Journée METTI – 11 juin 2026

MEsures Thermiques et Techniques Inverses : Approches originales en inversion de mesures – méthodes et applications

Jean-Luc Battaglia – Denis Maillet – Fabrice Rigollet

Présentation du Groupe METTI et de ses activités

- **METTI** : **ME**sures **T**hermiques et **T**echniques **I**nverses

- Groupe **méthodologique** et **transverse**:
propres journées/écoles thématiques + journées mixtes: METTI + bâtiment, METTI + climat, ...

- **(un) objectif** des **méthodes inverses en thermique et ailleurs ...**:
réconcilier **Modèles** et **Mesures**

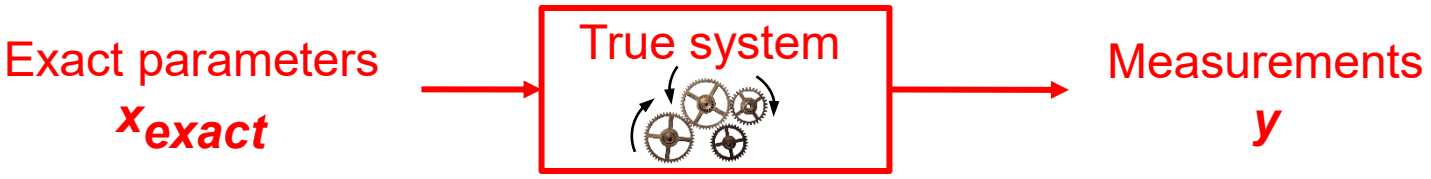
Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements

Measurements
y

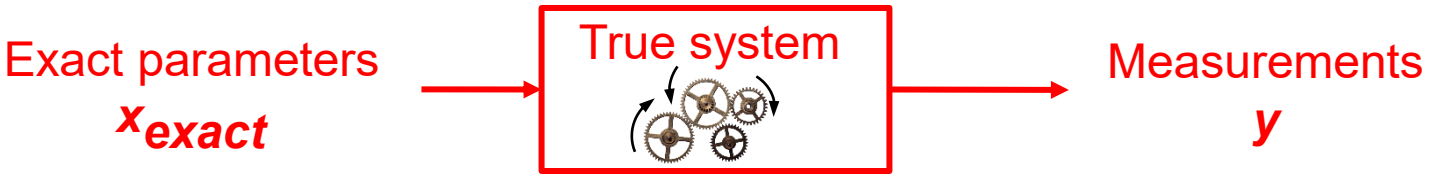
Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements



Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements



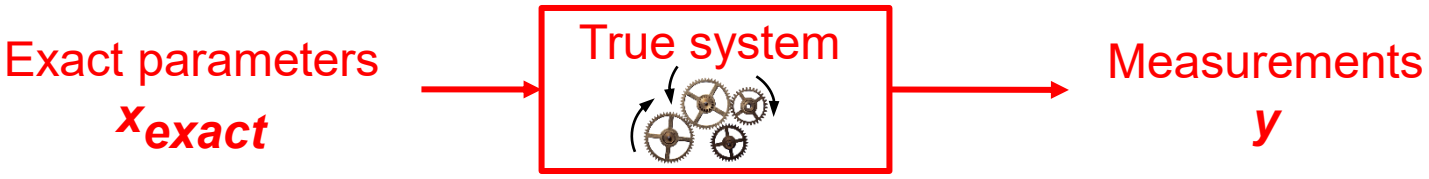
« causes » → → → → → → → → → « effects »

Parameters in the general sense here means « what can acts on the measurements » :

- influencing factors (thermophysical properties, radiative properties, etc),
- boundary conditions (heat flux, etc),
- initial conditions,
- Internal source term, etc

Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements



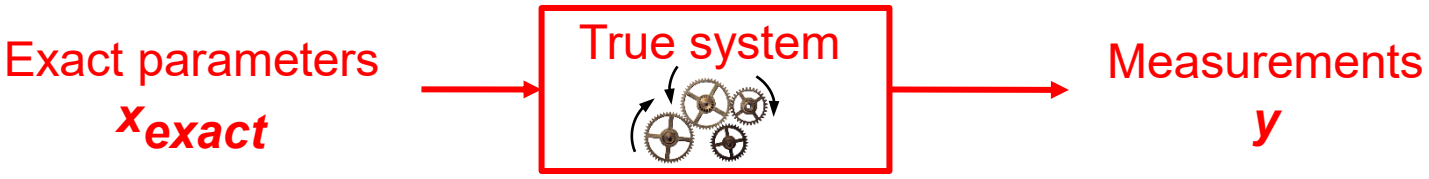
« causes » → → → → → → → → → « effects »

