

Essais instrumentés pour matériaux composites

Libor Navratil

Ingénieur M&P, Safran Composites

07/12/2023



Plan

1. Suivi optique de l'endommagement dans les composites stratifiés [1], [2]

- **Protocole expérimental**
- **Méthode de détection automatique de fissures**
- **Conclusions & Perspectives**



2. Apports des mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique sur Tissés 3D

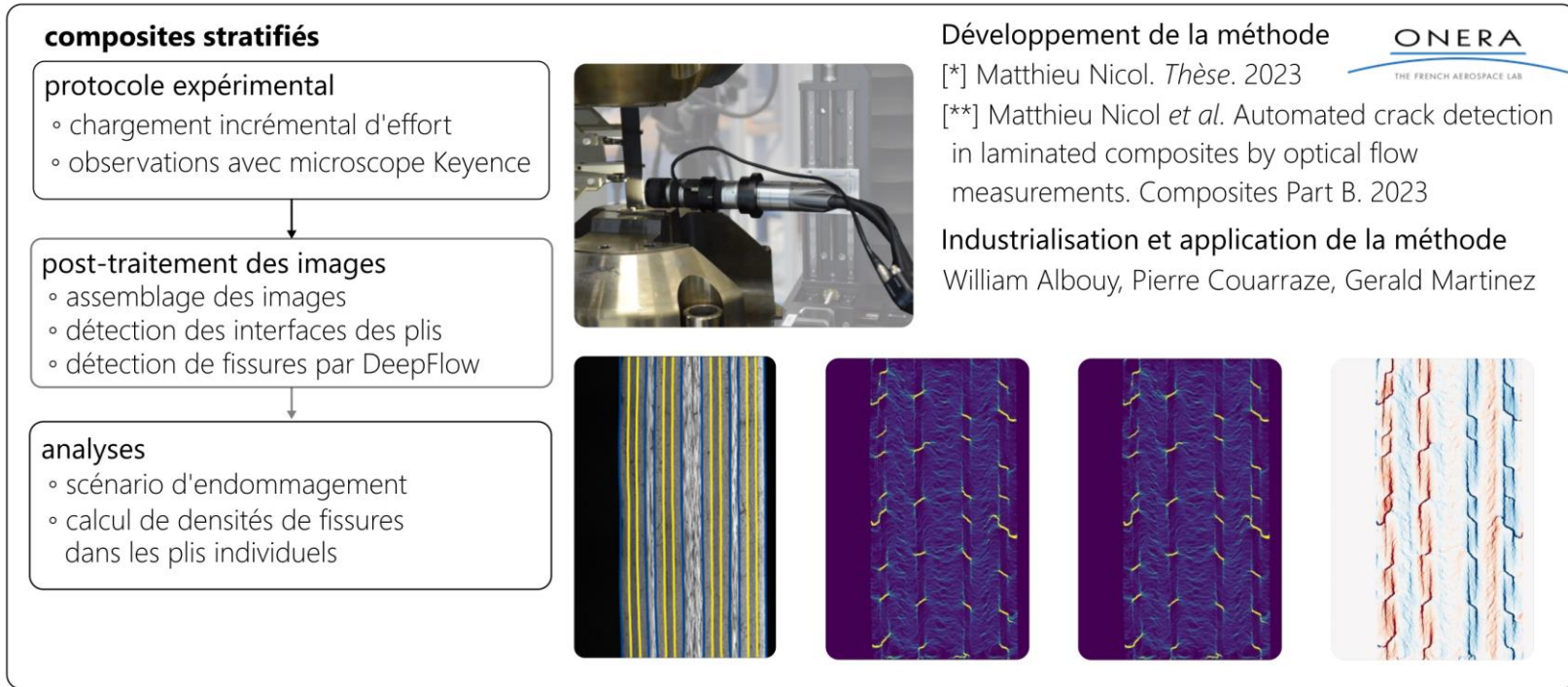
- **Protocole expérimental**
- **Analyses liées à la caractérisation thermomécanique et à la prédiction des propriétés en fatigue**
- **Conclusions & Perspectives**



[1] Matthieu Nicol. *Compréhension et modélisation de l'influence de l'ordre d'empilement sur les scénarios d'endommagement dans des composites stratifiés de plis unidirectionnels*. Thèse de doctorat. 2023

[2] Matthieu Nicol *et al.* *Automated crack detection in laminated composites by optical flow measurements*. Composites Part B: Engineering. 2023

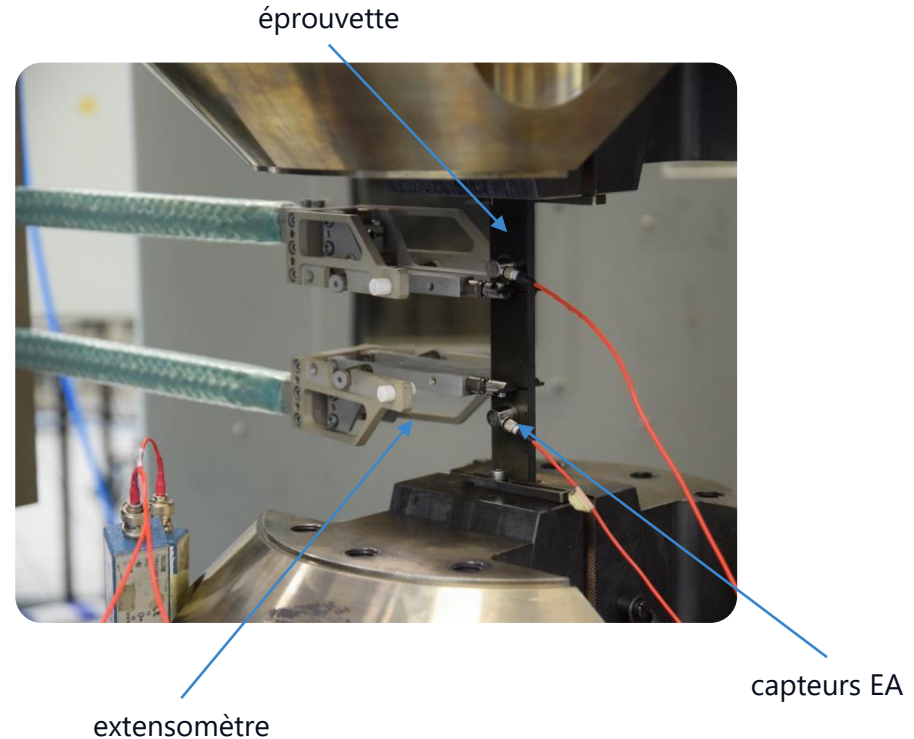
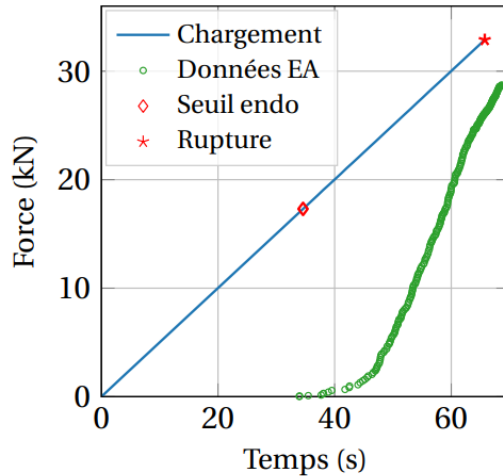
1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés



1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

1. Essai de traction monotone préliminaire

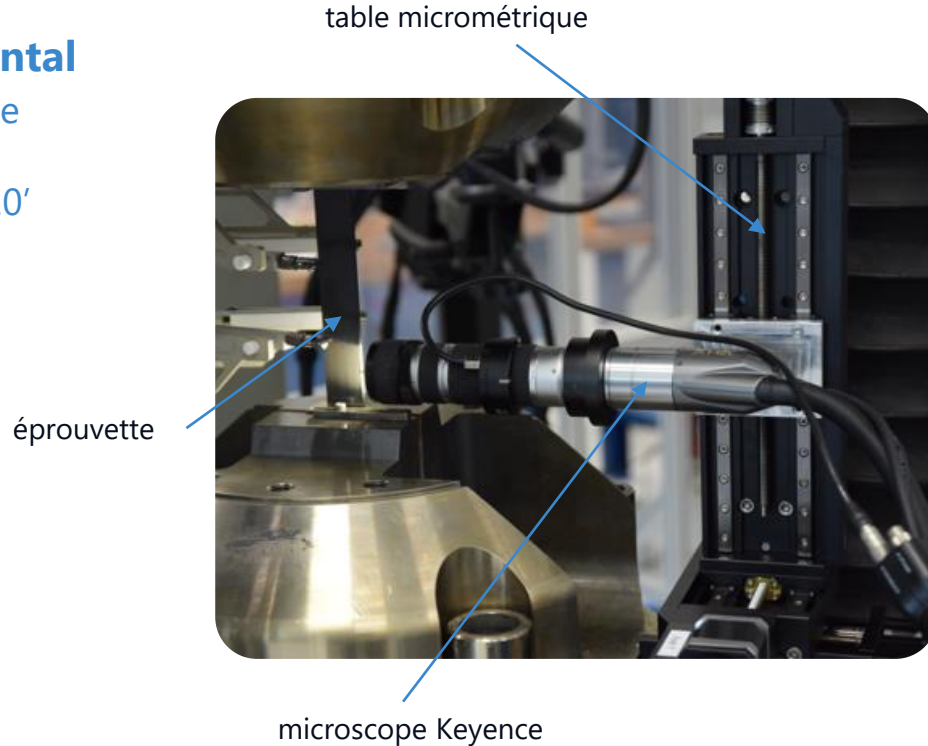
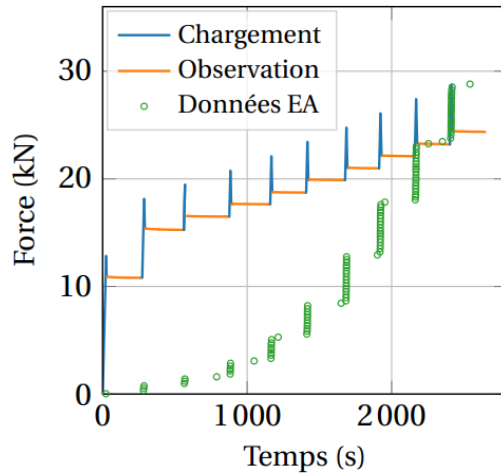
- Contrainte au premier endommagement
- Contrainte à rupture



