



Institut Mines-Télécom

**COLLOQUE IMT**

**23 MARS 2023**

**CAMPUS REGION DU NUMERIQUE  
CHARBONNIERES**

**PROCÉDÉS AVANCÉS**



**NUMÉRISATION  
DES PROCÉDÉS**

# PANORAMA DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

C. DESRAYAUD  
C. PERSON

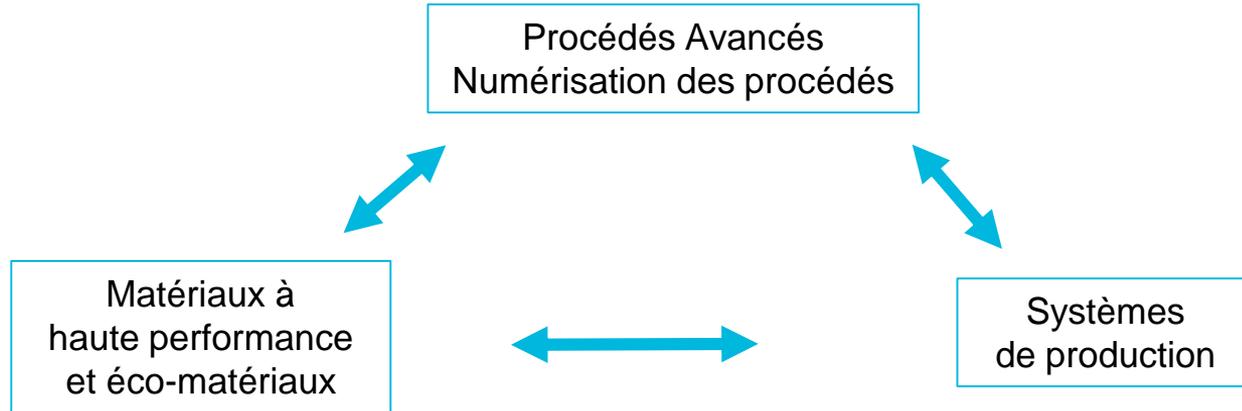
# SOMMAIRE

## INTRODUCTION

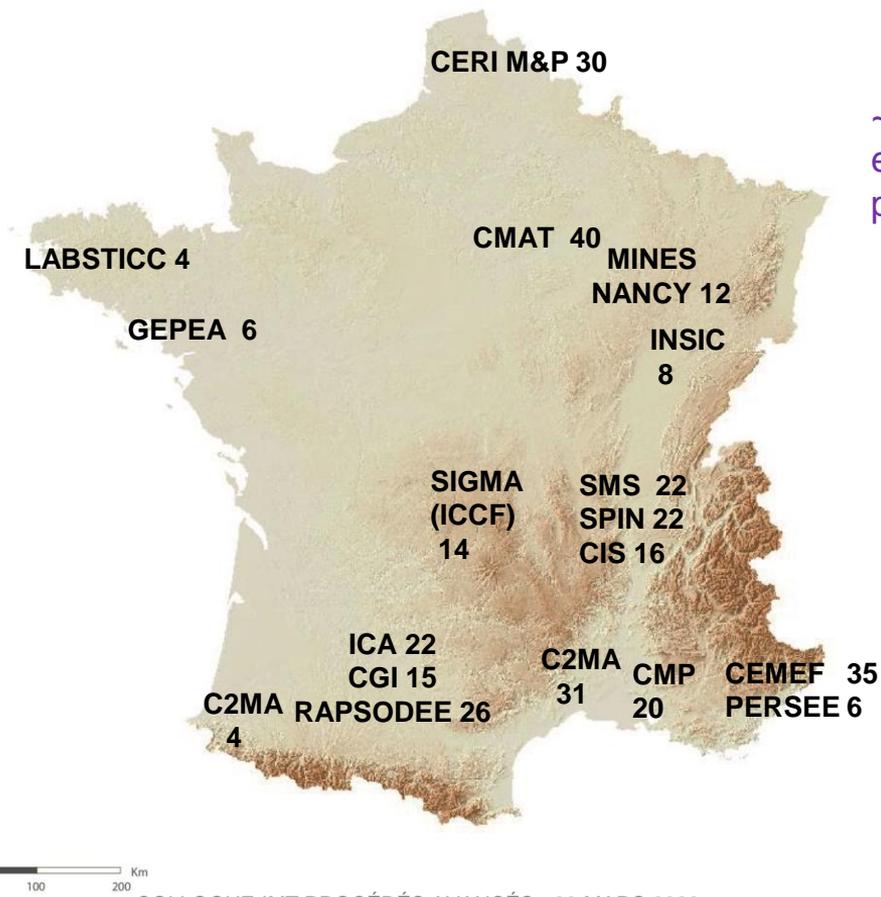
1. OPTIMISATION MULTI-CRITÈRES DES PROCÉDÉS
2. CONTRÔLE DES PROCÉDÉS, FLUX ET TRAITEMENT DES DONNÉES
3. MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE, UNE BRIQUE DU JUMEAU NUMERIQUE

## CONCLUSION

## Enjeux des Transformations Industrielles



Mécanique, chimie, matériaux, procédés,  
modélisation continue / discrète des systèmes et des organisations  
Environnement, ressources, économie circulaire  
Gestion, économie, finances...



~310 chercheurs et enseignants chercheurs permanents

### Positionnement – enjeux

#### ➤ Enjeux croissants

- Maîtrise, stabilité des procédés, spécifications des caractéristiques des composants et produits
- Impératifs Développement durable, mise en place économie circulaire
  - Préservation des ressources
  - et maîtrise des approvisionnements
- Crise actuelle et à venir liées à la nécessité de sobriété énergétique des procédés

#### ➤ Dimension numérique des procédés pour construction du jumeau numérique

- Suivi des procédés Instrumentation et génération de données massives
- Gestion, Analyse interprétation des données capteurs en lien avec la performance du procédé
- Modélisation multiphysique pour optimisation et compréhension

# OPTIMISATION MULTICRITERE DES PROCEDES

## Chaine du solide - Procédés de génération et transformation de la poudre



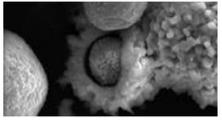
Cristalliseur, tambour tournant froid, four tournant  
IMT - Mines Saint-Étienne , SPIN LGF

