
Des jumeaux virtuels aux jumeaux hybrides

N. Hascoët – Prof. F. Chinesta

1^{er} juillet 2019

Sommaire

- Introduction

Jumeaux virtuels, numériques et hybrides

- Réduction de modèle

SVD, POD, PGD

- Apprentissage par ordinateur

Clustering, classification, régression

- Imagerie

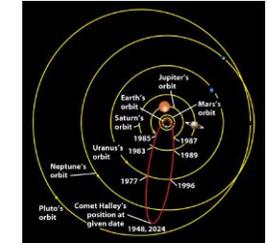
Reconnaissance d'objet

Modèles et connaissance

Modèles à partir de l'observation

Comète de Halley, 1758

Observation à Babylone en -164



Modèles à partir des mesures

Formule de la chute libre,
Galilée, 1589-92



$t = 1$	\rightarrow	$\Delta x = 1$	\rightarrow	$x = 1$
$t = 2$	\rightarrow	$\Delta x = 3$	\rightarrow	$x = 4$
$t = 3$	\rightarrow	$\Delta x = 5$	\rightarrow	$x = 9$
$t = 4$	\rightarrow	$\Delta x = 7$	\rightarrow	$x = 16$

Modèles à partir d'équations

2^e loi de Newton, 1687

$$F_{\text{résultante}} = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Contexte industriel

$$\mathcal{L}(u(x, t; \boldsymbol{\mu})) = \mathcal{F}(x, t; \boldsymbol{\eta})$$

+ Conditions aux limites : $(x, t; \boldsymbol{\xi})$

Calibration des
données : $\boldsymbol{\mu}$



Processus :
 $\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}$



$$u(x, t) \approx \sum_i^N U_i(t) N_i(t)$$

→

$$\mathbb{K}U = F$$

Contexte industriel

$\mathcal{L}(u(x, t)) = \mathcal{F}(x, t)$ un modèle $u(x, t)$ s'appliquant sur un domaine Ω

CONTINU avec les paramètres $\begin{cases} \mu \rightarrow \mathcal{L} & \text{(matériau)} \\ \eta \rightarrow \mathcal{F} & \text{(charge)} \\ \chi \rightarrow \Omega & \text{(géométrie)} \end{cases}$

Mathématiques appliquées \Rightarrow DISCRÉTISATION $\mathbb{L} \cdot \mathbb{U} = \mathbb{F}$

Modèle physique $(\mu, \eta, \chi) \rightarrow u(x, t) = \sum_i U_i(t) N_i(t)$

Jumeaux virtuels

$$\mathcal{L}(u(x, t)) = \mathcal{F}(x, t)$$

INGÉNIERIE CLASSIQUE ET ÉPROUVÉE

→ Modèle calibré nominal
→ Charge nominale

JUMENT VIRTUEL

DESIGN
(nominal)
en production



Jumeaux virtuels

$$\mathcal{L}(u(x, t)) = \mathcal{F}(x, t)$$

Solution à partir de MODÈLES PHYSIQUES et d'équations MATHÉMATIQUES

Modèle paramétrique DÉTERMINISTE

Peut DIVERGER par rapport à la réalité

Calcul CHRONOPHAGE

Jumeaux numériques

MO = I

PRISE DE DÉCISION TEMPS-RÉEL



→ Modèle calibré nominal
→ Charge nominale

JUMENTU VIRTUEL

DESIGN
(nominal)
en production

Data :
INPUTS
VS
OUTPUTS

APPRENTISSAGE

Deep Learning,
Tensor Learning,
Apprentissage par dictionnaire,
Manifold Learning,
Régression linéaires ou non,
Identification sparse,
Dynamic Mode Decomposition,
Opérateurs orientés par les données