Parameters in the general sense here means « what can acts on the measurements » :
- influencing factors (thermophysical properties, radiative properties, etc),
- boundary conditions (heat flux, etc),
- initial conditions,
- Internal source term, etc

Measurements in the general sense here means « what can be observed » :
- temperatures (x,y,z,t), with or without contact, heat flux (fluxmeters)
- radiance (pyrometry, infrared thermography)
- output voltage of a sensor,
- etc

Introduction : forward / inverse problem

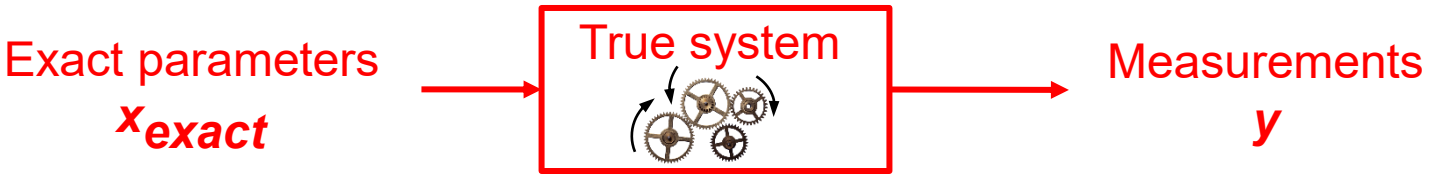
First count of the waltz : at the beginning there are measurements



We are happy with (good !) measurements,
but the truth is that we want parameters

Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements

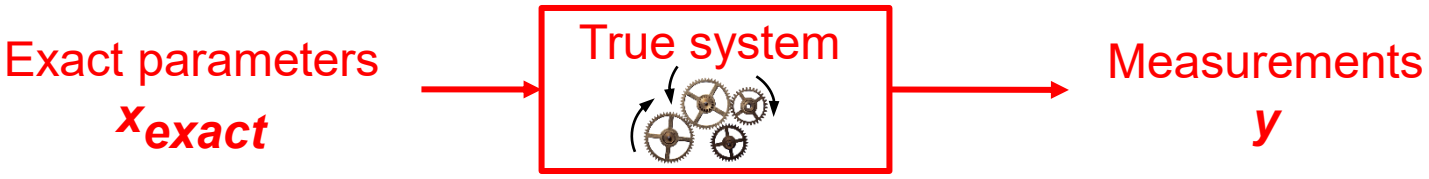


We are happy with (good !) measurements,
but the truth is that we want parameters

Measurements are an indirect way to access parameters
… if we understand the link, the « mechanism »
working in the direction
Parameters (« causes ») → Measurements (« effects »)

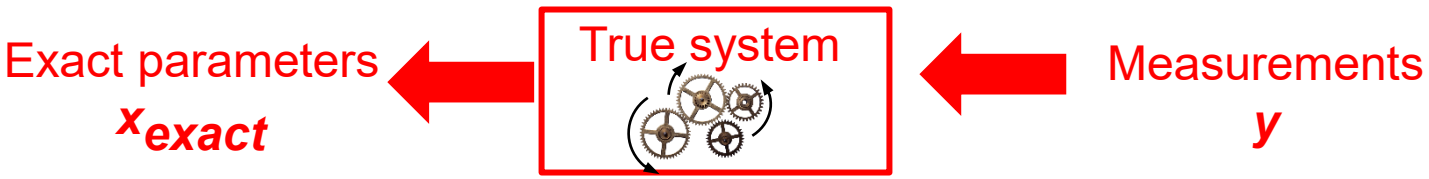
Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements



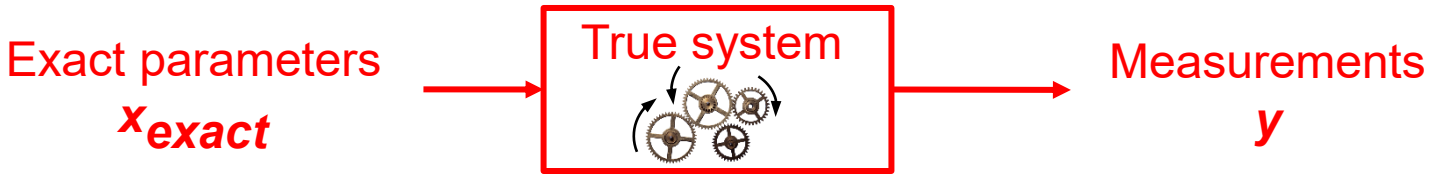
We are happy with (good !) measurements,
but the truth is that we want parameters

Measurements are an indirect way to access parameters
… if we understand the link, the « mechanism »
working in the direction
Parameters (« causes ») → Measurements (« effects »)