Extrudeuse  
IMT Mines Albi - RAPSODEE

- **Pilotes instrumentés sur la génération et transformation de la poudre en « batch », « semi batch » ou « en continu »**
- **Pilotes de dimension industrielle pour accéder à des dimensions permettant « l'analogie » au sens de la mécanique des fluides**



Médicaments



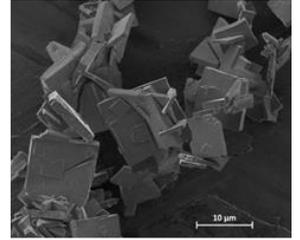
Poudre métallique



Hydrates de méthane



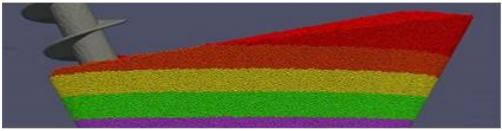
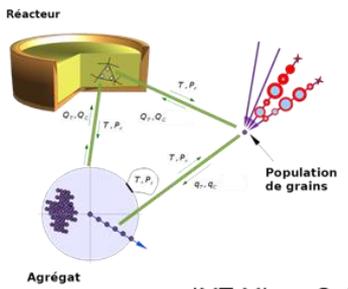
Terres rares



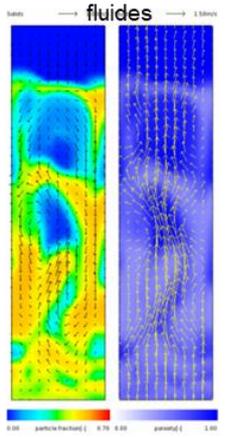
Oxalate d'uranium  
U(C2O4)2.6H2O

**Couplage de :**

- Cinétique chimique hétérogène
- Ecoulement granulaire DEM, SPH, LBM
- Dynamique des fluides CFD
- Thermique



Modèle Euler-Euler  
= modèle à 2



IMT-Mines Saint-Étienne, Centre SPIN Laboratoire Georges Friedel  
IMT Mines Albi, laboratoire RAPSODEE

## Procédés de retraitement des déchets pour récupération d'énergie



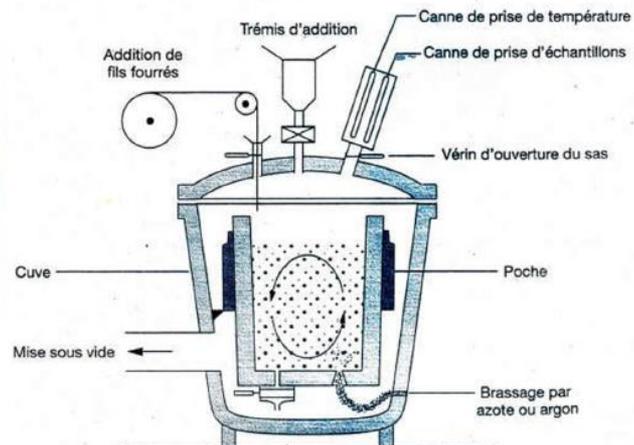
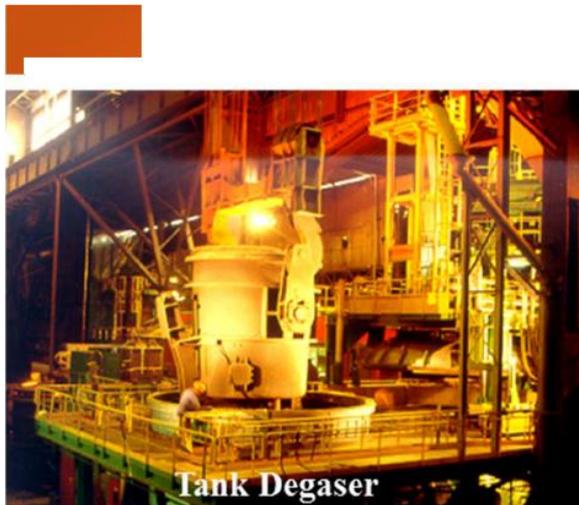
Laboratoire GEPEA IMT Atlantique

Combustion contrôlée :

- Robustesse du procédés (variabilité des déchets)
- Limitation des émissions
- Rendement de récupération (type turbines)

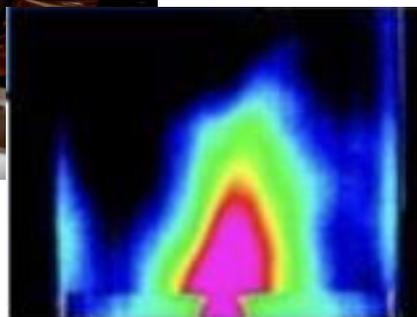
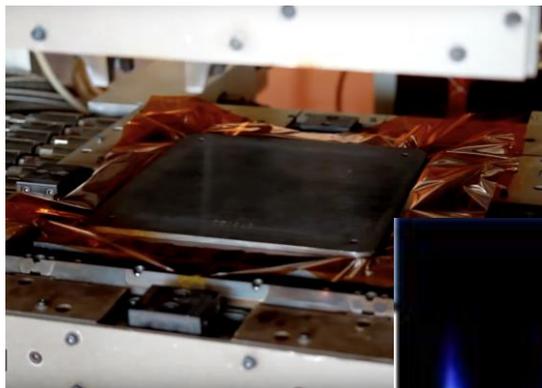
*Illustration d'une des dimensions DD et RSE des procédés*