JUMENTU
NUMÉRIQUE
(online)
 $\mathcal{O}(\mathcal{J})$

Jumeaux numériques

$MO = I$

Simulation à partir de **DONNÉES**

- Apprentissage **OFFLINE**
- Décision et prédiction **ONLINE**

Utilisation de méthodes **ML** pour relier un **RÉSULTAT** à une **ENTRÉE**

Fortement dépendant des données et influencé par le **BRUIT**

Jumeaux hybrides

$$A(X, t, \mu) + B(X, t)$$

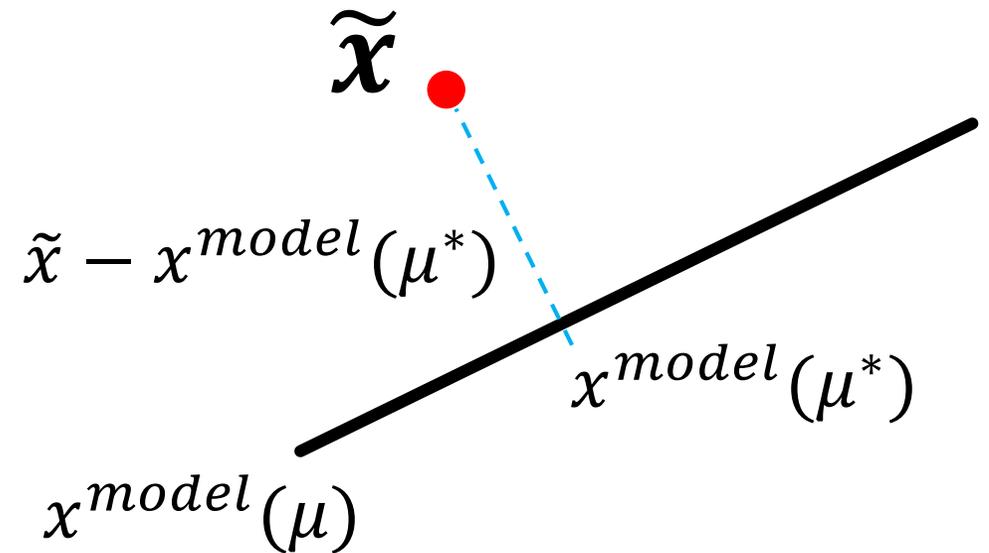


JUMEAU HYBRIDE

MODÈLE PARAMÉTRIQUE $x^{model}(\mu)$

IGNORANCE $\tilde{x} - x^{model}(\mu^*)$

- s'appuyant sur les données
- modèle divergent



Jumeaux hybrides

$$A(X, t, \mu) + B(X, t)$$

L'**IGNORANCE** : pour un point donné \exists différence entre simulation et réalité

Création d'un **MODÈLE** de l'ignorance :

$$\dot{X} = A(X, t, \mu) + B(X, t) + C(X) + N$$

↑
Modèle paramétrique
déterministe

↑
Correction par
les données

↑
Contrôle

↑
Bruit

Très **PEU DE DONNÉES** pour créer le modèle $B(X, t)$

Jumeaux hybrides

$$A(X, t, \mu) + B(X, t)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = A(X, t, \mu) + B(X, t) + C(X) + N \\ Y = D(X) + N' \\ Z = G(X) + N'' \end{array} \right\} \text{ Mesures bruitées}$$

Si le modèle physique est suffisamment **EXACT**, la déviation reste **PETITE** et le modèle de données associées reste (presque) **LINÉAIRE**.

Peu de données suffisent pour définir le modèle de correction.