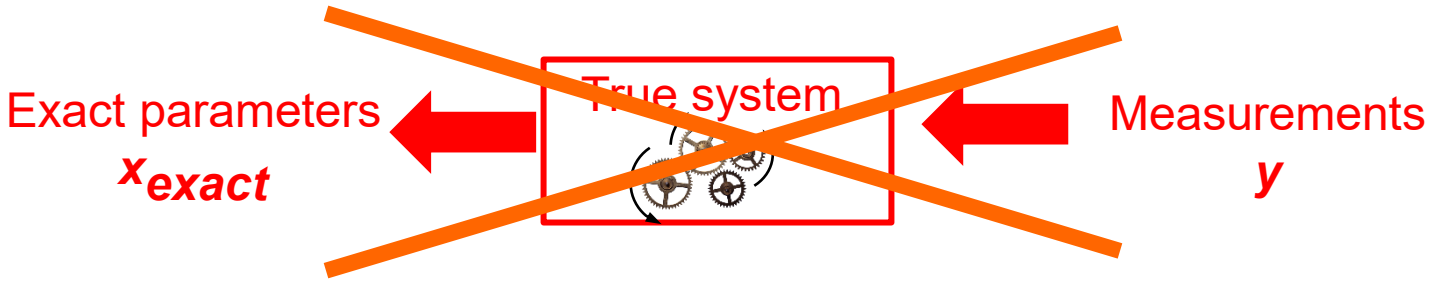
Introduction : forward / inverse problem

First count of the waltz : at the beginning there are measurements



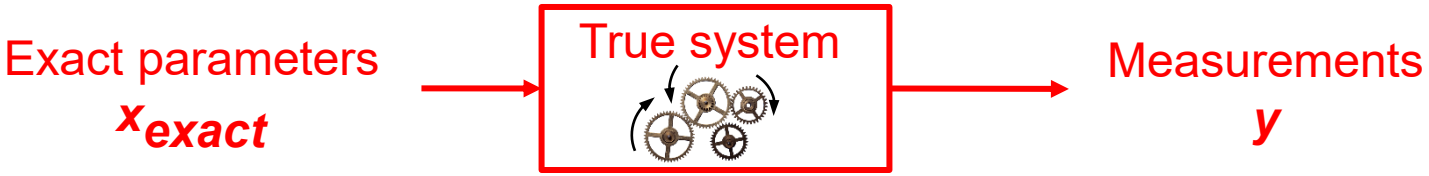
We are happy with (good !) measurements,
but the truth is that we want parameters

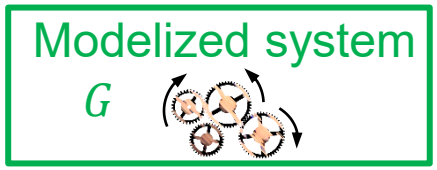
Measurements are an indirect way to access parameters
… if we understand the link, the « mechanism »
working in the direction
Parameters (« causes ») → Measurements (« effects »)



Introduction : forward / inverse problem

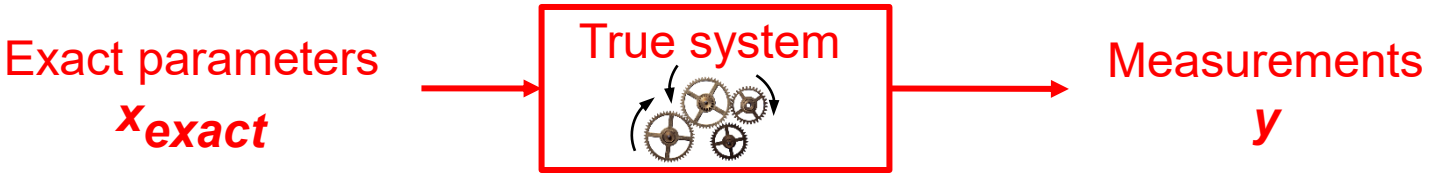
Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »

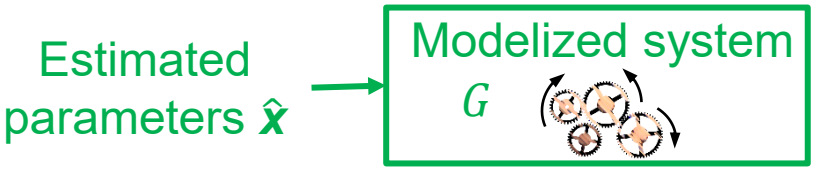




Introduction : forward / inverse problem

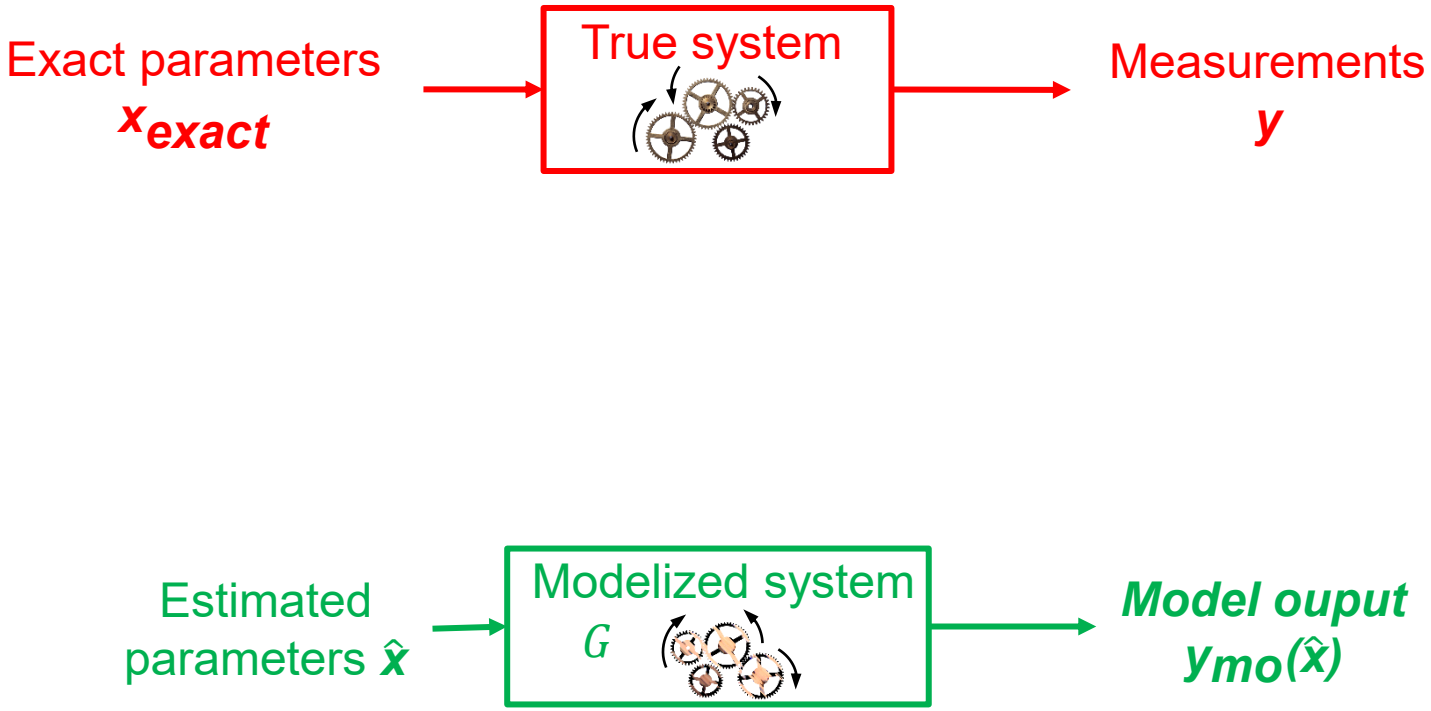
Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »





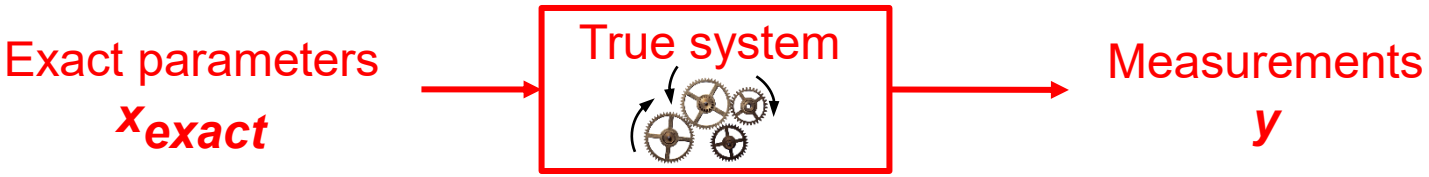
Introduction : forward / inverse problem

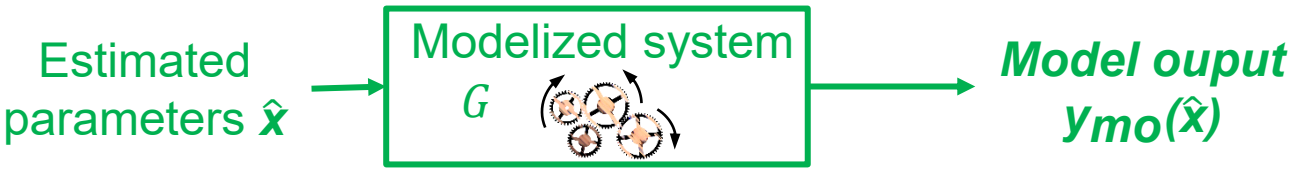
Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »



Introduction : forward / inverse problem

Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »





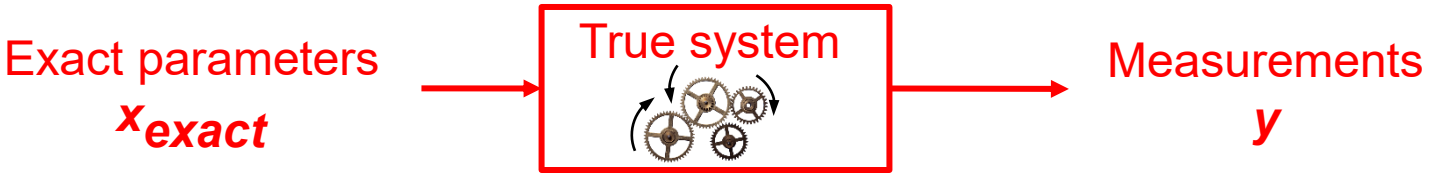
The model is classically based on physical laws (thermal, radiative, etc)

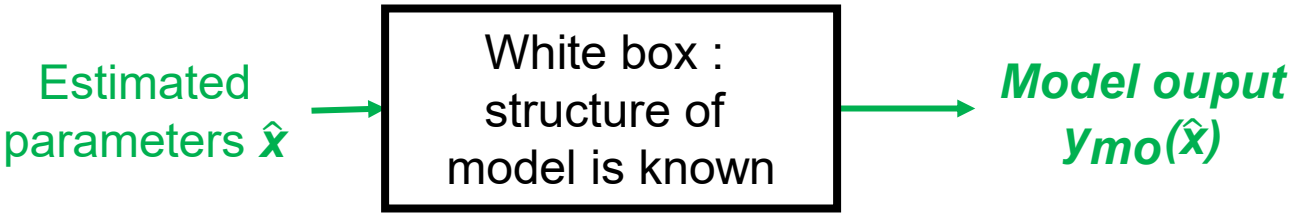
Mathematical resolution, numerical tools :

try to imitate the ground truth (measurements)

Introduction : forward / inverse problem

Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »





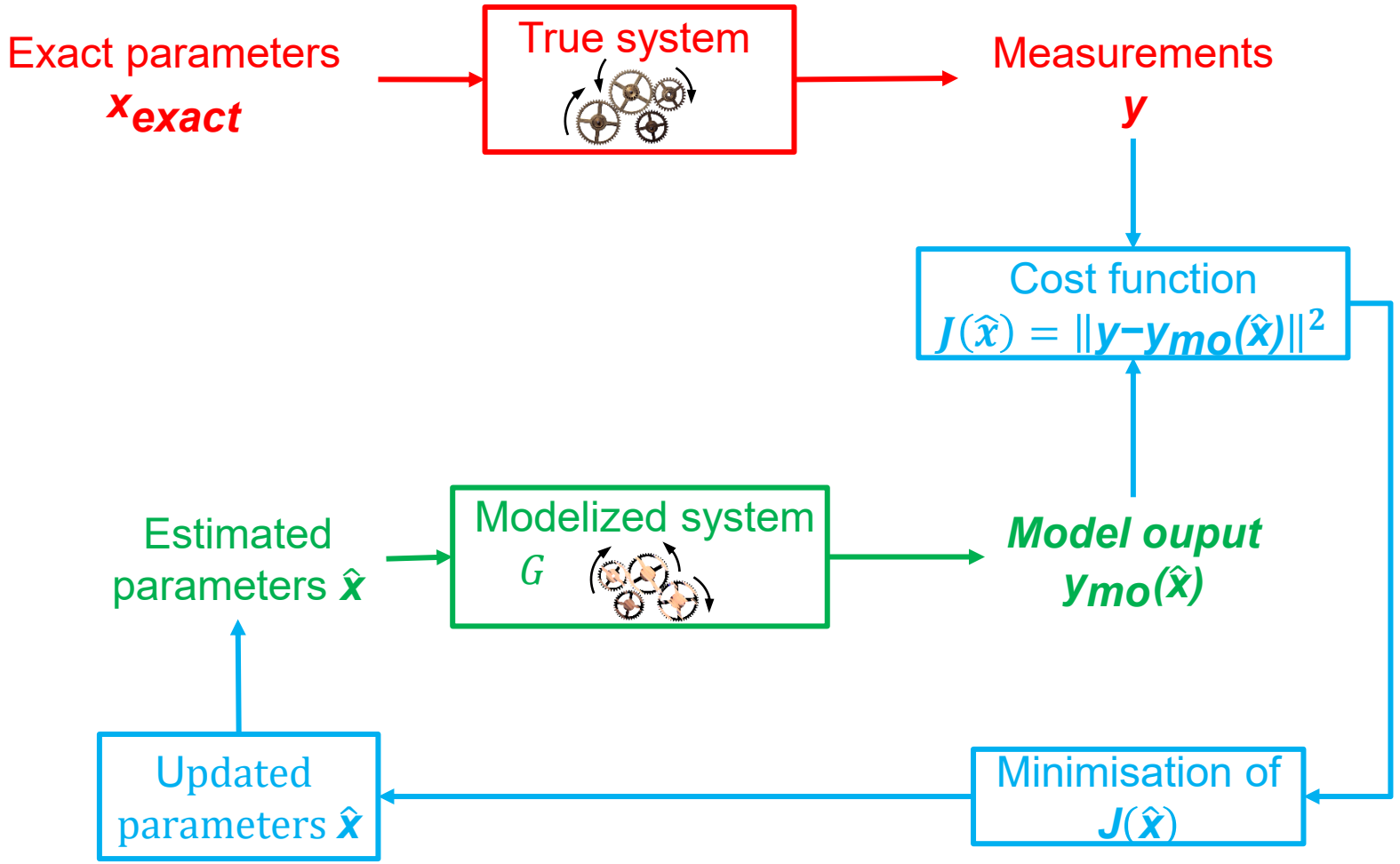
The model is classically based on physical laws (thermal, radiative, etc)