## L'élaboration des aciers, métallurgie en poche

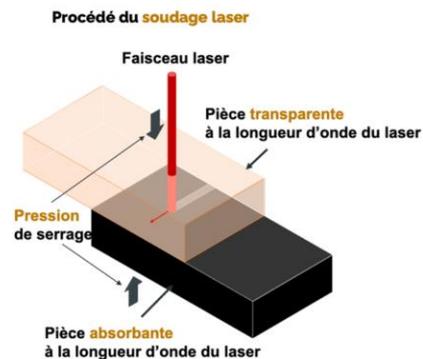


**Les bulles de gaz assurent le brassage du liquide et la flottation des inclusions**

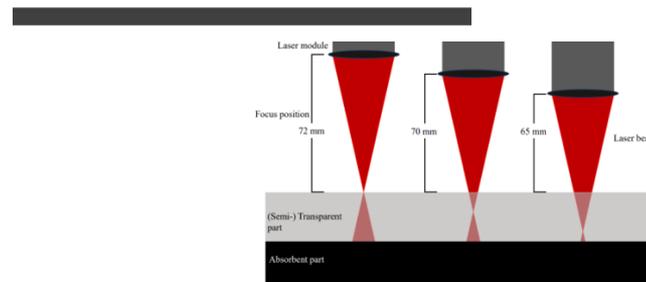
Mise en œuvre des composites et / ou des polymères



Plateforme MIMAUSA  
Élaboration de composites IMT Mines Albi - ICA  
Contrôle thermique des étapes de cuisson



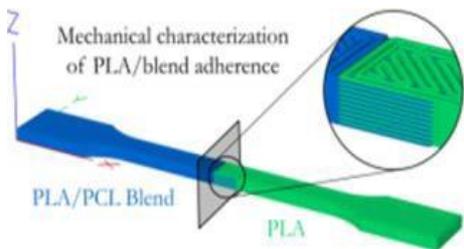
Soudage de matériaux thermoplastique  
IMT Nord Europe - CERI  
MP



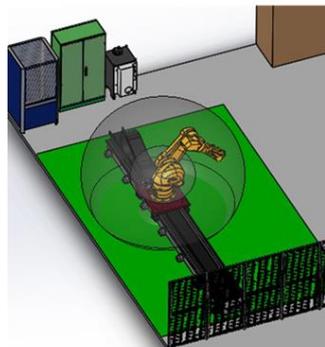
Maîtrise et contrôle des sources d'énergie dans les procédés en général  
Laser : caustique et position de la focale

## Dépôt de fil fondu polymère / composite

Impression 3D FDM Shareboot  
IIMT Mines Alès



*Adhérence entre couches*



Plateforme LASCALA  
[Large SCALE plAstics & composites 3D printing]  
IIMT Nord Europe - CERI MP



Plateforme d'impression 3D à grande échelle IMT Nord Europe



Pièce de carrosserie à grande échelle

## Contrôle et programmation robotique SIGMA Clermont

Chaîne numérique complète pour des opérations de perçage et ébavurage (trajectoires sous CATIA, postprocessing RoboDK, usinage sur pièces réelles)



Gestion des rigidités

Soudage robotisé avec programmation par apprentissage et tests des paramètres du procédé

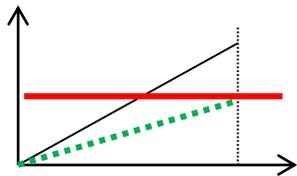
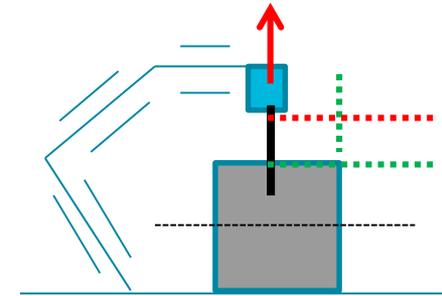
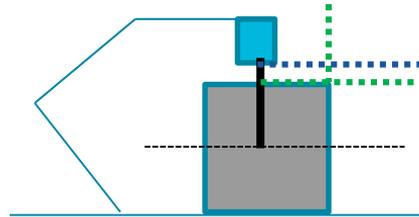
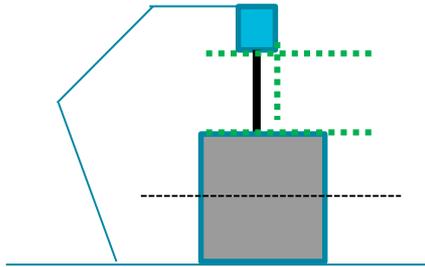


Gestion des trajectoires de dépôt

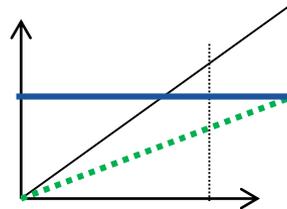


Les temps caractéristiques de la « mesure », de la « réaction » et de « l'apprentissage »

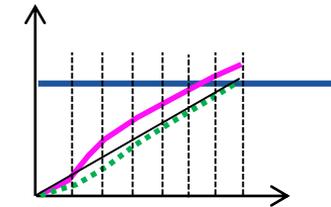
Exemple schématique sur un robot de perçage



consigne de déplacement souhaité  
mesure de l'erreur a posteriori

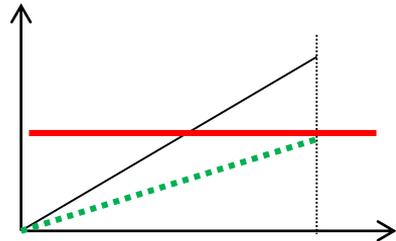


Correction consigne pour  
compenser l'erreur avec un  
autre essai

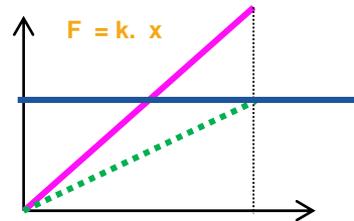


Modification en **temps réel** de la consigne on crée la  
**demande**  
pour contrer l'erreur de déplacement  
**demande = cons + P \*(cons - mesure)**  
**apprentissage de la valeur de P (prop. digitale)**

Les temps caractéristiques de la « mesure », de la « réaction » et de « l'apprentissage »



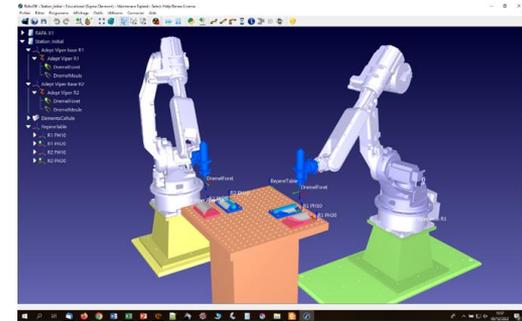
**consigne** de déplacement  
souhaité  
mesure de l'erreur a posteriori



Définition de la demande  
 $d = \text{consigne} - F / k$   
 $F = k \cdot x$  : modèle simplifié  
paramétrable (valeur de  $k$ )

1) On peut définir  $k$  en nourrissant le modèle par résultats d'expériences de flexion sous charge du robot

2) on peut modéliser le robot par un modèle mécanique complet sans paramètre à régler  
C'est le jumeau numérique complet du robot



Sigma Clermont Ferrand

Les temps caractéristiques de la « mesure », de la « réaction » et de « l'apprentissage »

Mesure de déplacement : scalaire et explicite

Si capteur = caméra : données vectorielles massives et signification implicite du signal.