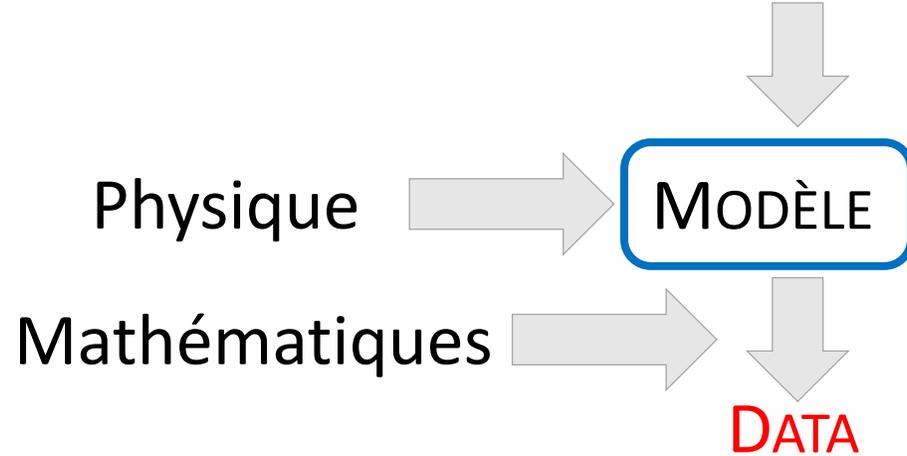
LA DONNÉE COÛTE CHER À COLLECTER ET À ASSIMILER.

Jumeaux hybrides

$$A(X, t, \mu) + B(X, t)$$

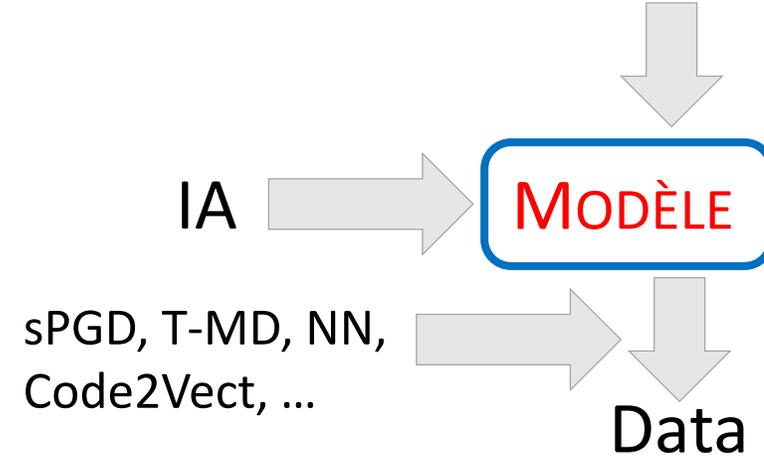
PHYSIQUE DES DONNÉES & MODÉLISATION PAR LA DONNÉE

Données paramètres



Temps réel grâce à la PGD

Prédictions/écarts



Temps réel et peu de données

JUMEAU HYBRIDE

Les attentes

- Simulation en temps réel
- Calibration en temps réel
- Assimilation des données en temps réel
- Complétion des données en temps réel
- Analyse de données en temps réel
- Modélisation de données en temps réel
- Prise de décision en temps réel

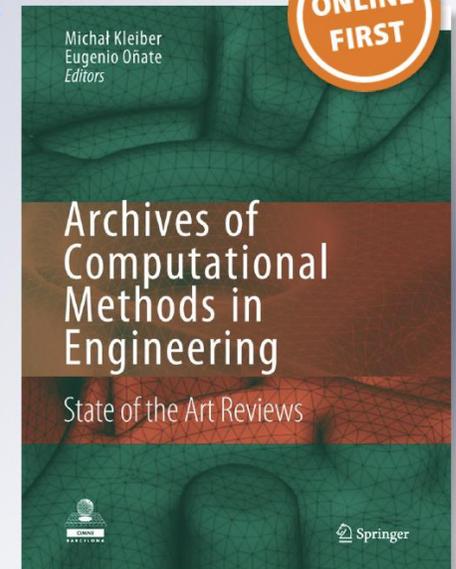
Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data

