

Sujet thèse Université de Toulouse

Titre étude : Localisation dynamique multi-échelle et multi-instrumentée de sources énergétiques dans un solide sous chargement mécanique - Caractérisation et évaluation d'endommagement initial.

Compléments : Apport de la stéréo-corrélation EF, de la thermographie infrarouge, d'émissions acoustiques, etc, pour une analyse inverse basée sur la fusion de données multi-capteurs et multi-échelle

Équipe d'encadrement et d'appui :

- Jean-Noël PERIE (HDR Dir.)
- Marie-Laetitia PASTOR (coDir.), Jean-Michel BALEYNAUD (coDir.), Philippe MARGUERES UT3-PS, ICA-MICS, Jean-Charles PASSIEUX INSA, ICA-MS2M ...

Grandes lignes et points de contexte

La localisation et l'évaluation d'irréversibilités apparues dans une structure correspond à un besoins avéré et récurrent de l'industrie et consécutivement de la communauté scientifique impliquée dans le domaine des matériaux et de leur résistance aux sollicitations mécaniques (cf études ICA). Ainsi, on s'intéresse ici au diagnostic d'intégrité des matériaux constitutifs d'un ensemble construit et on entend par irréversibilité la transformation exogène (en particulier exothermique) de la matière qui perd sa caractéristique de solide élastique.

La recherche prévue tente de mettre au point une métrologie sans contact et se situe dans la problématique d'évaluation dynamique simultanée de propriétés thermomécaniques de solides. À ce titre, elle se place au point de convergence de communautés scientifiques parfois éloignées (thermodynamique, énergétique, thermique, mécanique, matériaux, métrologie ...), mais avec lesquelles des collaborations existent et se dessinent [cf LMGC, METTI].

Les travaux sont proposés au moment où le développement de nouveaux outils permet de faciliter la corrélation des champs mesurés par les différents capteurs, aux différents instants de captage et le modèle éléments finis dans le repère objet, en particulier la bibliothèque PyXel. bibliothèque à « sources ouvertes » dédiée aux applications de mécanique expérimentale et utilisant la méthode des éléments finis et la corrélation d'images digitales. Elle est libre d'accès pour la recherche et l'enseignement. Elle est basée sur numpy, scipy and matplotlib - (<https://github.com/jcpassieux/pyxel>)

Objectifs de l'étude

On se propose de mettre au point une métrologie dynamique multi-échelles, multi-capteurs, associant des mesures simultanées de champs énergétiques et cinématiques superficiels d'un solide à une méthode inverse de prédiction de la localisation des zones en sur-sollicitation à l'intérieur du solide. On entend par méthode inverse une remontée du calcul de la diffusion de l'énergie dans le milieu matériel qui se fonde sur la résolution des équations qui découlent de la description du phénomène physique de diffusion et sur un jeu de mesures varié, pour déterminer l'état de la matière qui est à l'origine. Ce type de méthode doit sa précision d'une part à la rigueur mathématique du modèle et d'autre part,

Localisation dynamique multi-échelle et multi-instrumentée de sources énergétiques dans un solide sous chargement mécanique - Caractérisation et évaluation d'endommagement initial.

contact list : "JN PERIE" <jean-noel.perie@iut-tlse3.fr>; "ML Pastor" <marie.laetitia.pastor@iut-tarbes.fr>; "JM BALEYNAUD" <jean-michel.baleynaud@univ-tlse3.fr>

à la multiplicité et à l'indépendance des mesures expérimentales sur lesquelles elle s'appuie ; une variété que l'on évalue par le critère de redondance.

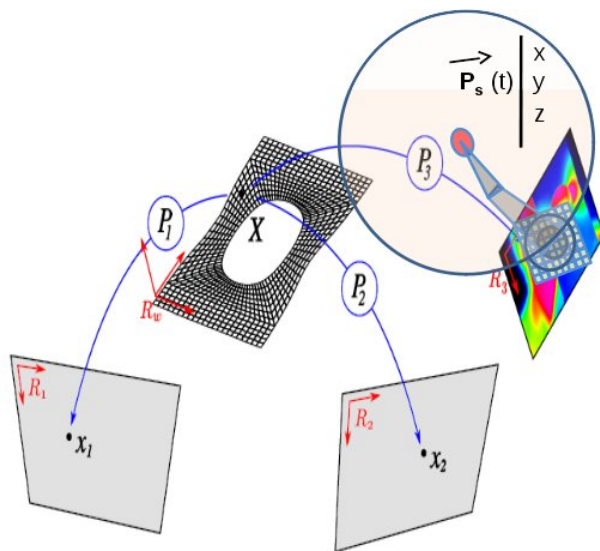
Verrous scientifiques et hypothèses de résolution