1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

2. Essai de chargement incrémental

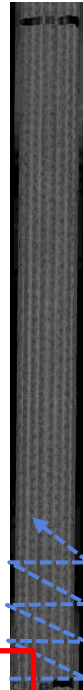
- Paliers d'observation pour suivi de l'endommagement
- 96 imageries/palier (527Mo) → 20'



1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

Le pilotage de la table est assuré par le logiciel de la machine, TestXpert (à l'aide du langage ZIMT)

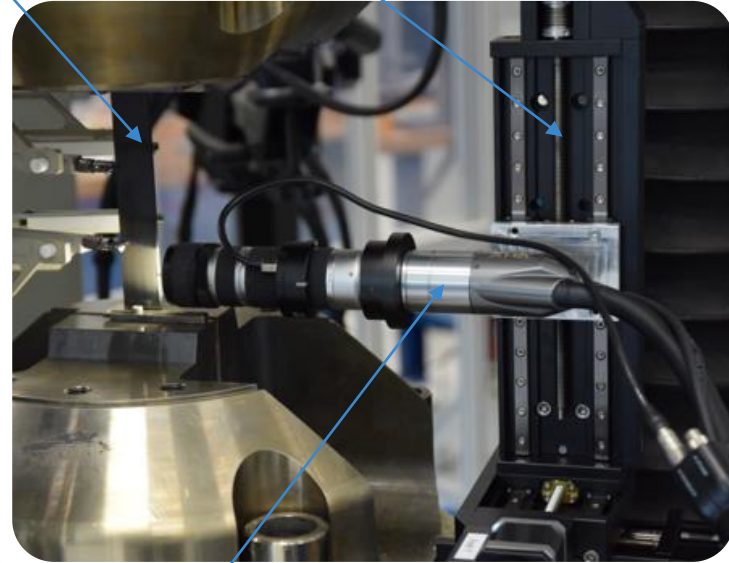
champ du microscope



trajectoire du microscope

éprouvette

table micrométrique

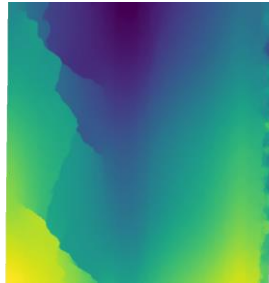
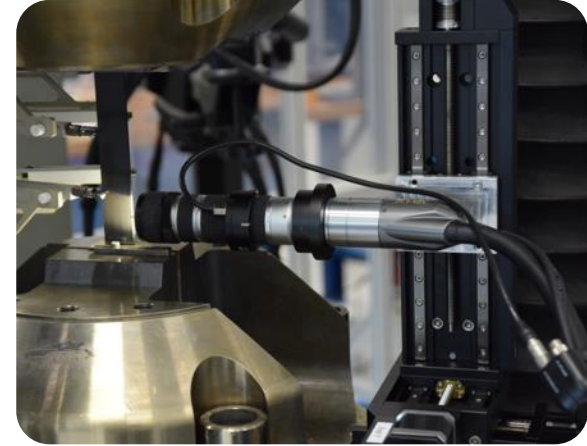
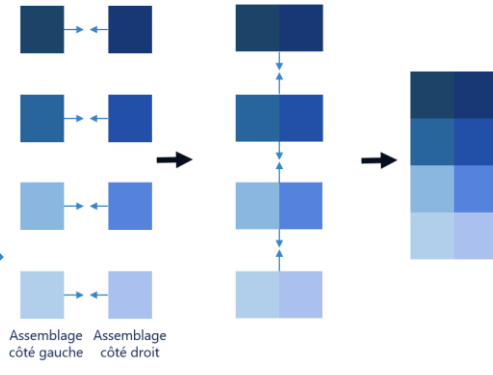


microscope Keyence

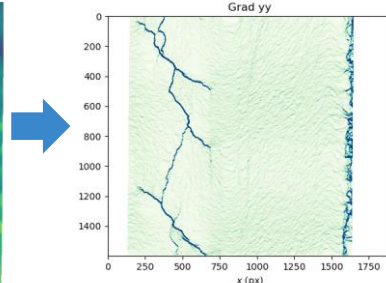
mise au point

1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

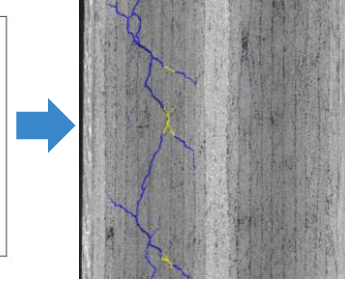
■ Stratégie : assemblage horizontal puis vertical



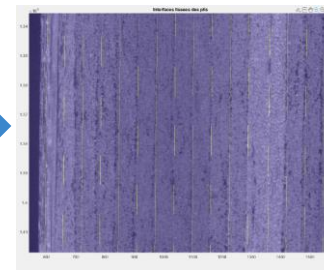
résultat DeepFlow



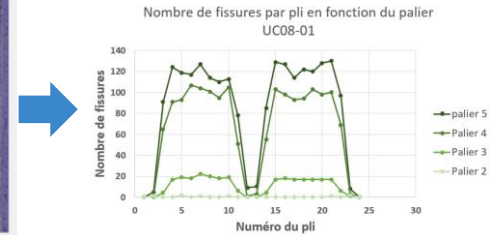
déformation verticale



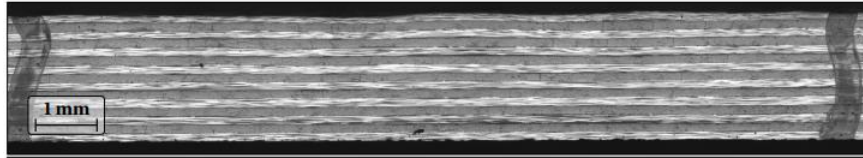
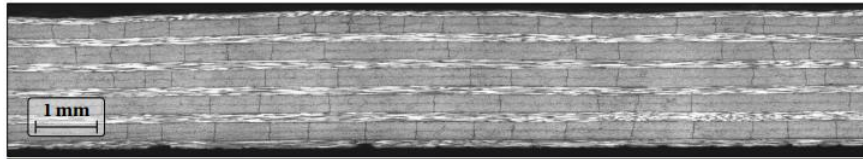
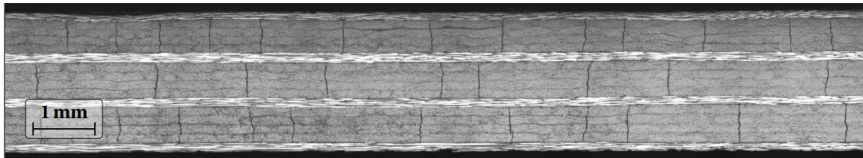
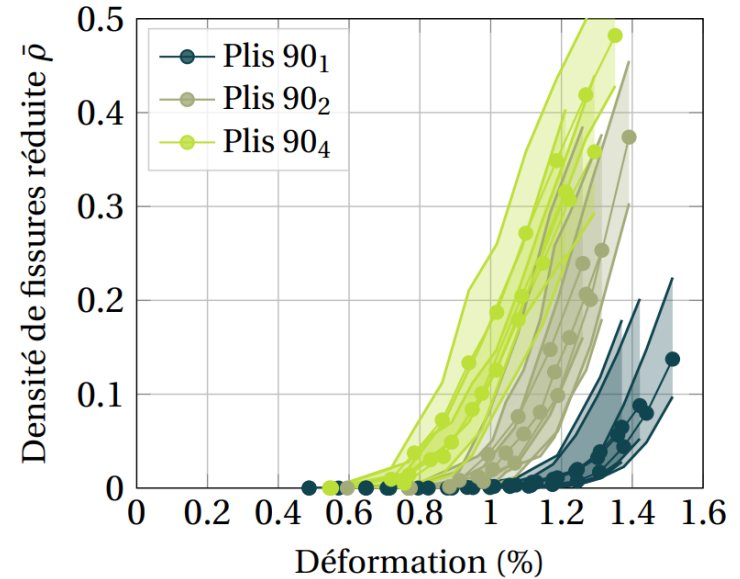
superposition sur image reconstruite



interfaces au milieu de l'éprouvette pour comptage



1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

croisé plis simples $[(0/90)_3/0/90_{1/2}]_s$ croisé plis doubles $[(0/90_2)_2/0/90]_s$ croisé plis épais $[0/90_4/0/90_2]_s$ 

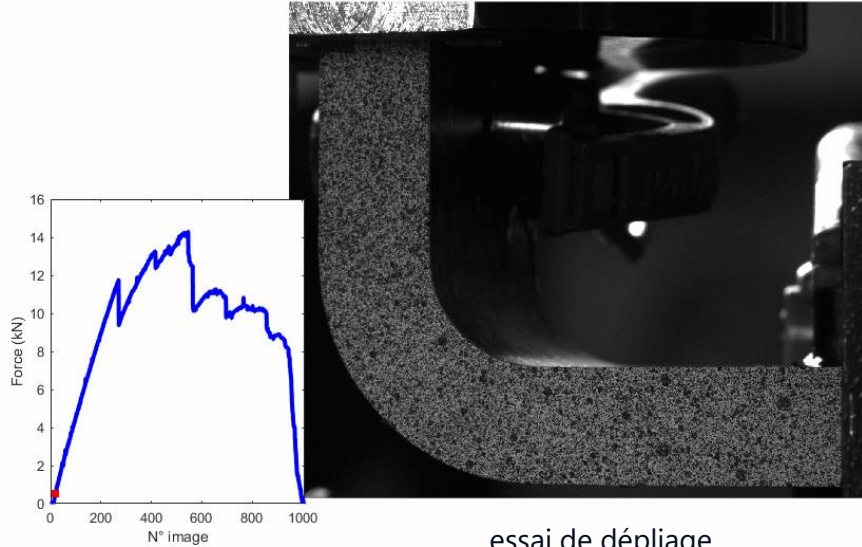
[1] Matthieu Nicol. *Compréhension et modélisation de l'influence de l'ordre d'empilement sur les scénarios d'endommagement dans des composites stratifiés de plis unidirectionnels*. Thèse de doctorat. 2023