Association du signal mesuré avec bon fonctionnement / ou dérive du procédé

Les données deviennent massives, il faut alors : 1) les transférer et les stocker

2) chercher le signal intéressant - 3) l'interpréter par apprentissage implicite

4) l'utiliser pour faire un feed back de correction sur le procédé et le contrôler

Données massives  
à gérer

Apprentissage  
Interprétation des signaux

Règles de fonctionnement  
du jumeau numérique

# 1. : OPTIMISATION MULTICRITERE DES PROCEDES

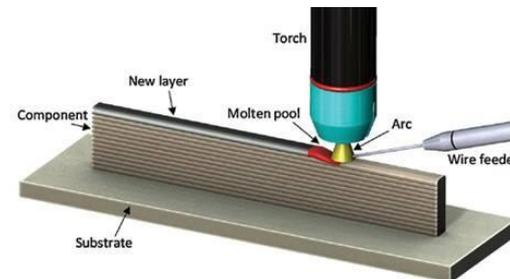
Dépôt de fil fondu métallique : maîtrise des contraintes résiduelles, précision géométriques..



Plateforme WAAM Mines Saint-Étienne  
Fabrication Additive TIG  
Dépôt de fil fondu par arc électrique



Pièce  
démonstration  
FormNext 2023



Principe du procédé WAAM



Packaging de pièces de géométrie complexe  
CIRTES Saint-Dié INSIC

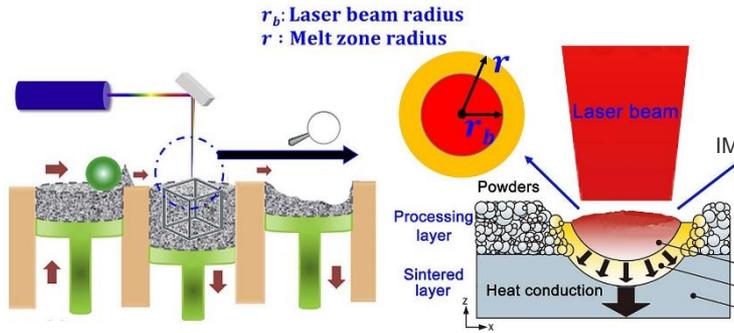
**Besoin évident de données en continue  
Sur les procédés de fabrication (additive y  
compris)**

**P.ex. Stockage permanent des données de  
puissances amenées  
Transfert et gestion et analyse à prévoir**

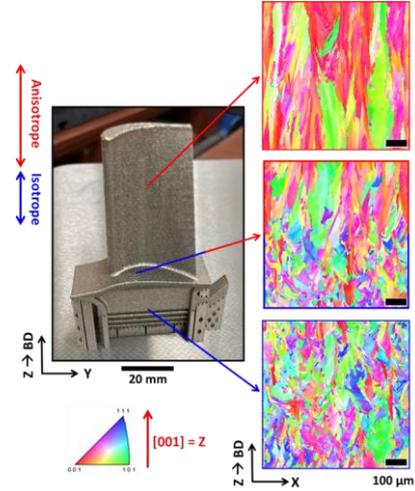
Fabrication additive de poudres métalliques : qualité matière, surface et précision géométrique



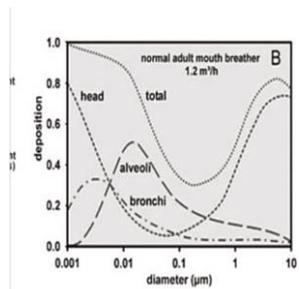
Plateforme fabrication additive  
Fusion Laser Lit de Poudre (SLM 280)  
IMT Mines Albi - ICA - Plateforme MIMAUSA



Importance de la maîtrise faisceau  
Laser SHAPING  
IMT Atlantique Plateforme ARAGO



Aube de turbine Inconel 718  
Mines Paris - CMAT



Dimension HSE Fabrication additive  
IMT Mines Saint-Étienne Centre CIS

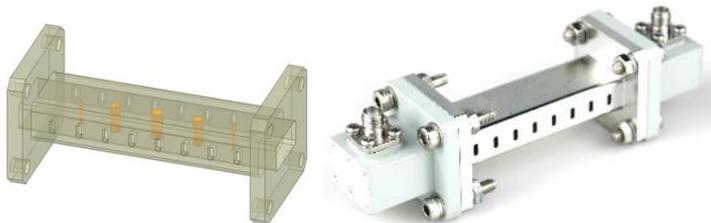


Impression 3D « Saint-Étienne »  
IMT - Mines Saint-Étienne SMS, ENISE-ECL



## Élaboration des céramiques : traitement thermique, densification par Cuisson micro-onde

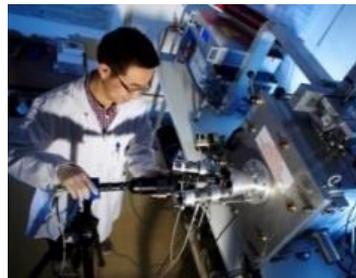
Optimisation géométrique et surfacique  
de composants de guide d'onde  
IMT Atlantique



Fabrication de la cavité par technologie PLLP (fusion laser lit de poudre)

- Sobriété énergétique  
permittivité des micro-ondes dans les céramiques très élevée  
Taux de chauffage plus élevé que par conduction
- Homogénéité plus grande

Densification de céramique par procédés micro-onde  
Mines Saint-Étienne IMT



Sobriété des procédés, raccourcissement des cycles de chauffe limitation  
des gradients internes par rapport aux technologies classiques