La multiplicité des informations locales superficielles et leur caractère dynamique qui renforce la redondance des données expérimentales doit ainsi permettre, par méthode inverse, d'évaluer et de caractériser les propriétés instantanées locales de la matière. On se propose d'évaluer des caractéristiques thermomécaniques au voisinage de la source énergétique correspondant au point de création d'irréversibilité induite par la concentration de la sollicitation mécanique. Au stade actuel de développement du modèle et d'identification des mesures réalisables en surface, il n'est pas possible de proposer la liste exhaustive de ces variables.

Ainsi dans cette étude, on présume que la prédiction d'apparition d'endommagement dans la matière (et son évaluation) découlera surtout de la prise en compte de la dynamique d'évolution des variables de champ ; celle-ci devrait s'appuyer sur une analyse multi-échelle des signaux acquis et un traitement numérique par méthode inverse. La fusion de données dynamiques de résolution disparate dans l'espace et le temps et l'inversion nécessaire représentent un problème complexe. La précision du modèle diffusif élaboré, la fusion de donnée et les résolutions choisies définiront la redondance de mesures d'où découlera la richesse et la précision de localisation de la source.

L'expérimentation aura pour objectif de démontrer les limites d'application et d'obédience de la méthode et d'évaluer sa précision dans différentes conditions.

Originalité de la méthode



L'aspect innovant de la méthode consiste en ce que la technique d'inversion envisagée se fonde sur une description analytique du flux diffusé basée sur deux zones phénoménologiquement différentes: une zone porteuse de source thermique dont l'origine découle des irréversibilités dues à la sollicitation extrême et une zone purement diffusive. Cette zone diffusive est considérée comme non-isotrope; ainsi, ses propriétés thermo-physiques font apparaître des grandeurs vectorielles, en premier lieu la conductivité thermique. Cette configuration est illustrée par la figure 1.

Figure 1: Schéma de principe de fusion statique de données multi-capteurs multi-échelles

Objectifs connexes

L'utilisation du modèle élément finis permettra alors de retracer l'histoire vécue par la matière sollicitée et même éventuellement à terme, d'assurer le lien avec l'ingénierie pour pallier les défauts constatés.

L'expérimentation mettra en jeu des techniques optiques et thermographiques et des traitements de type stéréo-corrélation entre données cinématiques d'une part et énergétiques d'autre part. D'autres types de mesure sont également envisagés.

Sous sa forme initiale, elle sera menée sur des éprouvettes métalliques simples (planes) à des fins de validation de la méthode. Elle se poursuivra par des essais sur des matériaux progressivement plus complexes au fur et à mesure que le savoir-faire se développera.

Elle servira également de champ d'étude de l'incidence du traitement optique des éprouvettes sur la validité des mesures (influence mouchetis, forme, état de surface, revêtement superficiel, etc).

Le champ expérimental initial considère des éprouvettes inox minces, planes et ajourées sollicitées en traction ; dans un second temps (après validation) une expérimentation sur perçage d'éprouvettes (cylindriques, prismatiques) est envisagée.