1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

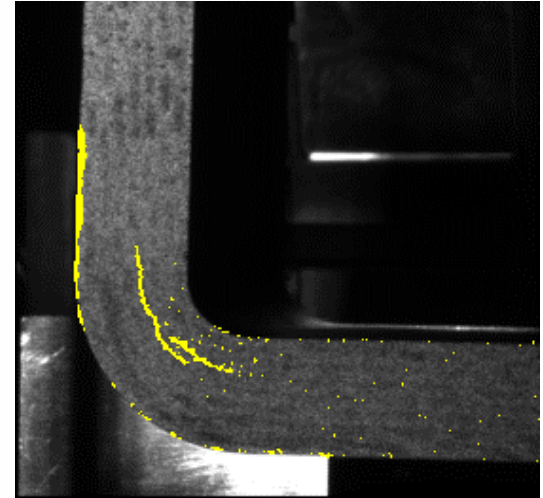
- **Ces travaux permettent :**
 - D'évaluer et de comparer les scénarios d'endommagements pour les différentes stratifications
 - De démontrer l'intérêt pour la fatigue de distinguer les seuils d'endommagement différents malgré des ruptures en statique souvent proches
- **Les seuils d'endommagements doivent être réévalués à 10k UE en émission acoustique pour les stratifiés UD**
- **Limitation :**
 - La profondeur des fissures dans le cœur de l'éprouvette n'est pas connue

1. Suivi optique de l'endommagement dans les stratifiés

- D'autres applications :
 - Mise en évidence de fissures sur des matériaux tissés 3D



essai de dépliage



Plan

1. Suivi optique de l'endommagement dans les composites stratifiés [1], [2]

- Protocole expérimental
- Méthode de détection automatique de fissures
- Conclusions & Perspectives

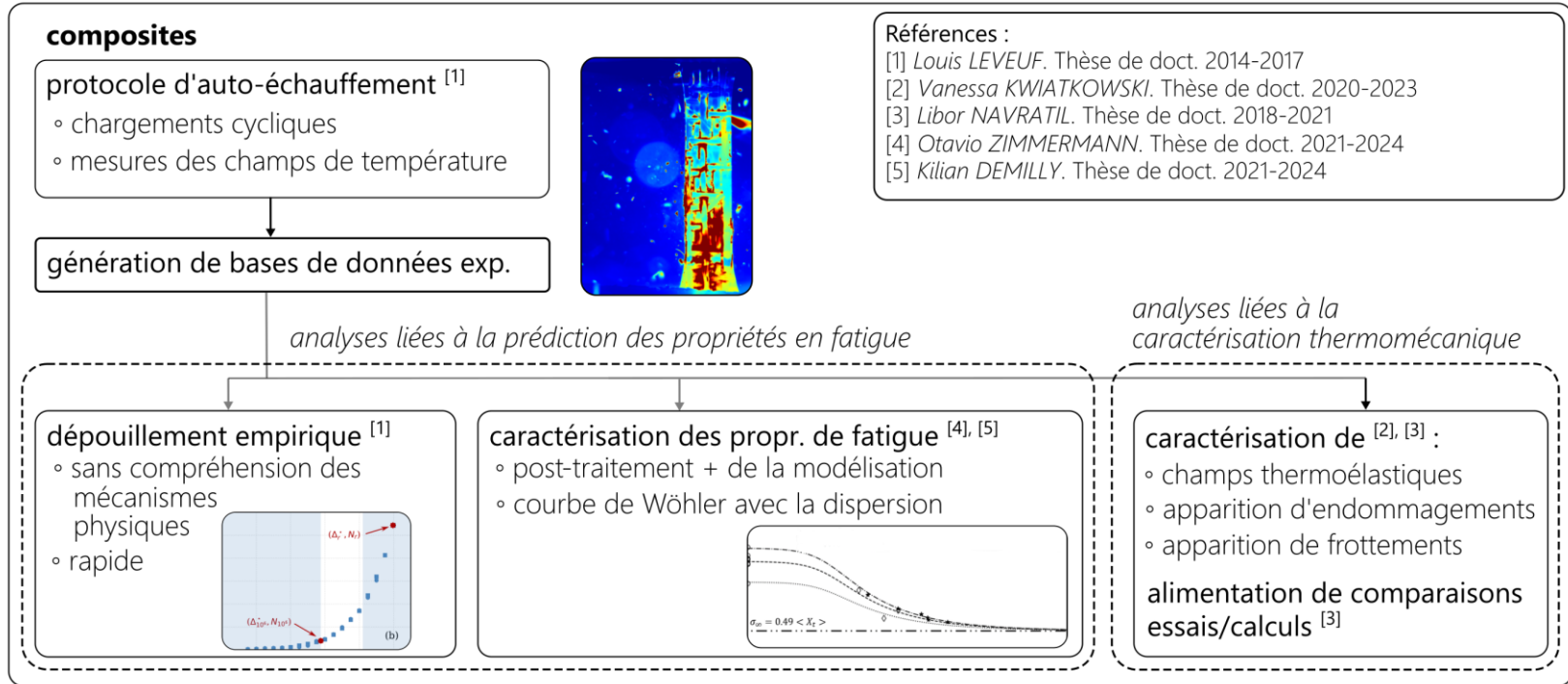


2. Apports des mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique sur Tissés 3D [2]

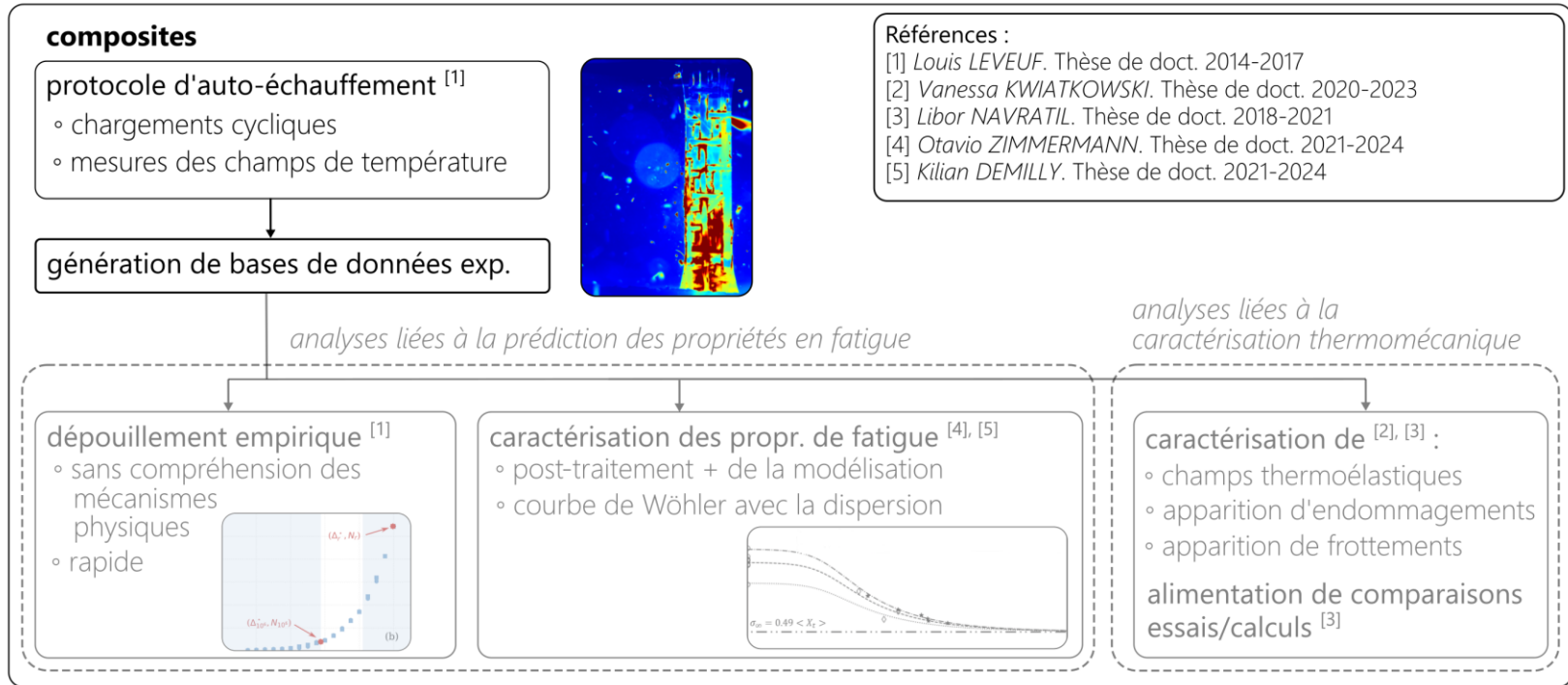
- Protocole expérimental
- Analyses liées à la caractérisation thermomécanique et à la prédiction des propriétés en fatigue
- Conclusions & Perspectives



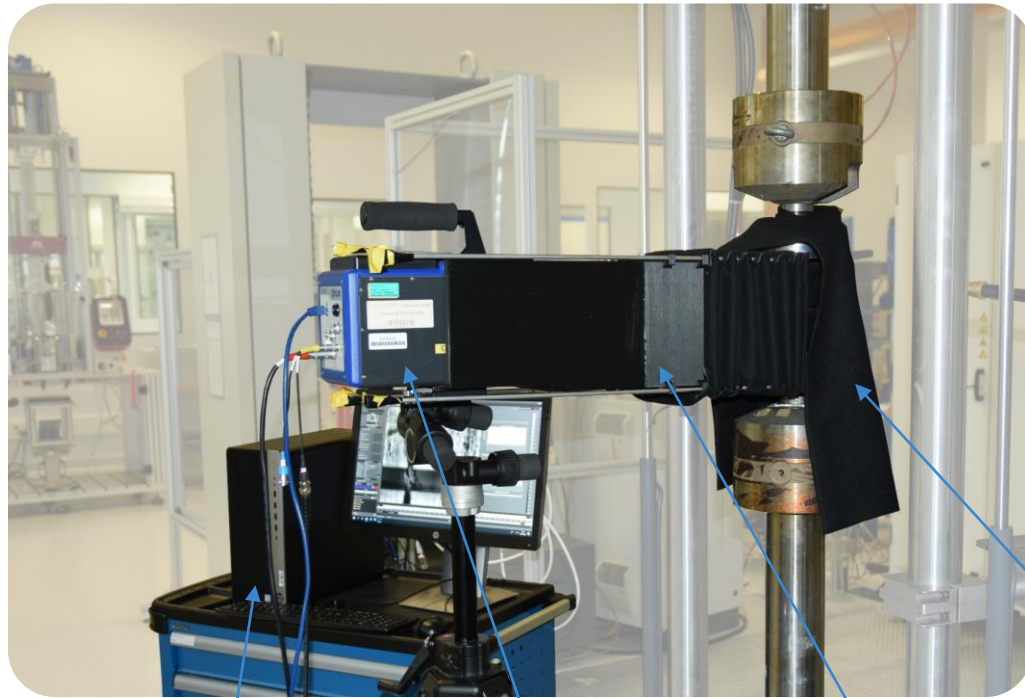
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