**Francisco Chinesta, Elias Cueto,
Emmanuelle Abisset-Chavanne, Jean
Louis Duval & Fouad El Khaldi**

**Archives of Computational Methods
in Engineering**
State of the Art Reviews

ISSN 1134-3060

Arch Computat Methods Eng
DOI 10.1007/s11831-018-9301-4



 Springer

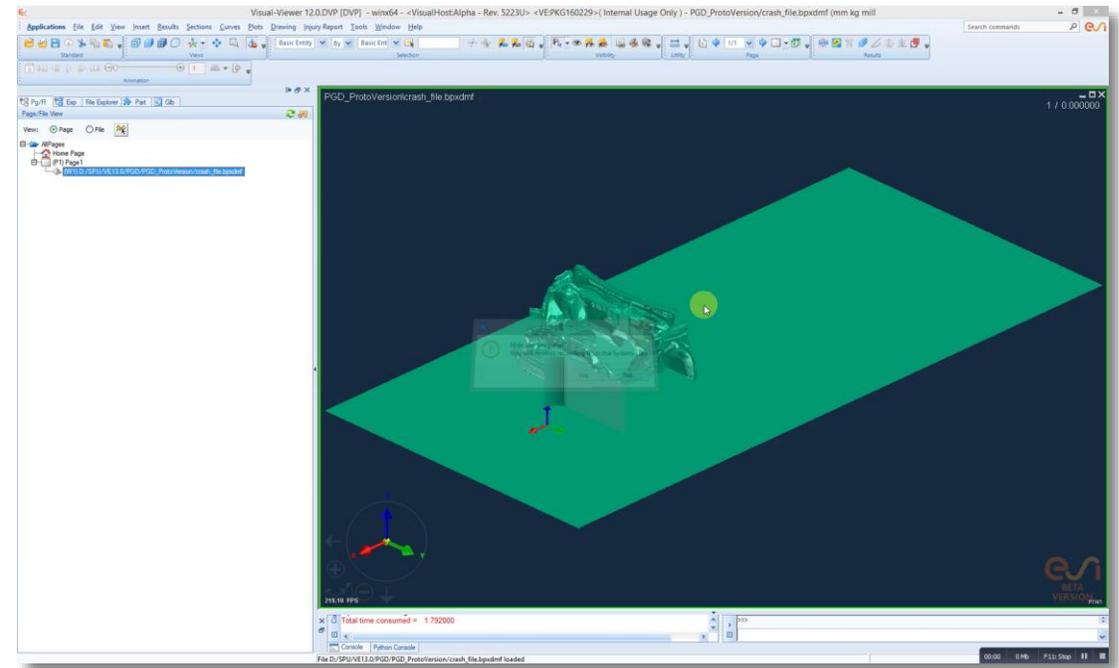
PGD et simulation temps-réel

SOLUTION PARAMÉTRIQUE

OFFLINE : apprentissage PGD $u(x, t, p) \approx \sum_{i=1}^M X_i(x)T_i(t)P_i(p)$

ONLINE (*presque* temps réel)

- Simulation
- Optimisation
- Analyse inversée
- Propagation de l'incertitude
- Contrôle