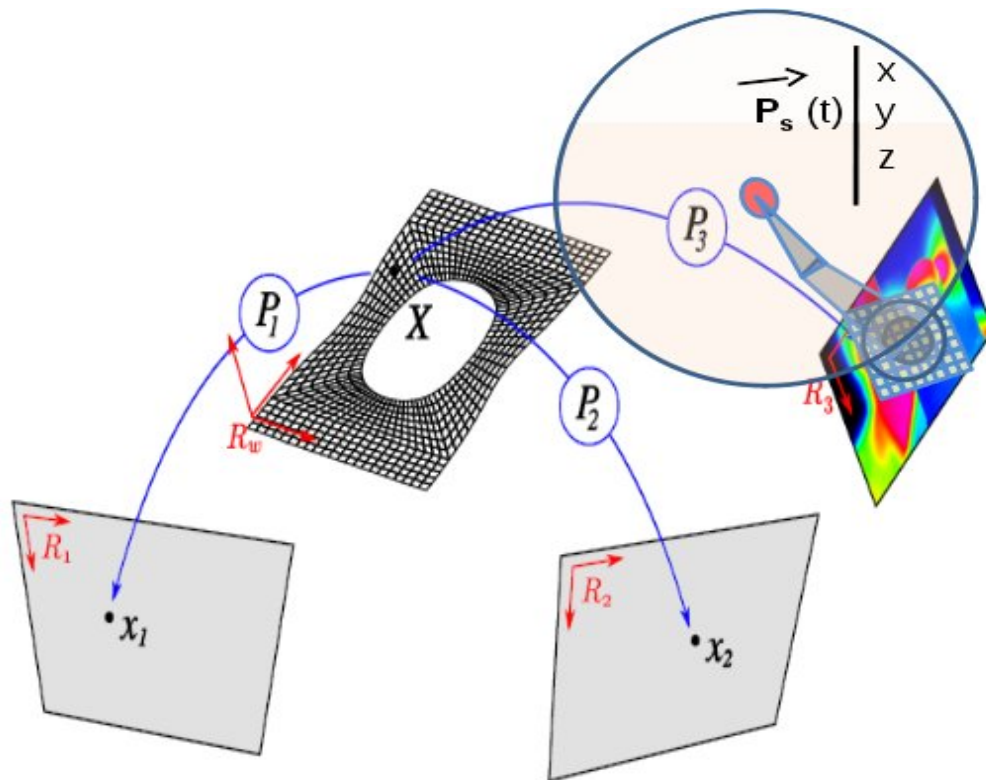
Références: travaux/contacts Thèse Pierre 2016, Thèse Depradeux 2004, [ICA-MICS-MS2M'18], [LMT'18], [LMGC'18], [LML], [METTI'19], [MEGA-INSALyon'04], etc.

Méthodes : Formalisme FE-SDIC, projecteurs, calibration extrinsèque, etc.

Ressources : Campagnes expérimentales ICA(2018), Bibliothèque FE-DIC PyXel (JC Passieux), etc

Mots clefs : mesures de champ ; cinématique ; énergétique ; thermogramme IR ; images CCD ; fusion de données ; stéréo-corrélation ; images numériques ; analyse inverse ; bilan énergétique ; modèles analytiques diffusifs ; localisation de sources ; suivi de sources ; caractérisation ; propriétés thermomécaniques ;

Détail du contenu de l'illustration 1 : Grands principes



- plans Images de champs superficiels : exemples : visible (2CCD), infrarouge, maillage CAO solide déformé, liste non exhaustive
- projecteurs P_i projetant le maillage superficiel CAO du solide sur les plans de mesure de champs
 - P_1 et P_2 : champ cinématique
 - P_3 : champ énergétique superficiel
- le point source P_s (point sur-sollicité du solide)
 - diffusant spatialement de manière isotrope dans son voisinage (échelle sub-micronique - modèle sphérique)
 - à l'origine du flux plus directionnel de diffusion qui atteindra la surface via
 - un cône de diffusion (éventuellement plusieurs successifs si matériau stratifié)
 - dont la fraction de flux émis qui atteint la surface génère une tache "polychrome" (de facto à densité énergétique non uniforme)
 - suivi dynamique de la progression tache (forme, contour, profil énergétique et cinétiques associées)
 - base de la localisation, du suivi et de la caractérisation de la source
 - suivi inverse du trajet de flux pour remonter à la source
 - usage d'informations redondantes dynamiques pour le suivi
 - usage d'informations redondantes diverses pour la caractérisation et l'évaluation du degré d'irréversibilité de transformation d'état de la zone source

Titre étude : Localisation dynamique multi-échelle et multi-instrumentée de sources énergétiques dans un solide sous chargement mécanique - Caractérisation et évaluation d'endommagement initial.

Description du sujet :

Contexte et méthodes : La fiabilité des structures découle de leur histoire et de celle de leurs éléments. Prévoir l'apparition de dommages et prévenir de leur évolution reste un enjeu crucial que conception, modélisation et simulation remplissent dans une large mesure. L'approche expérimentale, bien que complexe et coûteuse, reste indispensable du fait des limites des modèles disponibles, des variabilités et de la ténuité des indices d'endommagement accessibles dans un élément au cours de son cycle de vie. Les mesures de champs ouvrent, dans ce contexte, de nouvelles perspectives. Ainsi, des mesures de champs cinématiques par corrélation d'images numériques ont ainsi été utilisées pour identifier des champs de propriétés et des paramètres constitutifs de lois d'endommagement anisotrope lors d'essais inhomogènes. D'autre part, les méthodes basées sur les flux rayonnés par les surfaces sont attrayantes, car souvent souples et rapides et de large innocuité sur les objets d'études. Elles permettent aussi d'opérer aux différentes échelles d'intérêt, sans contact, et ce dans des conditions de chargement représentatives. Par méthodes inverses, les mesures thermiques par thermographie infrarouge donnent actuellement accès aux sources de chaleur et à des propriétés thermiques. Leur advection au moyen des mesures par corrélation d'images permet d'envisager la réalisation de bilans énergétiques à différentes échelles, notamment aux échelles structure et microstructure.