PC de la caméra

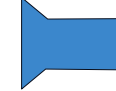
caméra IR

tunnel de confinement
pour isoler la scène
thermique

éprouvette



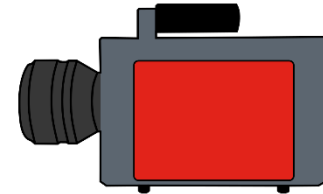
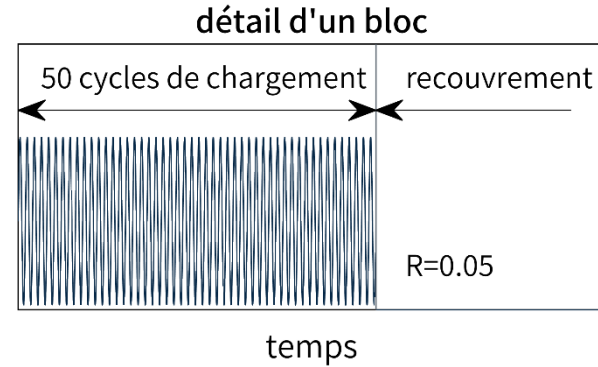
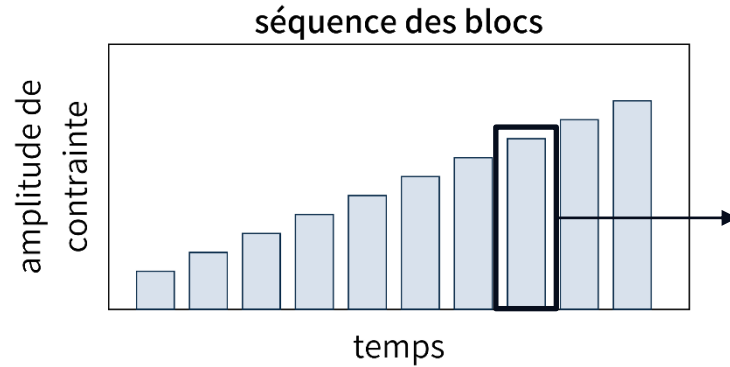
camera IR



contrôleur
machine

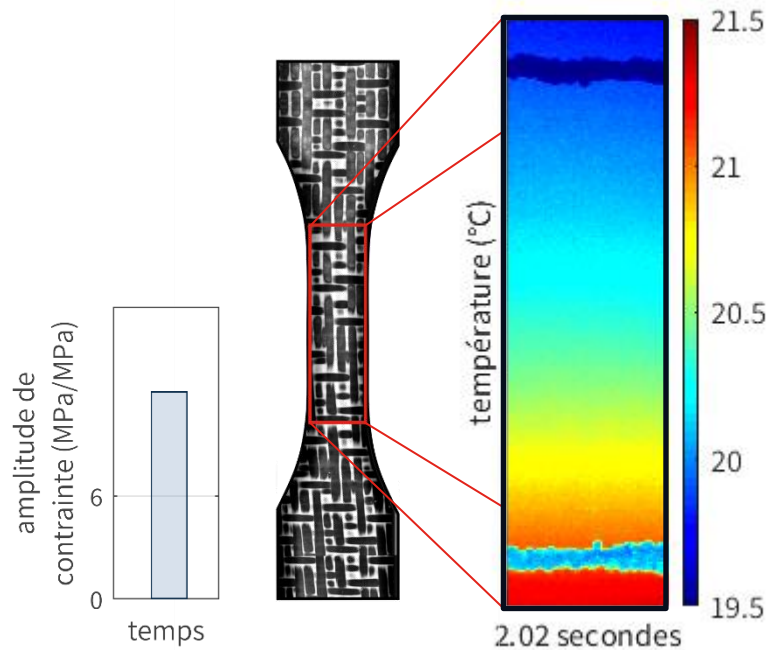
drap noir pour
isoler autour des
mors

2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique

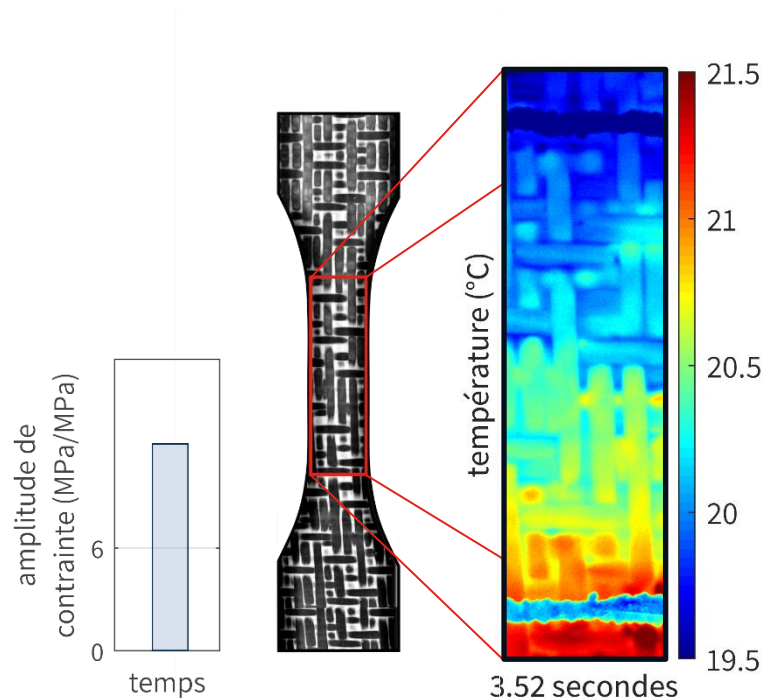


caméra IR

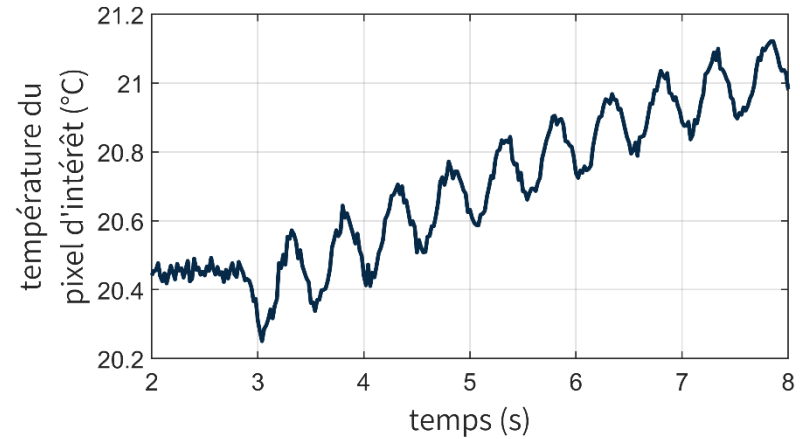
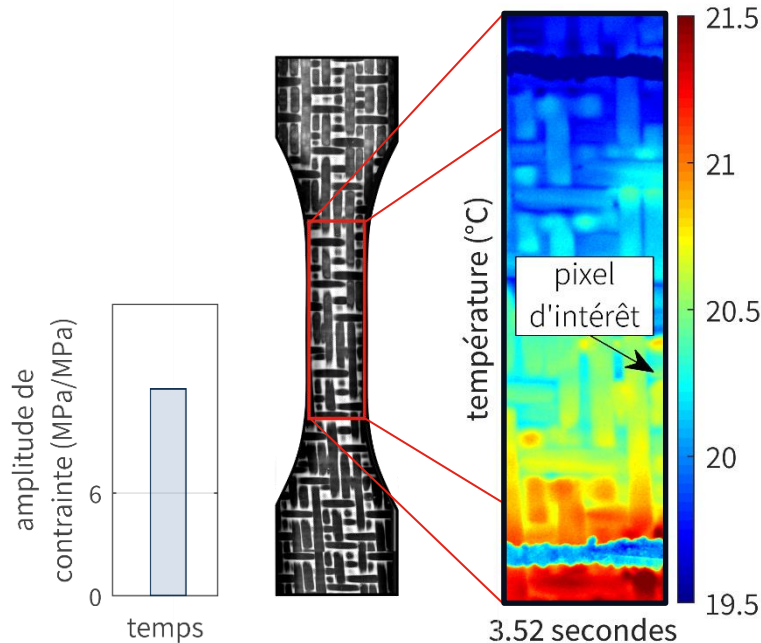
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



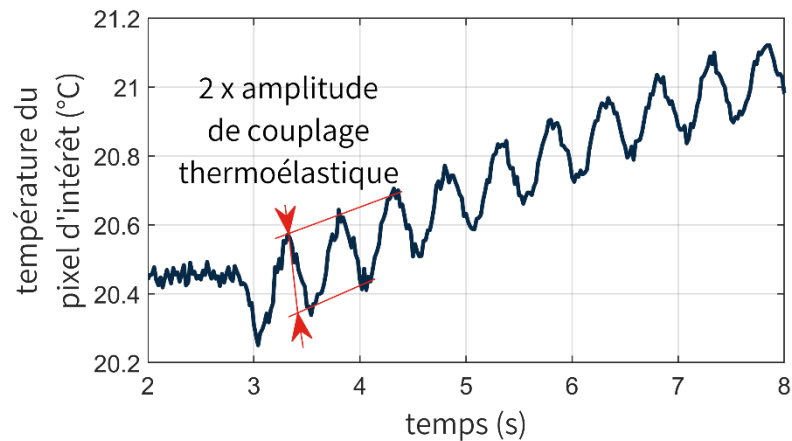
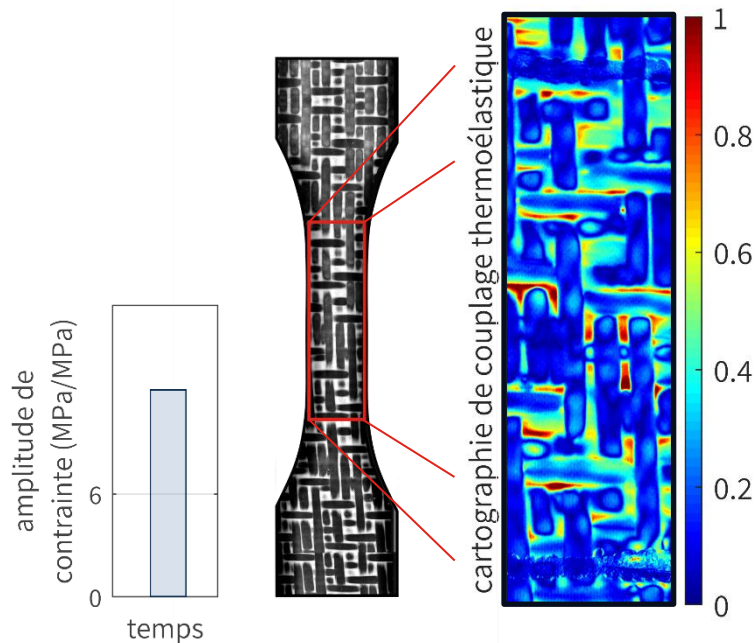
Equation de la chaleur en régime transitoire

$$\rho C_p \dot{\theta} = \Delta + \rho \theta \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon_{el} \partial \theta} : \dot{\varepsilon}_{el}$$