- Contrôle du couplage délicat (en fonction de la température)
- mesure de température par contact délicate

**CONTRÔLE DES  
PROCÉDÉS**

**FLUX ET TRAITEMENTS  
DES DONNÉES**

**Réal**  
**OBSERVATEURS**  
**#Capteurs**



**PILOTES**  
**#PowdersAndGrains**

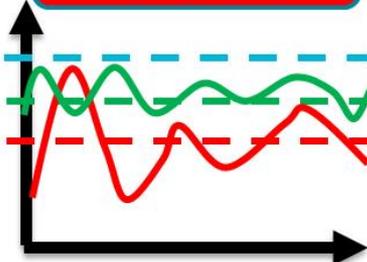


**Digital**

Flux d'informations

SOLUTIONS COMMUNICANTES  
#DIWII

Consigne/ Rétroaction

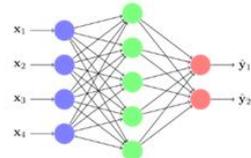


**Numérique**  
analytique

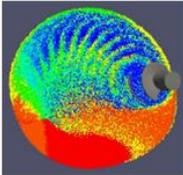
Force (F) = m x a

mass  
acceleration

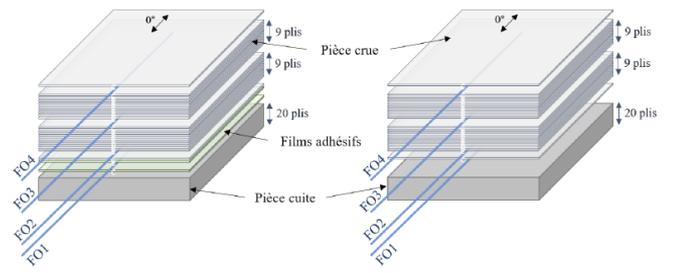
statistique



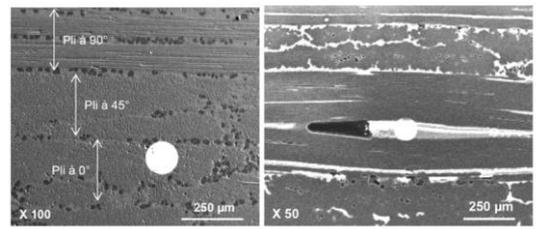
Jumeaux



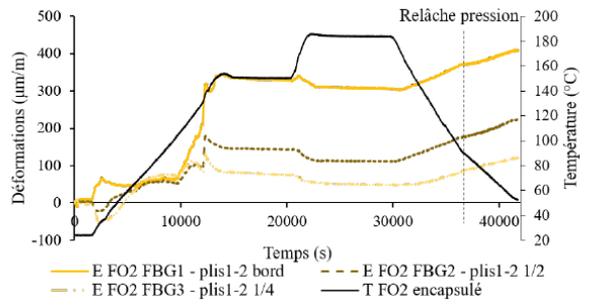
### Suivi de cuisson des composite par insertion de fibre optique gravées FBG (fibre à réseaux de Bragg) IMT Albi ICA



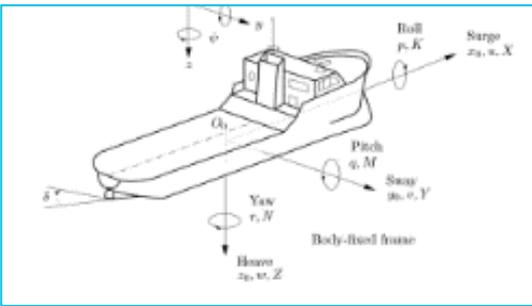
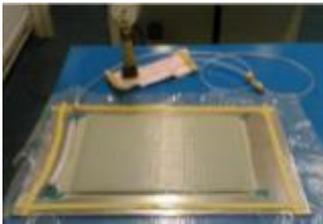
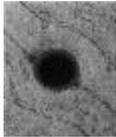
#### Principe et orientation des fibres optiques dans les plis



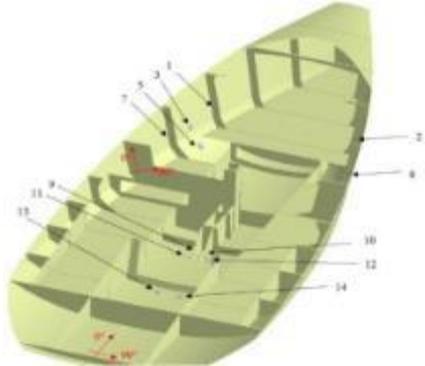
#### Suivi pendant la cuisson des déformation des plis (déformation des réseaux de Bragg) IMT Mines Albi -Plateforme MIMAUSA - ICA



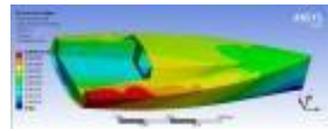
### Instrumentation permanente par FBG (fibre à réseaux de Bragg) de structure navale Projet NESSIE : IMT Mines Albi - ICA et IMT Mines Alès - PCH



Bateau : Alfred Merlin



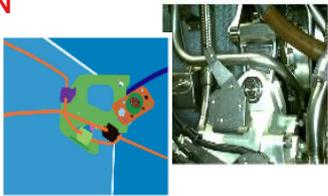
Infusion de plaques composites avec FDB intégrées



Suivi des déformations des navires par instrumentation fibres optiques (FBG)

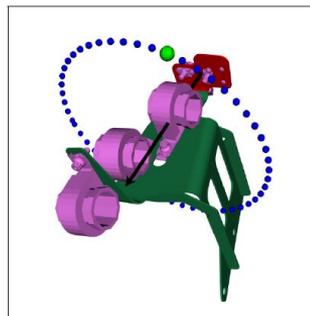
Suivi visuel des procédés de fabrication Assemblage, associé au jumeau numérique du système fabriqué : IMT Mines Albi - ICA

INSPECTION 4.0

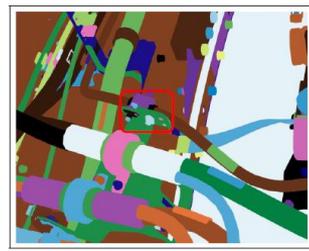


[Ben Abdallah et al. 2019]

LAB COMM DIOTA - ICA



(a)



Création d'un outil d'assistance pour l'inspection avec guide de positionnement de l'opérateur : composant à inspecter dans le cadre rouge.