Application VR, AR et HR

Physics-aware interaction between virtual and physical objects in Mixed Reality

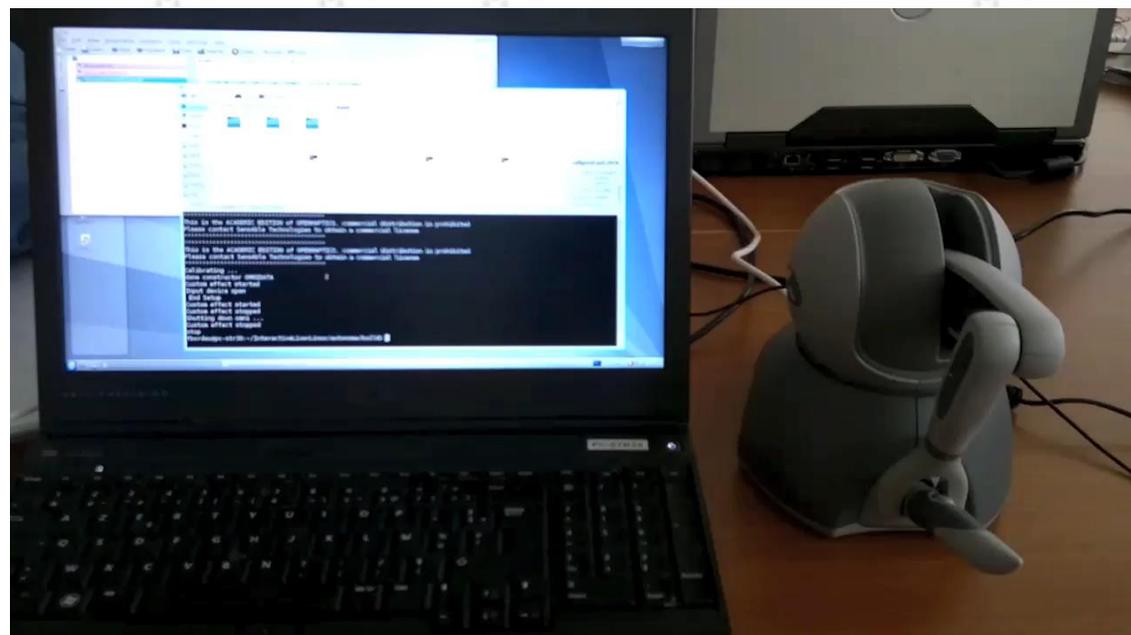
A. Badías, D. González, I. Alfaro, F. Chinesta, E. Cueto



Universidad
Zaragoza

unizar.es

Extraction de paramètres par l'IA



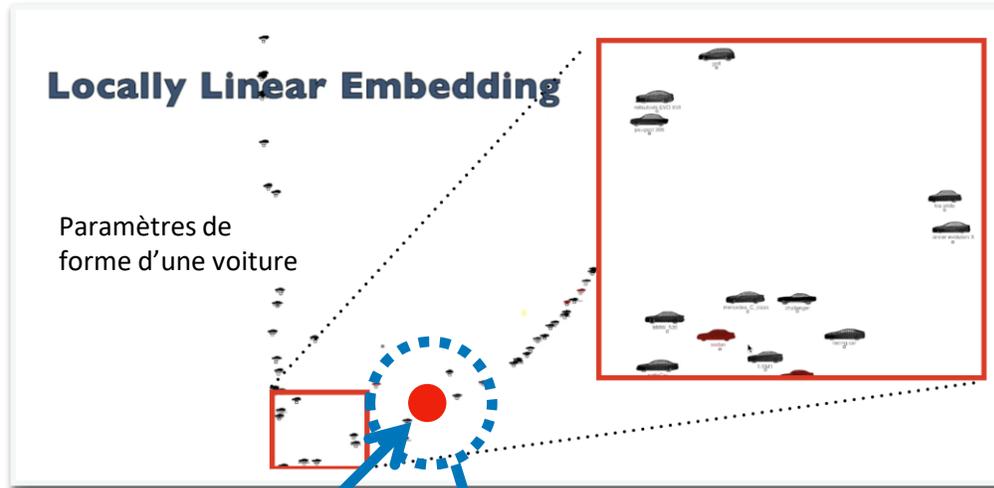
Param_11: 0.000000
Param_21: 0.000000
Param_31: 0.000000
Param_41: 0.000000

PXDMF Sync

Param_11	<input type="text" value="0"/>
Param_21	<input type="text" value="0"/>
Param_31	<input type="text" value="0"/>
Param_41	<input type="text" value="0"/>

Sync Fixed Dimensions

Aérodynamique : Manifold Learning & IA



Nouvelle
voiture
inconnue

Solution CFD
interpolée sur le
manifold dans son
voisinage



Conclusion

JUMEAU VIRTUEL (réalité)

=

MODÈLE PHYSIQUE (temps-réel, math. Appliquées)

+

MODÈLE D'APPRENTISSAGE DE DONNÉES À LA VOLÉE (IA)