Δ ... dissipation intrinsèque instantanée

$\rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varepsilon_{el} \partial T} : \dot{\varepsilon}_{el}$... couplage thermoélastique

2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



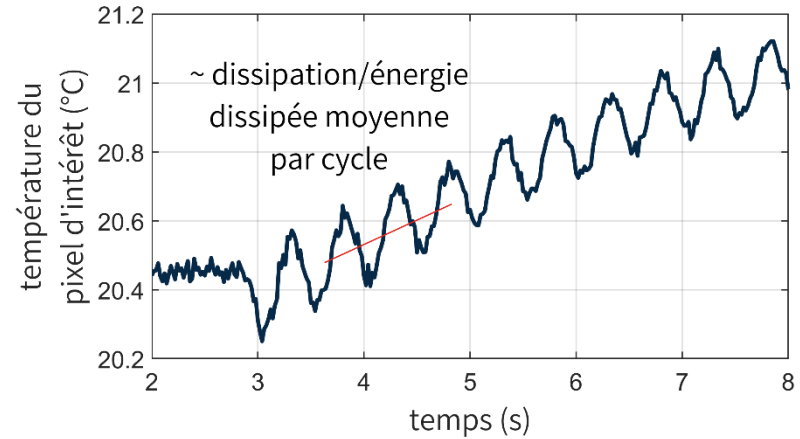
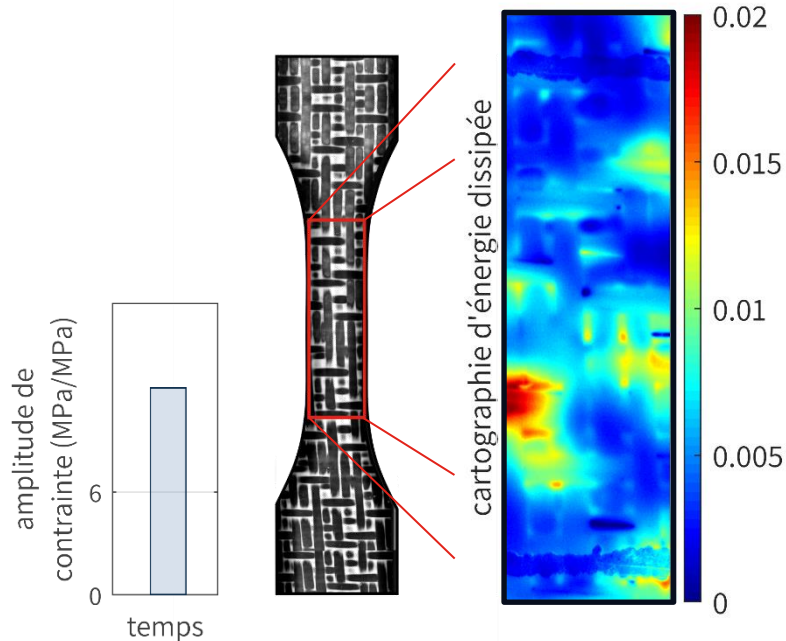
Equation de la chaleur en régime transitoire

$$\rho C_p \dot{\theta} = \Delta + \rho \theta \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{\varepsilon}_{el} \partial \theta} : \dot{\tilde{\varepsilon}}_{el}$$

Δ ... dissipation intrinsèque instantanée

$\rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{\varepsilon}_{el} \partial T} : \dot{\tilde{\varepsilon}}_{el}$... couplage thermoélastique

2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



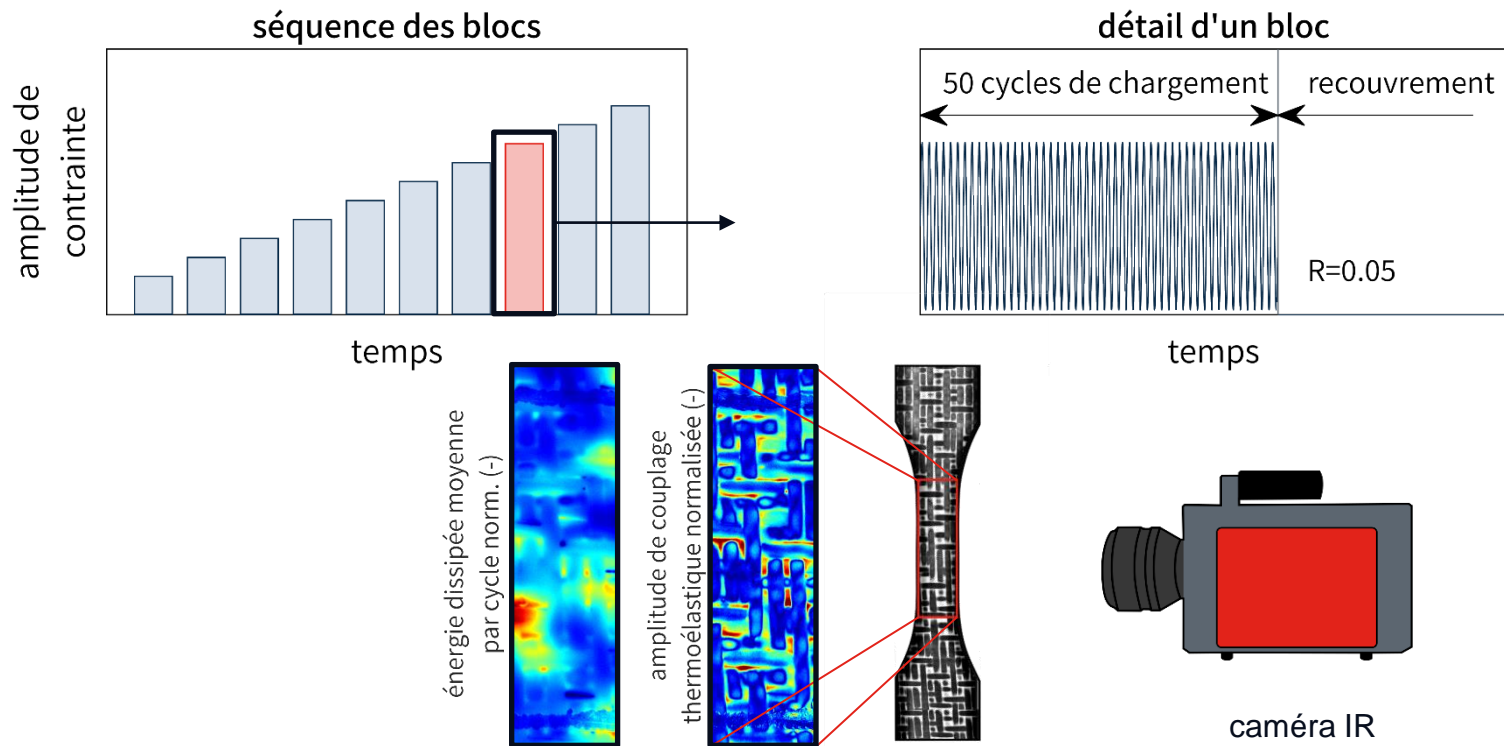
Equation de la chaleur en régime transitoire

$$\rho C_p \dot{\theta} = \Delta + \rho \theta \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{\varepsilon}_{el} \partial \theta} : \dot{\tilde{\varepsilon}}_{el}$$

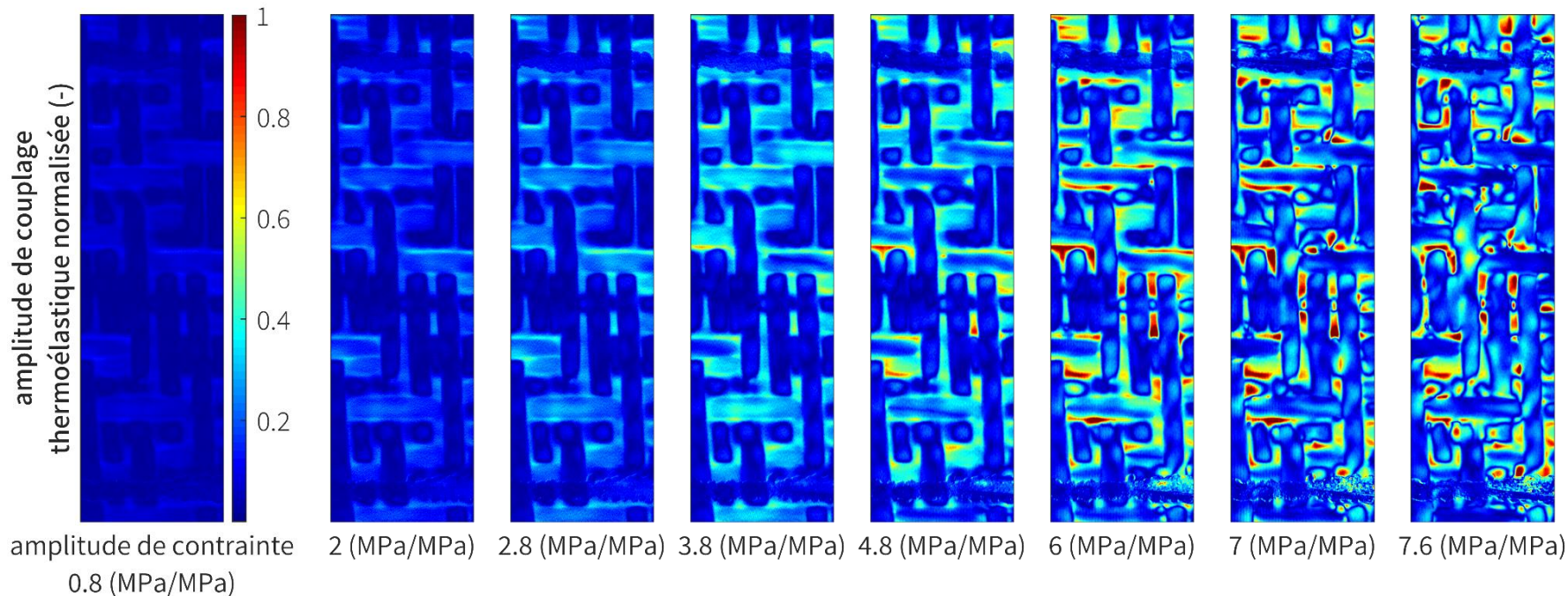
Δ ... dissipation intrinsèque instantanée