Mathematical resolution, numerical tools :

try to imitate the ground truth (measurements)

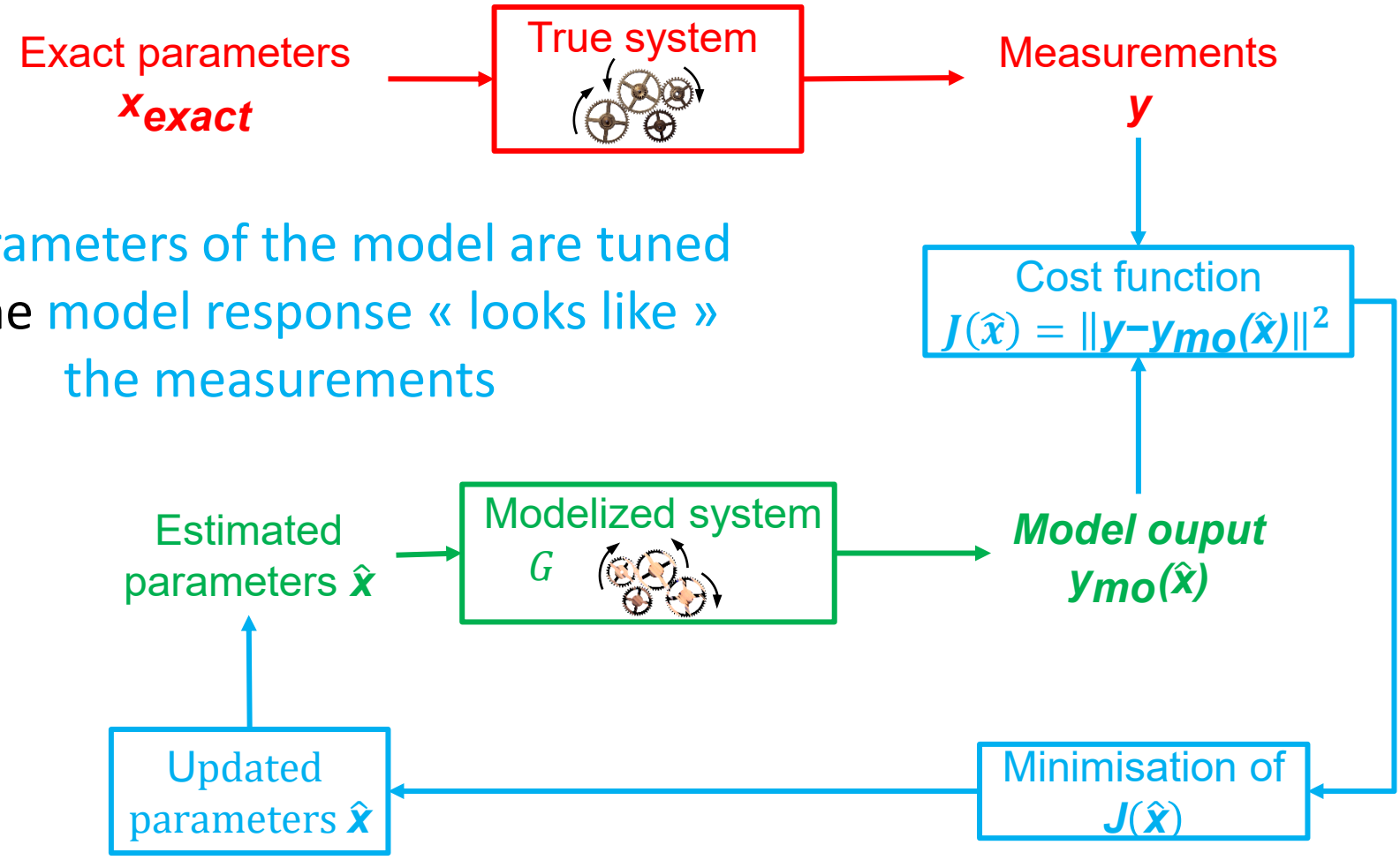
Introduction : forward / inverse problem

