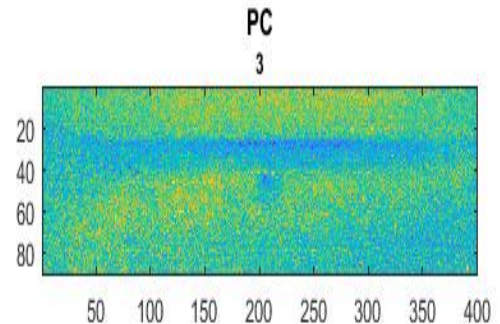
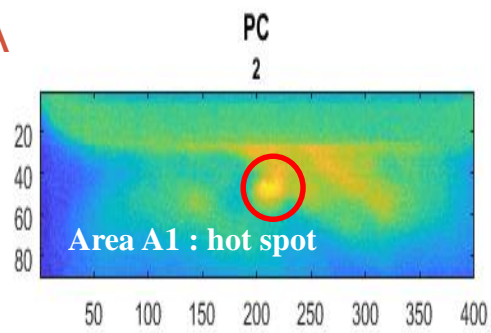
- **Model Assisted PoD**
 - Eviter essais expérimentaux coûteux → Utilisation d'un modèle
- Prise en compte de probabilité de fausse alarme



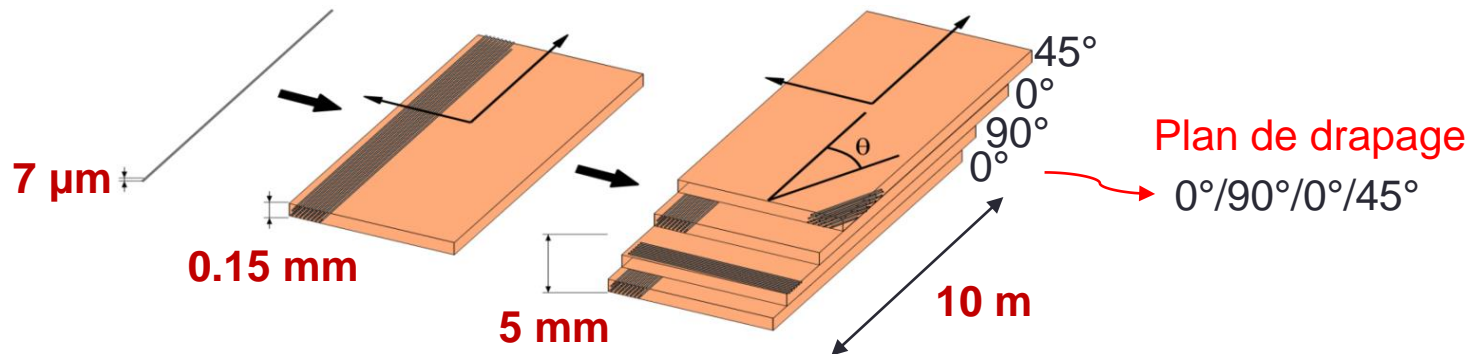
Travaux en cours : A. BA



PCA



Travaux en cours : Suyang Lou



Actuel

Échelle micro

Échelle méso

Échelle macro

Modèle d'homogénéisation avec prise en compte de la percolation électrique

Résolutions EF multi-couche

Objectif

Échelle micro

Échelle macro

Réduction de modèle

Perspectives

- Application procédure MAPoD aux composites ;
- Optimisation de procédé via résultats MAPoD ;
- Utilisation de MOR pour MAPoD ;
- Meilleure intégration des phénomènes interplis dans les modèles macroscopiques ;
- Process Monitoring ;
- Travail expérimental avec défauts :
 - Smart Equipage
- Travail sur signature thermique :
 - Suppression du contraste
 - Virtual wave : RECENDT (Autriche)

Pistes de collaboration

- Mise en place d'une plateforme de caractérisation électrique de matériaux :
 - Bon de commande édités ;
 - Propriétés en fonction de la température ;
 - Cartographie 2D.
- Compétence en modélisation de phénomène EM :
 - Modèle numérique, analytique, Réduction du modèle
- Homogénéisation sur structure complexe :
 - Composite fibre de carbones UD et tissé ;
 - Poudre de fer