$\rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{\varepsilon}_{el} \partial T} : \dot{\tilde{\varepsilon}}_{el}$... couplage thermoélastique

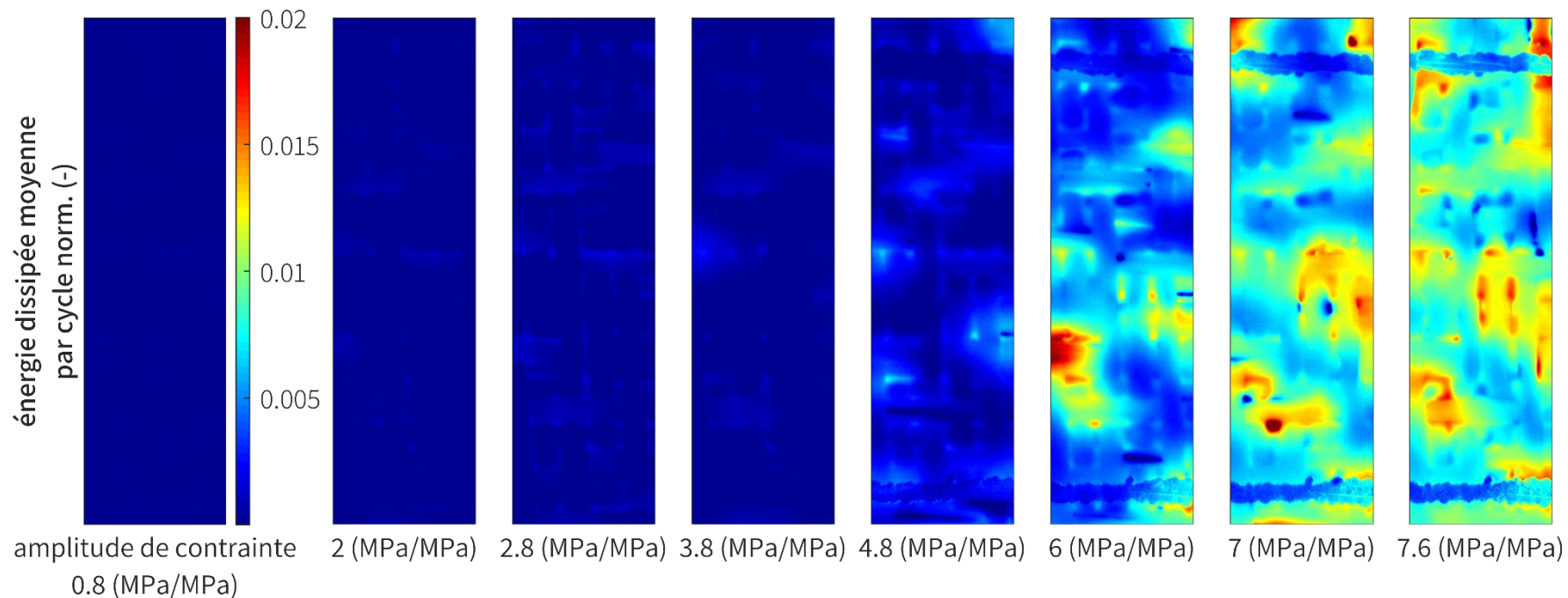
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



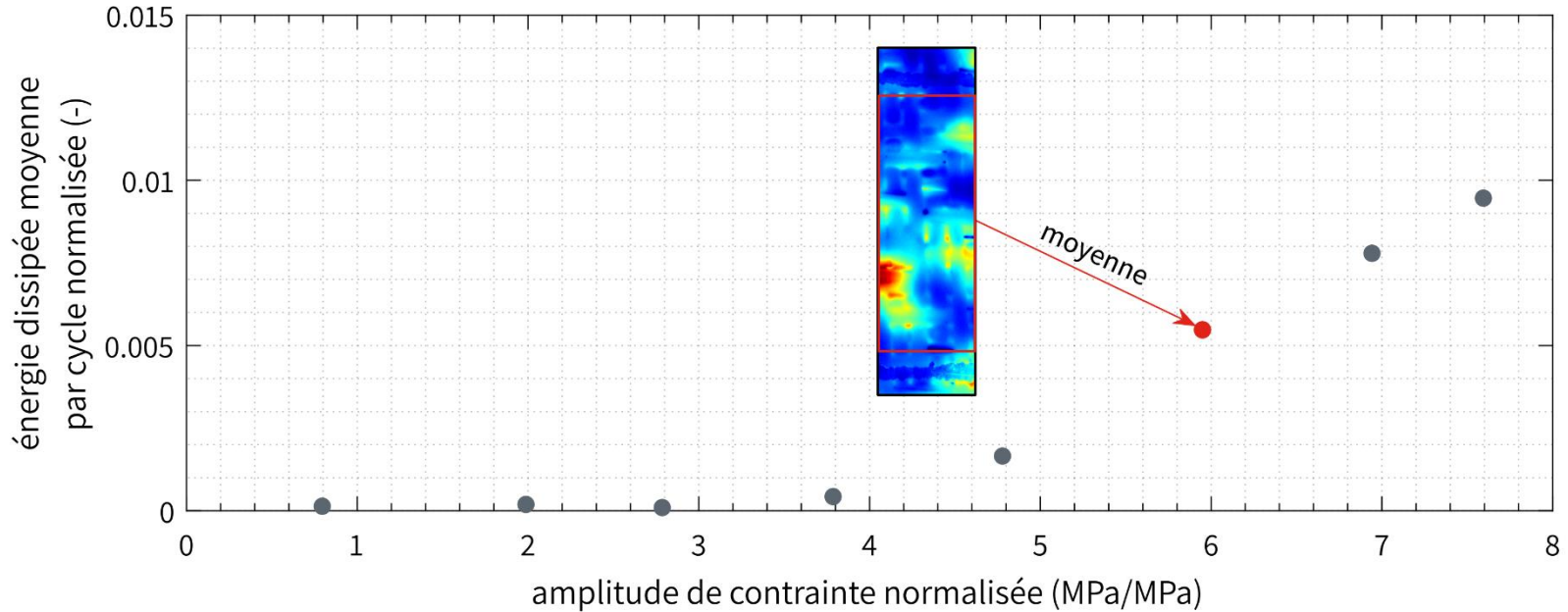
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



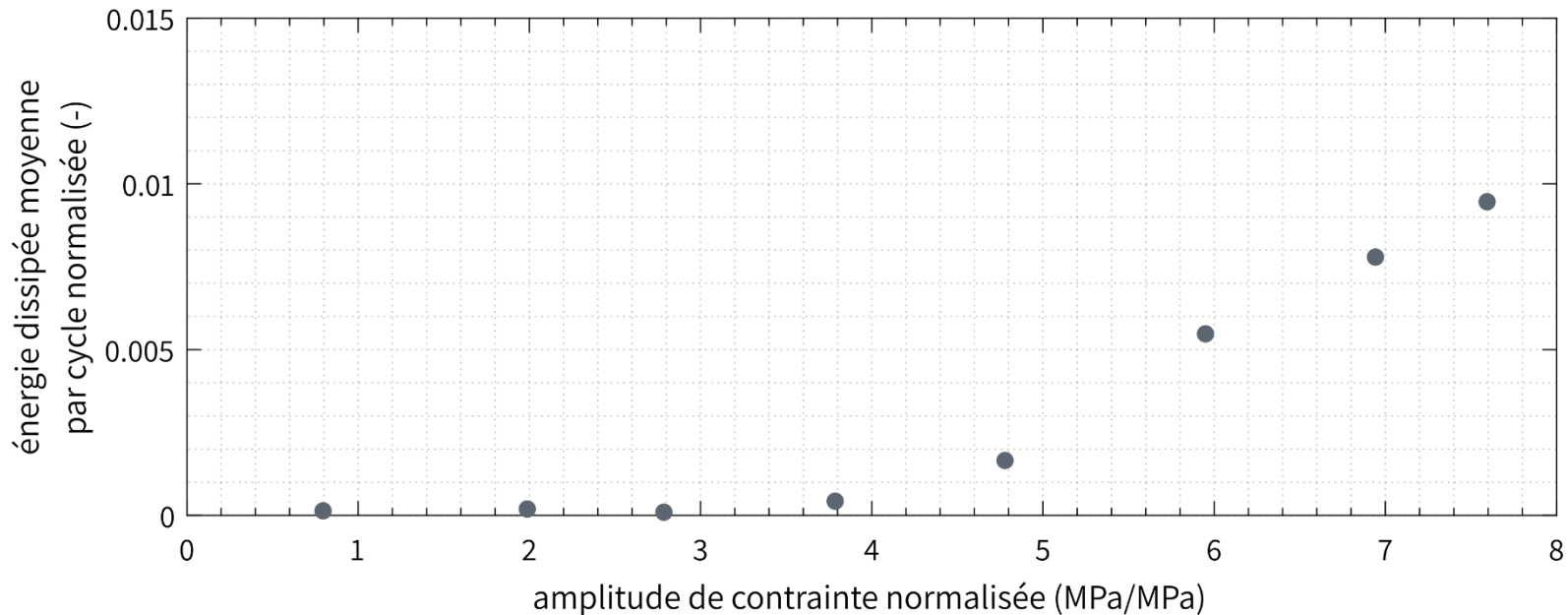
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