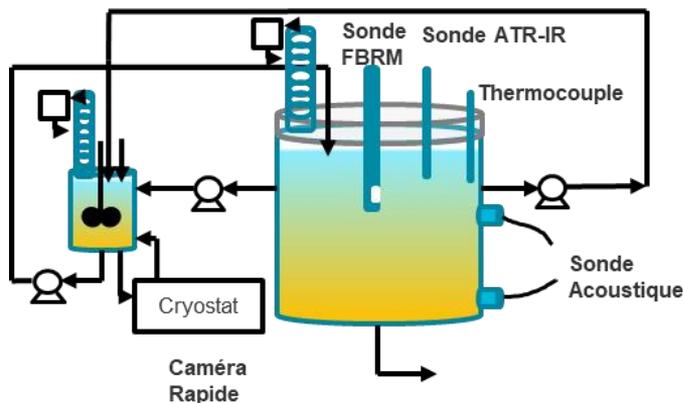
Utilisation d'outils de réalité augmentée pour vérification du procédé de fabrication  
Optimisation des angles et points de prise de vue idéaux  
Pour observation du composant visé (cadre rouge)



## Suivi des procédés de cristallisation. Instrumentation et contrôle du procédé

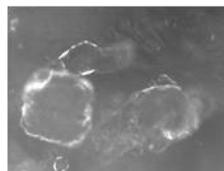
OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA CONCEPTION, LE PILOTAGE ET L'OPTIMISATION D'UN PROCÉDÉ DE CRISTALLISATION

Projet Carnot 2022 IMT-MSE, IMT Mines Albi, Mines ParisTech-CTP



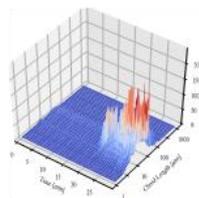
## Forme des cristaux

Microscope

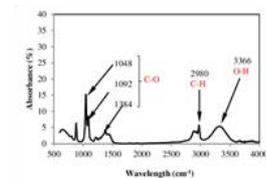


## Taille et nombre des cristaux

Granulomètre

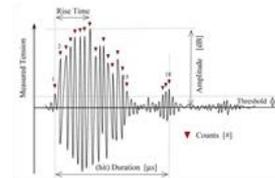
Composition  
Pureté des phases

Raman  
ATR-IR



## Suivi du procédé

Emission acoustique

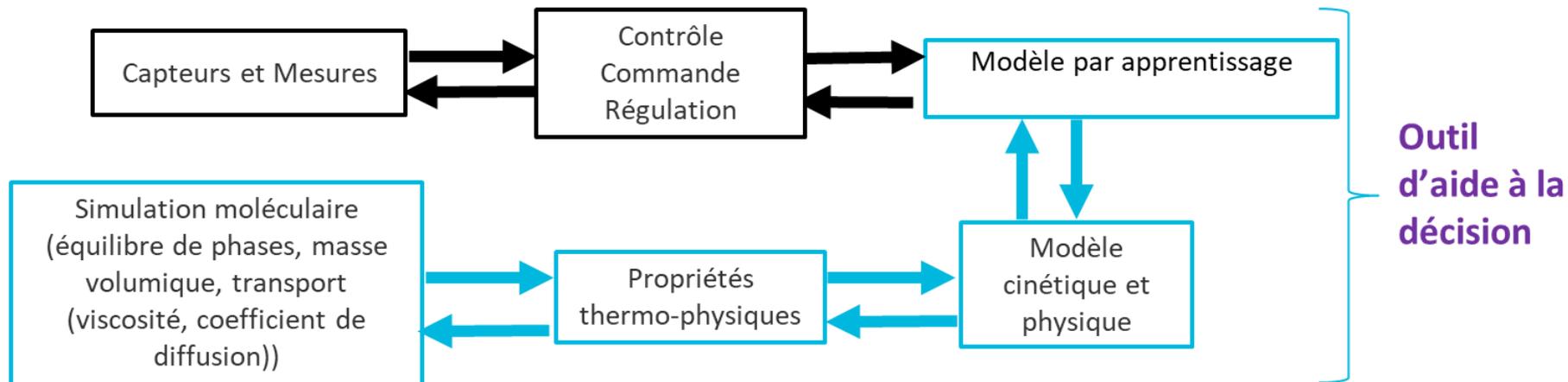


- Contrôle de l'état d'avancement de la réaction en cours de procédé
- Cinétiques de cristallisation déduite du modèle hybride
- Prédiction de saturation du milieu par les cristaux

## Suivi des procédés de cristallisation. Instrumentation et contrôle du procédé

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA CONCEPTION, LE PILOTAGE ET L'OPTIMISATION D'UN PROCÉDÉ DE CRISTALLISATION

Projet Carnot 2022-2025 : IMT-MSE, IMT Mines Albi, Mines ParisTech - CTP



**Modèle hybride basé sur thermocinétique et bilans matière et population  
Et entraîné par l'analyse des données acquises : apprentissage**

# MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE

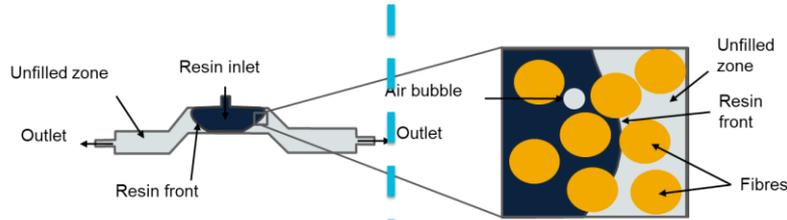
## UNE BRIQUE DU JUMENTAU NUMERIQUE

# Simulation numérique des procédés d'infusion de composites

Connaissance précise des propriétés physiques des matériaux

Projet JCJC MISSA  
IMT Nord Europe - CERI MP

Chaire Hexcel IMT - MSE - Centre SMS



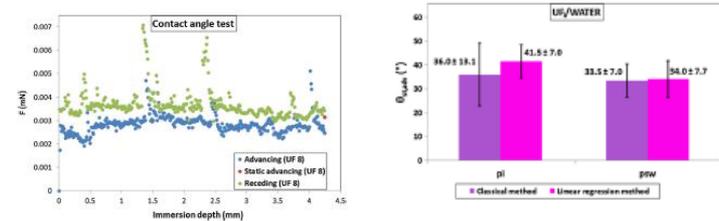
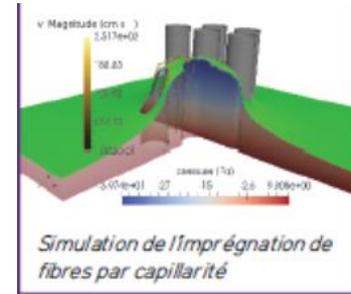
Coarse scale  
From 1cm to several meters