Third count : the **identification** **of** **parameter** of the « mechanism »



Introduction : forward / inverse problem

Third count : the **identification** **of** **parameters** of the « mechanism »



The parameters of the model are tuned until the model response « looks like » the measurements

Données d'entrée estimées $\hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{t})$:

Conditions aux limites $\hat{\varphi}\ (t)$

Sources

Condition initiale

Système **modélisé**



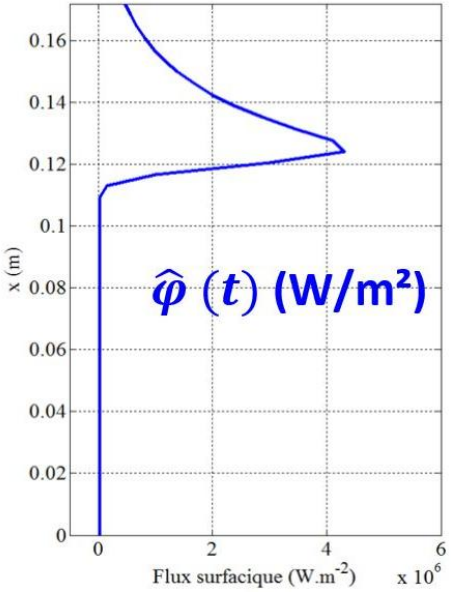
Géométrie

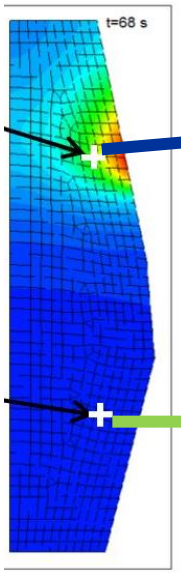
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties réelles y_{mo}

dont certaines sont observables

$\hat{T}\ (r_0, t, \hat{\varphi}\ (t), \hat{x})$







Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

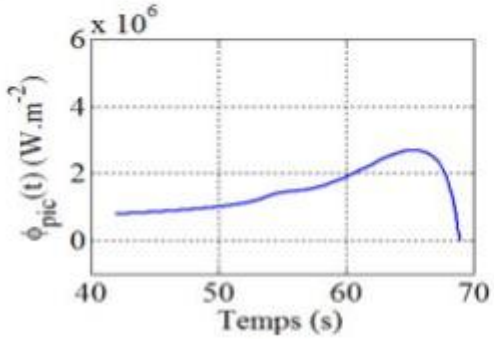
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies

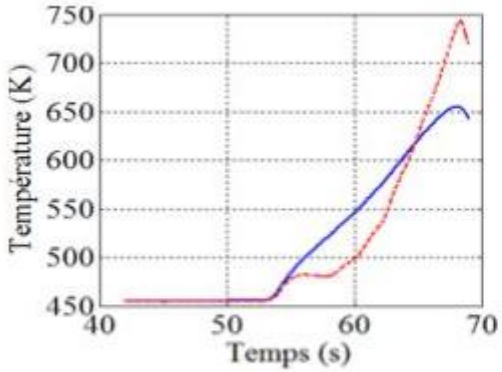
Système **réel**

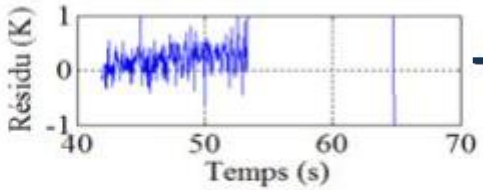
Données d'entrée réelles ***u(t):***
Conditions aux limites $\varphi(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques x

Données de sorties réelles ***y***
dont certaines sont observables $T(r_0, t)$







Système **modélisé**

Données d'entrée estimées $\hat{u}(t)$**:**
Conditions aux limites $\hat{\varphi}(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties modélisées ***y_{mo}***
dont certaines sont observables
$\hat{T}(r_0, t, \hat{\varphi}(t), \hat{x})$

ajustement de $\hat{\varphi}(t)$

Minimisation itérative du coût (norme des résidus)