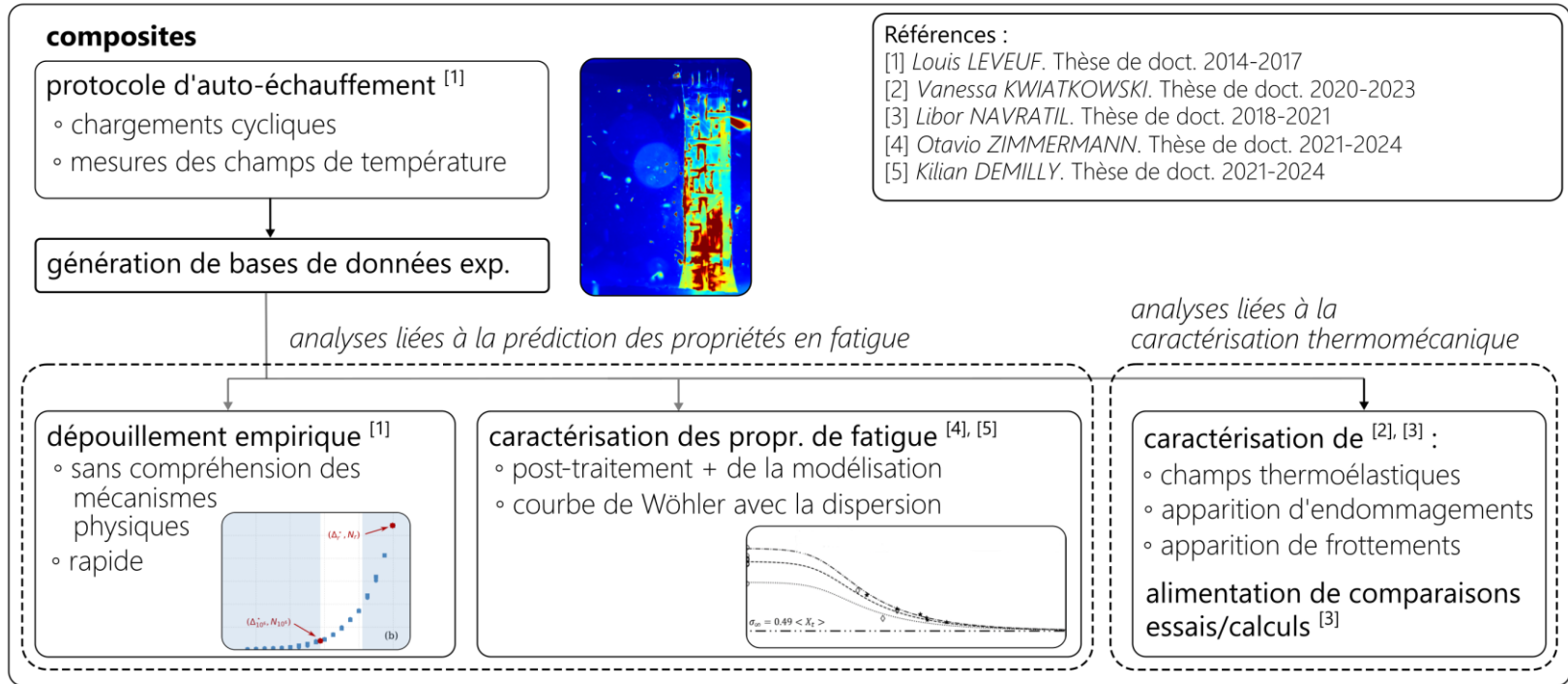
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



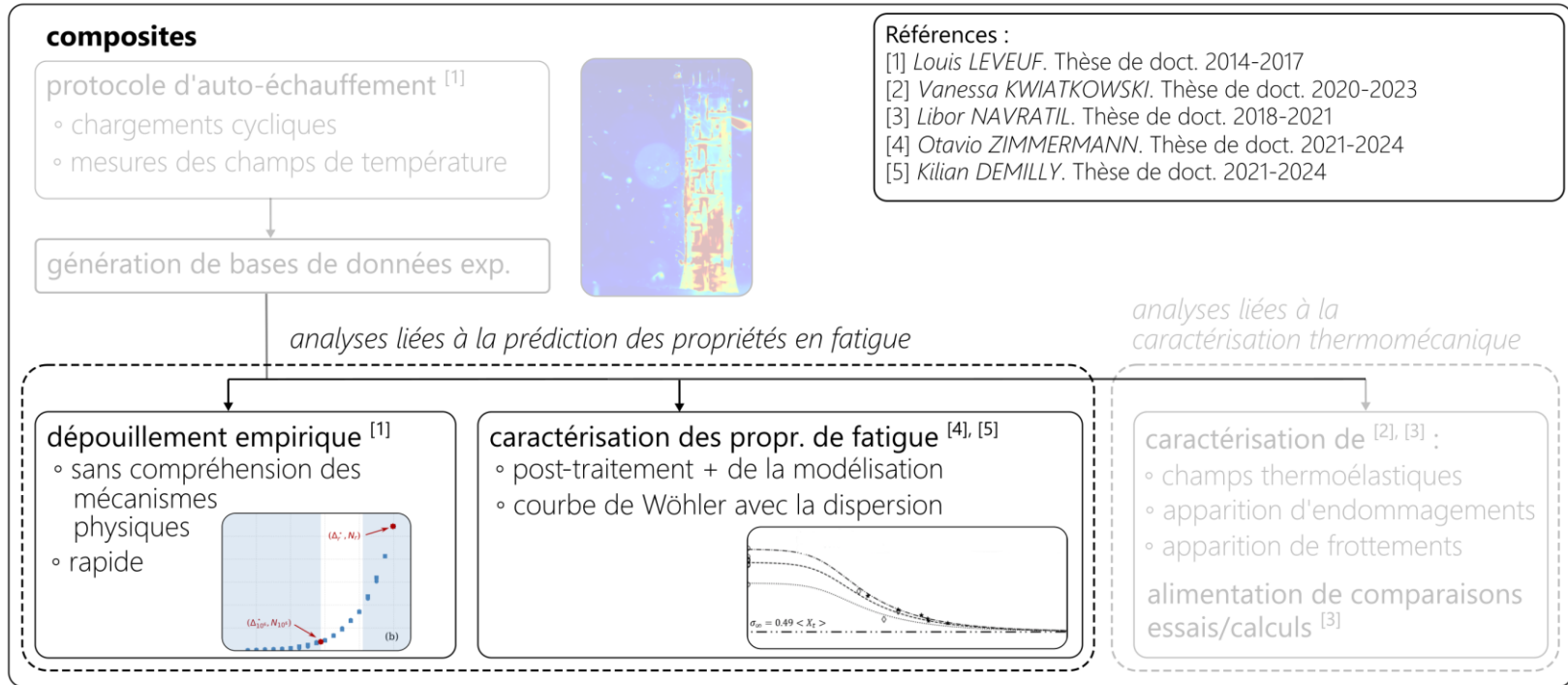
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique

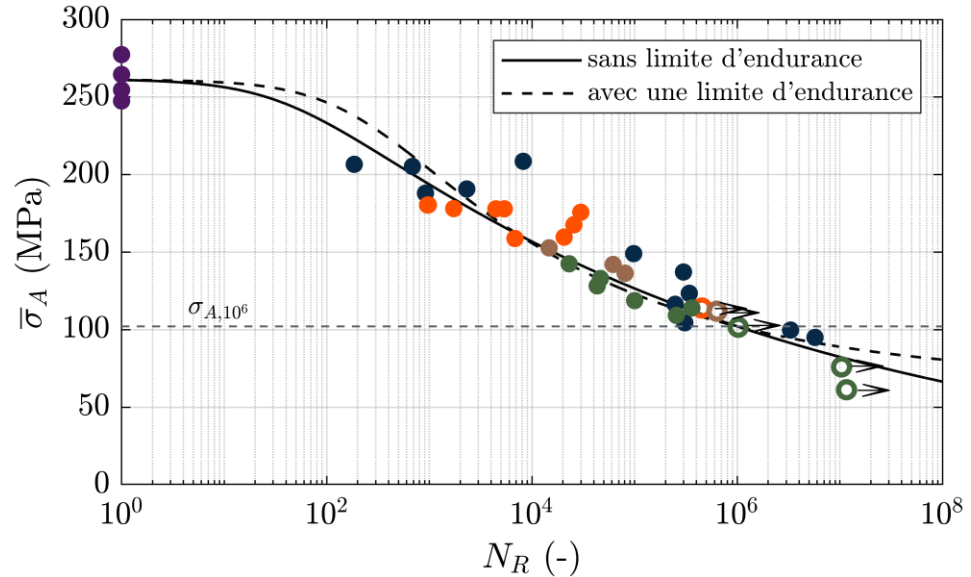
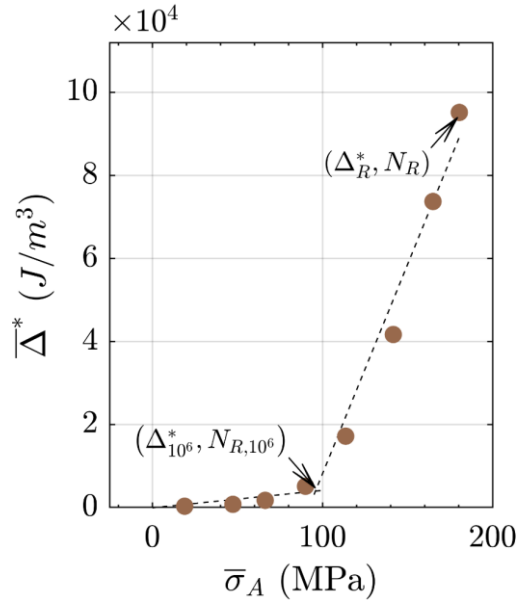