Fine scale  
From 1µm to 1mm

- Part or mold FE model
- Boundary conditions well known
- No heterogeneity
- Flow equations?

- Representative Volume Element (RVE) Finite Element (FE) model
- Two-phase flow equations well known (Navier-Stokes + surface tension)
- Heterogeneity (fibres)
- Boundary conditions?

Principle of Multiscale Virtual Power (FExFE computational homogenization)

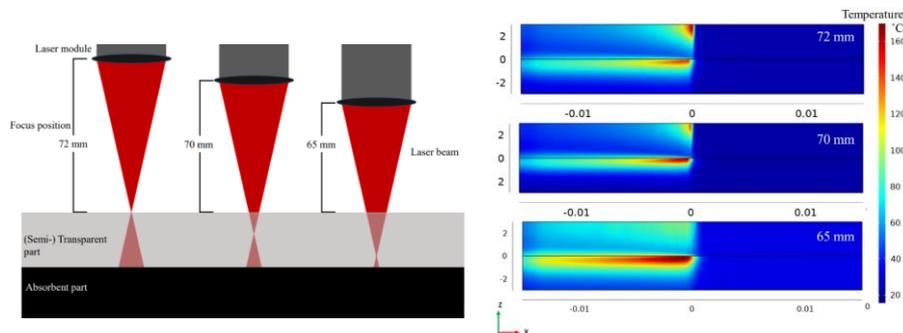


Caractérisation mouillabilité des fibres

# Simulation numérique de procédés laser

## Connaissance précise des sources d'énergie

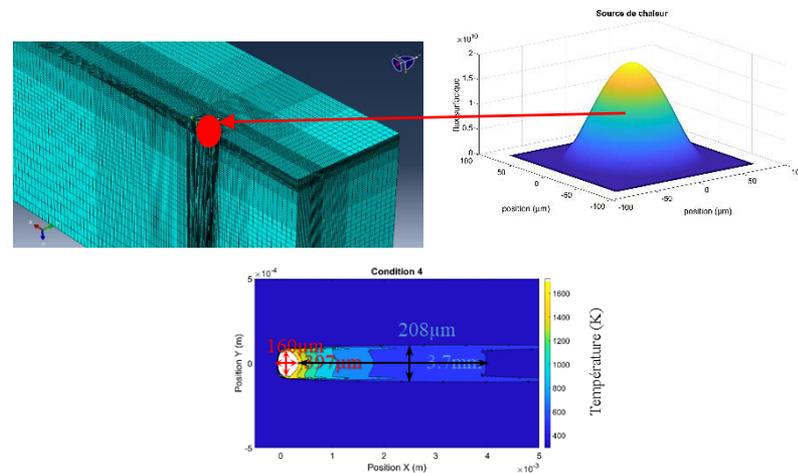
Soudage laser polymères / composite IMT Nord Europe



Prise en compte de la forme de la caustique  
 Position focale longueur de Raylay  
 Répartition volumique / surfacique de la densité de puissance

Contrôle de la stabilité de la source  
 génération de données de suivi massives

Fabrication additive Fusion lit de poudre  
 Approche thermo-fluide (IMT- MSE)



Prise en compte de la taille et de la forme de la distribution de puissance du spot laser

## Simulation numérique des procédés : thermique des écoulements liquides et granulaires

Écoulement dans une buse d'injection polymère  
fabrication de fils FDM  
IMT Mines Alès

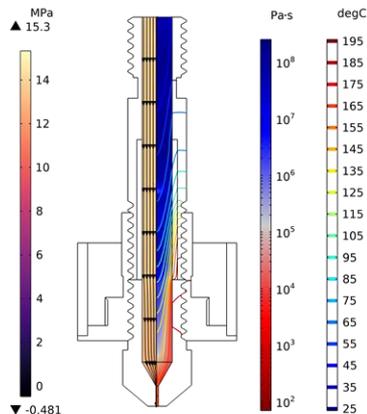
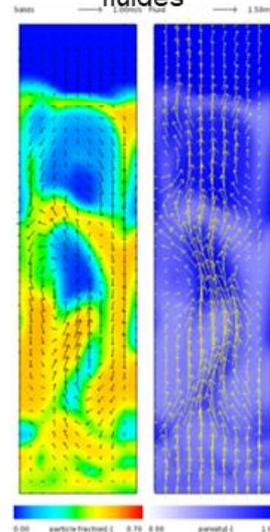
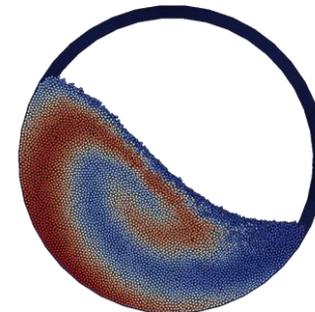


Figure 4. Simulation results 60 s after reaching  $T_{set} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Left: velocity streamlines overlaying the pressure field  
Right: isotherms overlaying viscosity distribution

Modèle Euler-Euler  
= modèle à 2  
fluides



Aspects Mécanique +  
thermique  
Four tournant

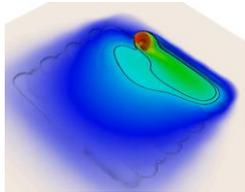


- Simulation couplée DEM + CFD
- Transferts thermiques, extrapolation
- IMT MSE Centre SPIN