Sujet de thèse :

L'objectif de la thèse est de proposer des méthodes expérimentales et les traitements numériques associés pour des mesures couplées de champs cinématiques et thermiques réalisées à différentes échelles au cours d'un seul essai mécanique. Les mesures devraient donner accès à la dissipation locale d'énergie, et potentiellement, à la localisation de sa source et à son évolution.

Dans un premier temps, une étude bibliographique sur le comportement thermomécanique des matériaux, les mécanismes d'endommagement, leur modélisation thermodynamique, les méthodes inverses en usage et la corrélation entre les mesures de champs thermiques et cinématiques sera effectuée. Un modèle analytique original de la diffusion de l'énergie évaluée par le capteur IR est visé. Il sera testé à diverses échelles pour l'identification par méthode inverse de la source de chaleur et son suivi dynamique. Après validation, un protocole expérimental mettant en œuvre des mesures thermiques et cinématiques couplées sera créé. Des essais multi instrumentés seront ainsi réalisés et analysés. La mise en correspondance avec le modèle éléments finis permettra de rapprocher les dynamiques mécaniques et thermiques. Le calcul de la dissipation thermique et le suivi quantitatif et dynamique de son origine a pour objectif de tenter de discriminer et d'évaluer les mécanismes d'endommagements locaux.

PhD theme University of Toulouse

Study title: Multi-scale and multi-instrumented dynamic localization of energy sources in a solid mechanical loading - Characterization and evaluation of initial damage.

Complements: Contribution of EF stereo-correlation, infrared thermography, acoustic emissions, etc., for inverse analysis of multiple and multi-scale data fusion

Support team:

- Jean-Noël PERIE (HDR Dir.)
- Marie-Laetitia PASTOR (coDir.), Jean-Michel BALEYNAUD (coDir.), Philippe MARGUERES UT3-PS, ICA-MICS, Jean-Charles PASSIEUX INSA, ICA-MS2M ...

Outline and context points

The location and evaluation of appearing structural irreversibility corresponds to a proven and recurrent need of the industry and consecutively of the scientific community involved in the field of materials and their resistance to mechanical stresses (cf studies ICA). Thus, we are interested here in the diagnosis of integrity of the materials constituting a set of constructs and irreversibility means the exogenous (in particular exothermic) transformation of the material which loses its elastic solid characteristic.

The planned research attempts to develop a contactless metrology and is situated in the problem of simultaneous dynamic evaluation of thermomechanical properties of solids. As such, it is at the crossroads of sometimes distant scientific communities (thermodynamics, energy, thermal, mechanical, materials, metrology ...), but with which collaborations exist and are emerging [see LMGC, METTI].

The work is proposed at a time when the development of new tools facilitates the correlation of the fields measured by the different sensors, at different capture times and the finite element model in the object reference, in particular the PyXel library. open source library dedicated to experimental mechanics applications using the finite element method and the digital image correlation. It is free of access for research and teaching. It is based on numpy, scipy and matplotlib – see: (<https://github.com/jcpassieux/pyxel>)

Goal of the study

We propose to develop a multi-scale, multi-sensor dynamic metrology, associating simultaneous measurements of superficial energy and kinematic fields of a solid to an inverse method of predicting the localization of the zones in over-solicitation to the inside the solid. By inverse method is meant a rise in the calculation of the diffusion of energy in the material medium which is based on the resolution of the equations which result from the description of the physical phenomenon of diffusion and on a varied set

of measurements, to determine the state of matter that is causing it. This type of method owes its precision both to the mathematical rigor of the model and to the multiplicity and independence of the experimental measures on which it is based; a variety that is evaluated by the criterion of redundancy.

Scientific locks and resolution hypotheses

The multiplicity of superficial local information and its dynamic character which reinforces the redundancy of the experimental data must thus make it possible, by inverse method, to evaluate and characterize the instantaneous local properties of the material. It is proposed to evaluate thermomechanical characteristics in the vicinity of the energy source corresponding to the point of creation of irreversibility induced by the concentration of the mechanical stress. At the current stage of model development and identification of surface measurements, it is not possible to propose an exhaustive list of these variables.