2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



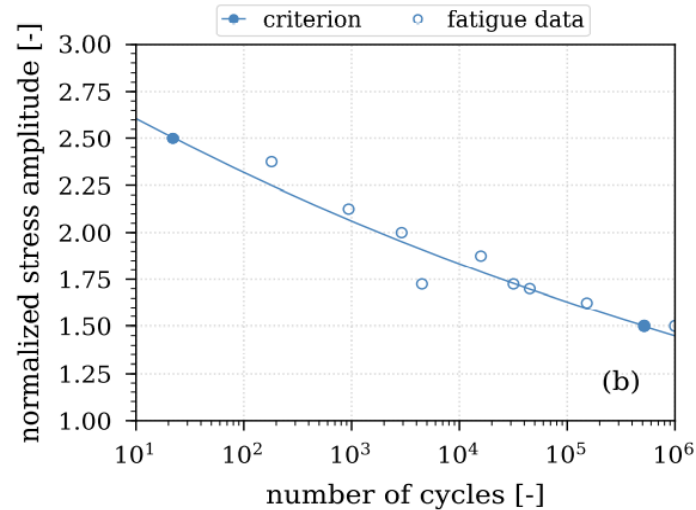
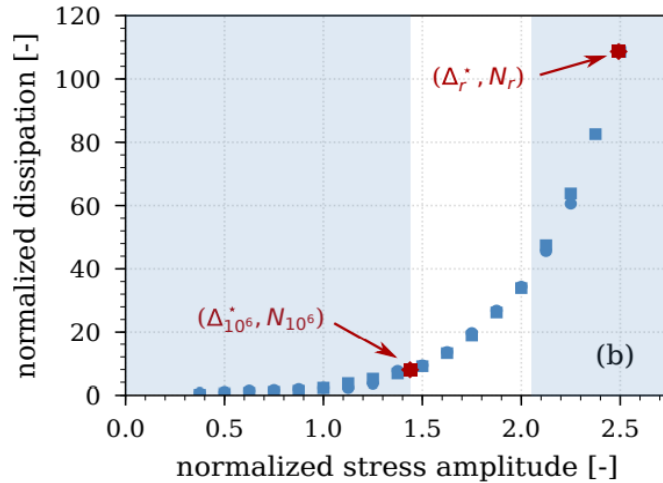
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique

- **Identification de la limite de fatigue**
 - Rupture de pente associée à 10^6 cycles
 - Démarche similaire à l'estimation via l'émission acoustique

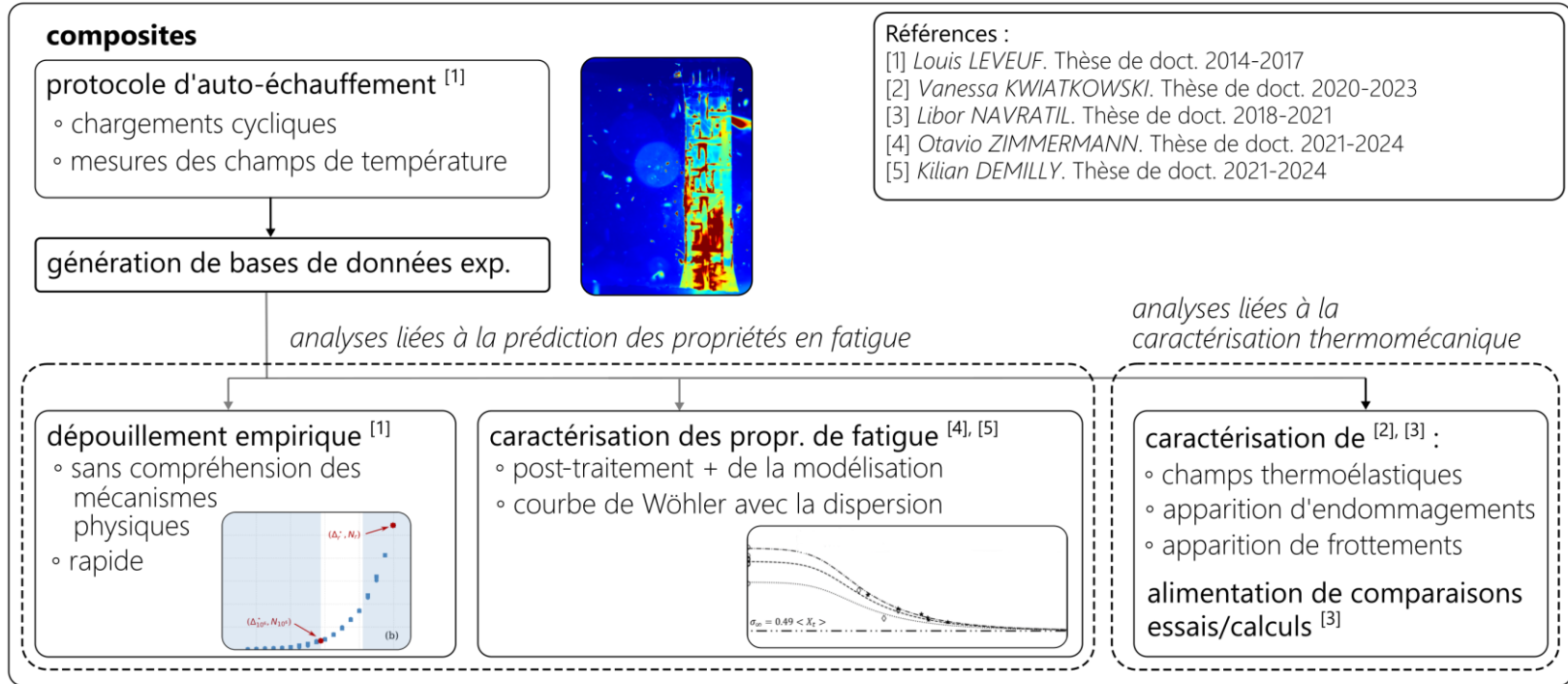


2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique

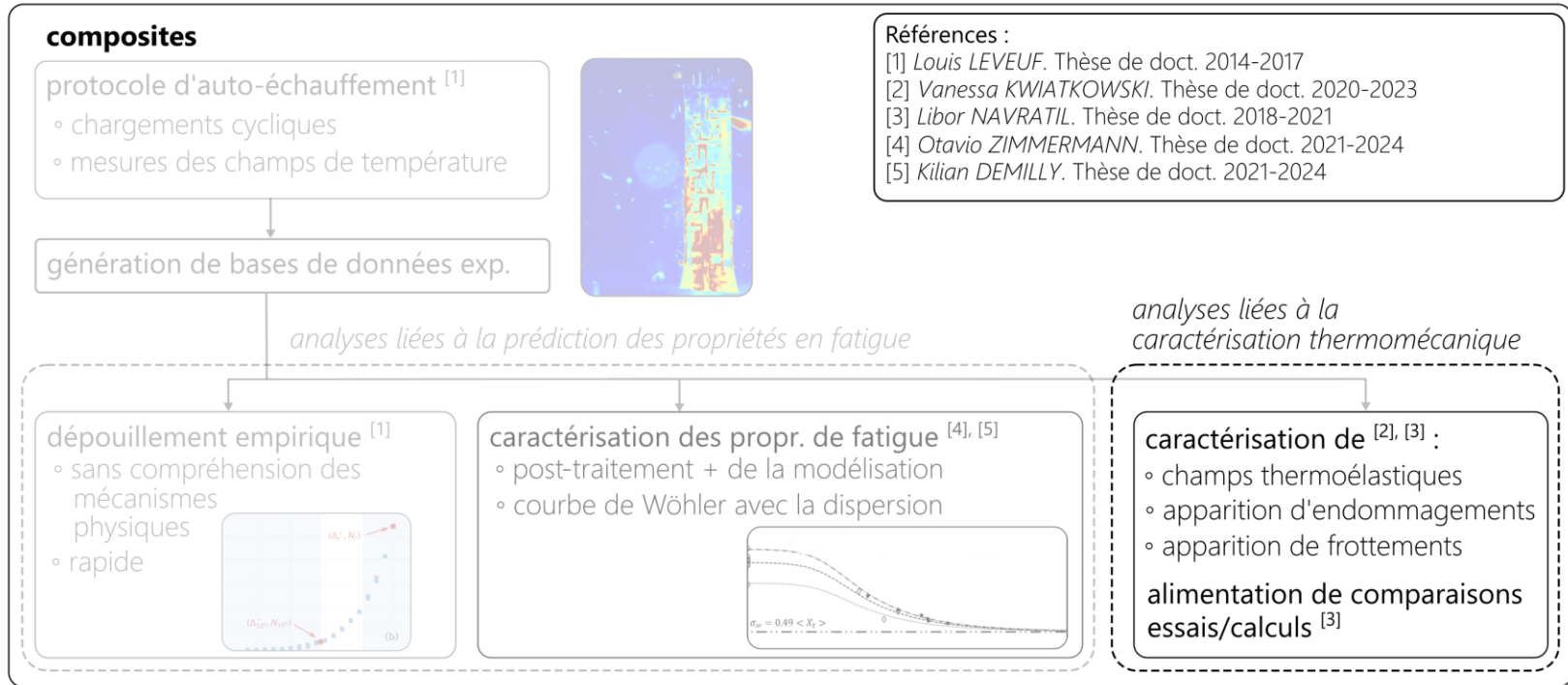
- **Critère énergétique** : $\Delta^* \cdot N_R^b = C$
 - Δ^* ... énergie dissipée moyenne par cycle évaluée au début de l'essai
 - N_R ... nombre de cycles jusqu'à rupture
 - b, C ... paramètres du critère



2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



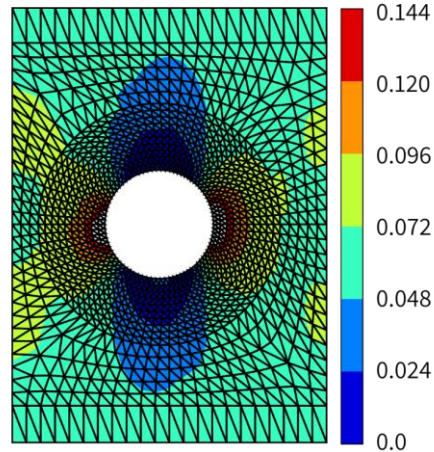
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique



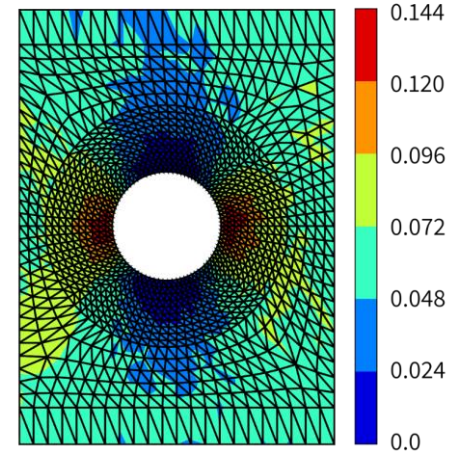
2. Mesures infrarouges pour la caractérisation thermomécanique

- **Les mesures IR permettent :**
 - D'alimenter la caractérisation thermomécanique
 - De faire le lien avec les propriétés en fatigue
- **Perspective :**
 - Apports des mesures de couplage thermoélastique

Amplitude de couplage thermoélastique (°C)
numérique



Amplitude de couplage thermoélastique (°C)
expérimentale



**POWERED
BY TRUST**