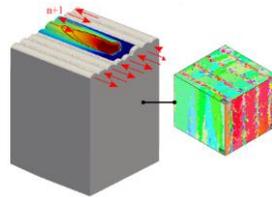
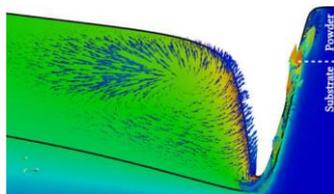
# Simulation numérique des procédés de Fabrication Additive

Mines Paris CEMEF

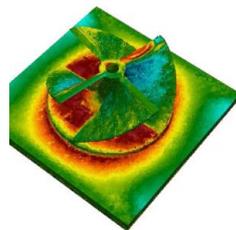
## Procédé LPBF



Mise en évidence du mode de Keyhole  
(similaire au soudage laser)

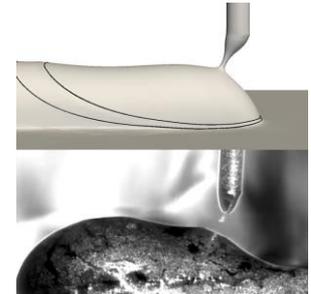
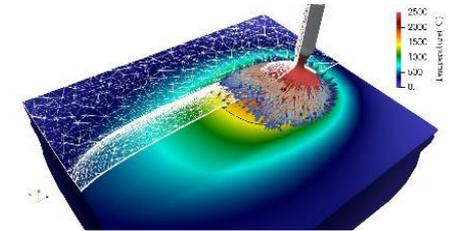


Agrégation du modèle micro  
Calcul des contraintes résiduelles  
en macroscopique



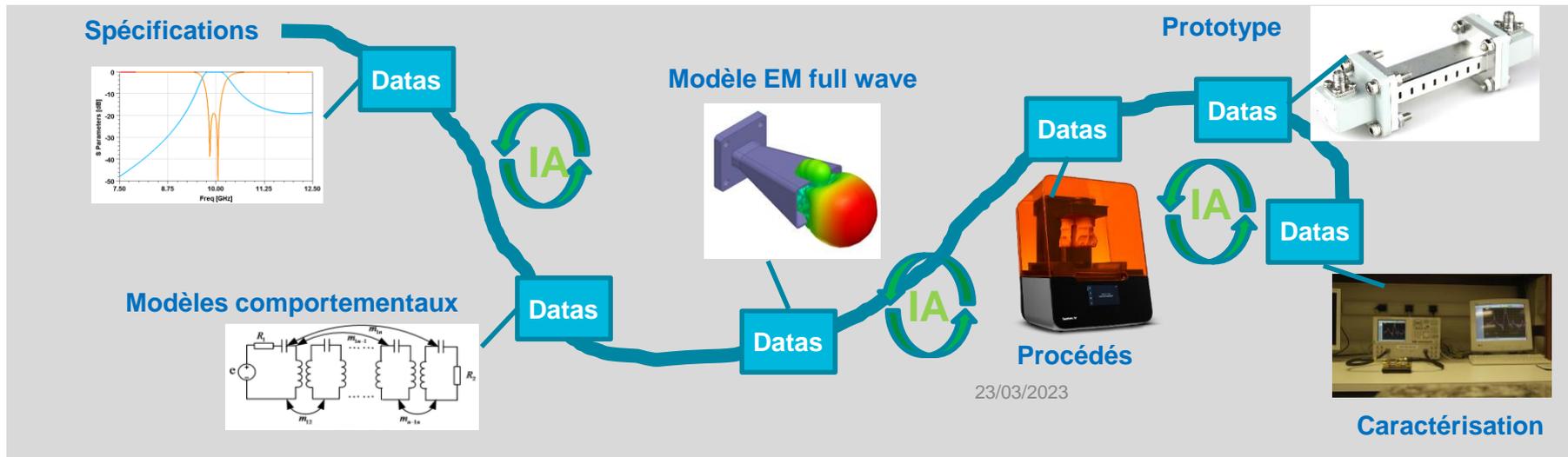
- Écoulements en zone fondue
- Modèles de solidification rapide
- Formation de la structure de grains
- Thermomécanique : fissuration, contraintes résiduelles, comportement
- Échelle cordons / échelle pièce

## Procédé WAAM



- Précision des champs d'état dans la matière
- Réflexion sur la réduction des modèles complets pour une utilisation de contrôle

## Innovation : Flot de conception hybride : entre IA, Algo génétique et Optimisation



IA appliquée à la **modélisation** et à l'**optimisation** de dispositifs micro-ondes

# SYNTHÈSE & CONCLUSION

- Éventail très large de procédés et de thématiques d'études dans les écoles IMT
- Motivation par la demande industrielle  
SAFRAN,FRAMATOME, ORANO, THALES, CONSTELLIUM, ARCELORMITTAL, SAINT-GOBAIN, STELLANTIS, RENAULT, SIEMENS
- Thématiques scientifiques nombreuses à diffusion large, académique et sociétale
- En partenariat avec les acteurs académiques nationaux et internationaux  
Universités Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Nantes, Lorraine, Strasbourg, Grenoble, ENSAM-ECAM-ICAM, EC'S, INP'S, UTT'S, INSA'S, ENSI'S,
- Soutenue par  
les tutelles MINEFI, MESRI et financement nationaux ANR et internationaux EUROPE  
les structurations régionales et nationales pôles de compétitivité  
AXELERA, CIMES, EMC2, ASTECH, MINALOGIC, MATERALIA, EURAMATERIAL, AEROSPACE VALLEY, XYLOFUTUR.....

## Étude des procédés

- Champ multidisciplinaire
- Appel à des outils expérimentaux et numériques pour :  
acquisitions de mesures, outils de contrôle et modélisation du procédé
- La notion de jumeau numérique se retrouve dans la possibilité de contrôle du procédé couplé au modèle numérique et permet l'apprentissage par l'erreur mesurée « explicitement » ou « implicitement »
- Le contrôle peut s'effectuer dans des temps caractéristiques très variables selon la complexité des données acquises et des modèles du procédé.
- La limitation des procédures de contrôle se retrouve aussi dans la gestion des données massives et des outils nécessaires pour les traiter, les interpréter et les utiliser pour la modifications des paramètres procédés.