Thus, in this study, it is assumed that the prediction of the occurrence of damage in the material (and its evaluation) will mainly result from taking into account the dynamics of evolution of the field variables; this should be based on a multi-scale analysis of acquired signals and inverse numerical processing. The fusion of dynamic disparate resolution data in space and time and the necessary inversion represent a complex problem. The accuracy of the developed diffusion model, the data fusion and the chosen resolutions will define the redundancy of measurements from which the source's richness and location accuracy will flow.

The objective of the experiment will be to demonstrate the limits of application and obedience of the method and to evaluate its accuracy under different conditions.

Originality of the method

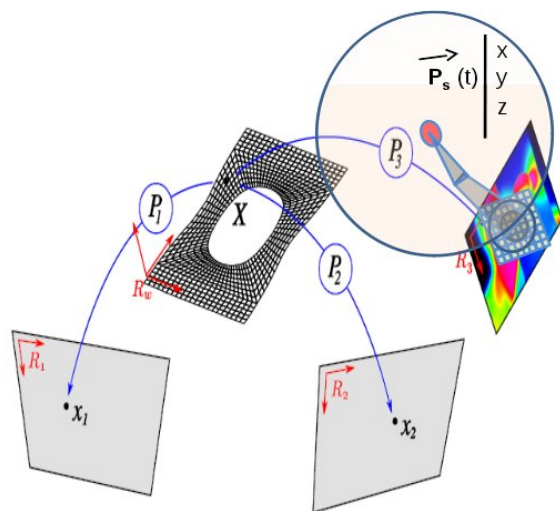


Figure 1: Schematic diagram of static multi-scale multi-sensor data fusion

The innovative aspect of the method consists in the fact that the inversion technique considered is based on an analytical description of the diffused flux based on two different zones on the phenomenological point of view : a zone carrying a thermal source whose origin derives from the irreversibility due to the extreme solicitation and a purely diffusive zone. This diffusive zone is considered as non-isotropic; thus, its thermo-physical properties reveal vector quantities, in the first place the thermal conductivity. This configuration is illustrated in Figure 1.

Related objectives

he use of the finite element model will then make it possible to trace the history lived by the subject solicited and even possibly eventually, to ensure the link with the engineering to palliate the observed defects.

The experiment will involve optical and thermographic techniques and stereo-correlation type processing between kinematic data on one hand and energy on the other hand. Other types of measurement are also envisaged.

In its initial form, it will be conducted on simple (flat) metal specimens for method validation purposes. It will continue with trials of progressively more complex materials as the know-how develops.

It will also serve as a field of study of the impact of the optical treatment of the specimens on the validity of the measurements (mottle influence, shape, surface condition, surface coating, etc.).

The initial experimental field considers thin, flat and perforated stainless steel specimens stressed in tension; in a second step (after validation) an experiment on drilling of specimens (cylindrical, prismatic) is envisaged.

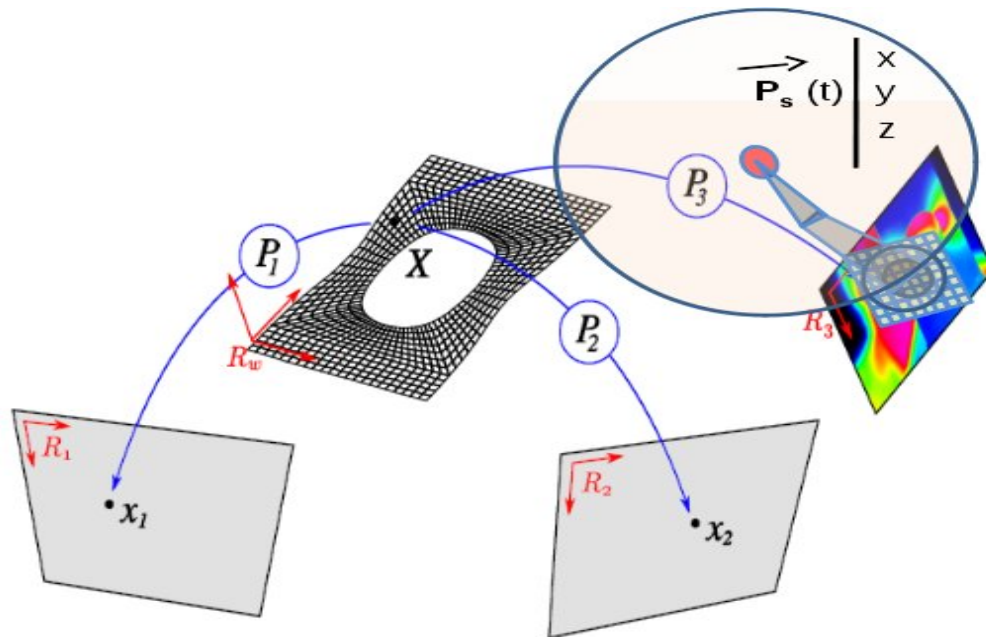
References: works / contacts : Thesis Pierre 2016, Thesis Depradeux 2004, [ICA-MICS-MS2M'18], [LMT'18], [LMGC'18], [LML], [METTI'19], [MEGA-INSALyon'04], etc.

Methods: FE-SDIC Formalism, projectors, extrinsic calibration, etc.

Resources: ICA Experimental Campaigns (2018), FE-DIC PyXel Library (JC Passieux), etc.

Key words: field measurements; kinematics; energy; IR thermogram; CCD images; data fusion; stereo-correlation; digital images; inverse analysis; energy balance; diffusive analytical models; source localization; source tracking; characterization ; thermo-mechanical properties;

Details upon illustration 2 : Main principles



- Images of superficial fields: examples: visible (2CCD), infrared, deformed solid CAD mesh, non-exhaustive list
- projectors P_i projecting the superficial CAD mesh of the solid on plans and layers in use for the measurement
 - P_1 and P_2 : kinematic field
 - P_3 : superficial energy field
- energy source point P_s (overloaded point of the solid)
 - diffusing heat energy in surrounding space under isotropic mode in the neighborhood (sub-micronic scale – spheroidal model)
 - originating the upcoming mode directional flux that will reach the outer surface of the solid, through :
 - a diffusive conic domain (eventually several succeeding in case of stratified material)
 - whose fraction of emitted flux that reaches the surface generates a "polychrome" spot (de facto with non-uniform energy density)
 - dynamic follow up of the superficial trace development (shape, profile, energetic profile and associated kinematics)
 - base for localization, follow up, characterization of the source
 - reverse tracking of the flux propagation in order to locate the original source
 - usage of dynamic redundant information for the source monitoring
 - usage of various dynamic redundant information for characterizing and valuing the degree of irréversibility of the state transformation of the source zone

Study title: Multi-scale and multi-instrumented dynamic localization of energy sources in a solid mechanical loading - Characterization and evaluation of initial damage.

Research project description :

Context and methods:

The reliability of structures depends on their history and the one of their constitutive elements. Predicting the occurrence of damages and preventing their evolution remains a crucial issue that design, modeling and simulation fulfill to a large extent. The experimental approach, although complex and expensive, remains necessary because of the limits of the available models, the variability and the thinness of the damage indices accessible in an element during its life cycle. Field measurements open up new perspectives in this context. Thus, kinematic field measurements by digital image correlation were thus used to identify fields of properties and constitutive parameters of anisotropic damage laws during inhomogeneous tests. On the other hand, the methods based on the flux radiated by the surfaces are attractive, because often flexible and fast and of wide harmlessness upon the objects of studies. They also make it possible to operate at different scales of interest, without contact, and under representative loading conditions. By inverse methods, thermal measurements by infrared thermography currently give access to heat sources and thermal properties. Their advection by means of image correlation measurements makes it possible to envisage carrying out energy balances at different scales, in particular at structure and micro-structure scale.

Thesis subject:

The aim of the thesis is to propose experimental methods and the associated numerical treatments for coupled measurements of kinematic and thermal fields performed at different scales during a single mechanical test. The measurements should give access to the local energy dissipation, and potentially, the location of its source and the evaluation of its evolution.

Firstly, a bibliographic study on the thermo-mechanical behavior of materials, the mechanisms of damage, their thermodynamic modeling, the inverse methods in use and the correlation between thermal and kinematic field measurements will be carried out. An original analytical model of the energy diffusion evaluated by the IR sensor is targeted. It will be tested at various scales for inverse identification of the heat source and its dynamic tracking. After validation, an experimental protocol implementing coupled thermal and kinematic measurements will be created. Multi-instrumented tests will be performed and analyzed. The mapping using the finite elements model will bring closer the mechanical and thermal dynamics. The calculation of the heat dissipation and the quantitative and dynamic monitoring of its origin aims to try to discriminate and evaluate the mechanisms of local damage.