Descente de gradient

Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

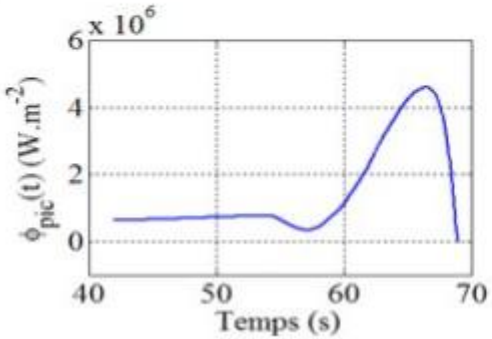
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies

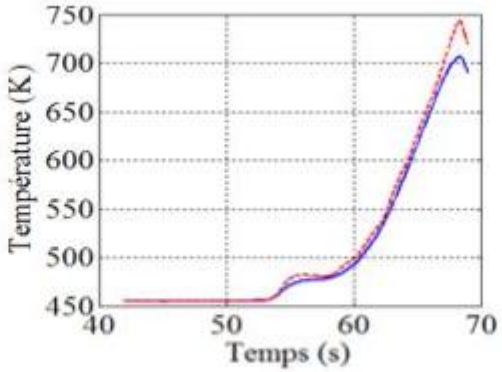
Système **réel**

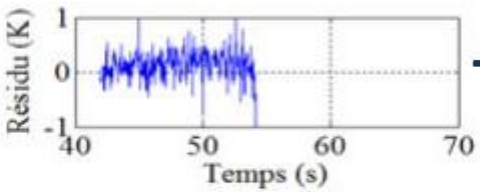
Données d'entrée réelles ***u(t):***
Conditions aux limites $\varphi(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques x

Données de sorties réelles ***y***
dont certaines sont observables $T(r_0, t)$







Système **modélisé**

Données d'entrée estimées $\hat{u}(t)$*:*
Conditions aux limites $\hat{\varphi}(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties modélisées ***y_{mo}***
dont certaines sont observables
$\hat{T}(r_0, t, \hat{\varphi}(t), \hat{x})$

ajustement de $\hat{\varphi}(t)$

Minimisation itérative du coût (norme des résidus)
Descente de gradient

Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

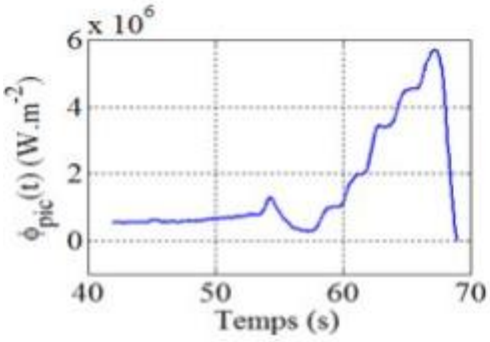
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies

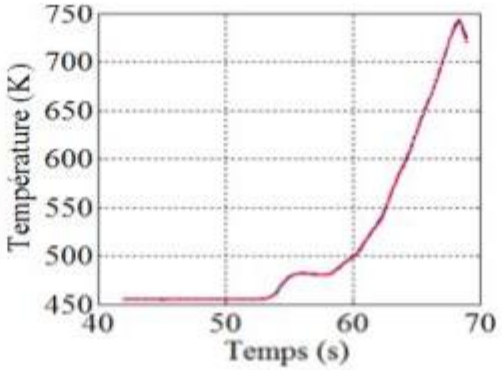
Système **réel**

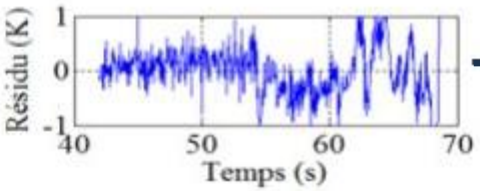
Données d'entrée réelles ***u(t):***
Conditions aux limites $\varphi(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques x

Données de sorties réelles ***y***
dont certaines sont observables $T(r_0, t)$







Système **modélisé**

Données d'entrée estimées $\hat{u}(t)$***:***
Conditions aux limites $\hat{\varphi}(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties modélisées ***y_{mo}***
dont certaines sont observables
$\hat{T}(r_0, t, \hat{\varphi}(t), \hat{x})$

ajustement de $\hat{\varphi}(t)$

Minimisation itérative du coût (norme des résidus)

Descente de gradient

Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

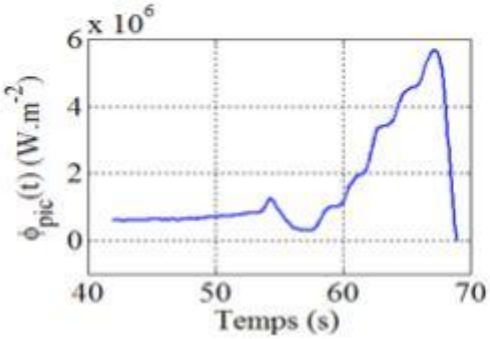
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies

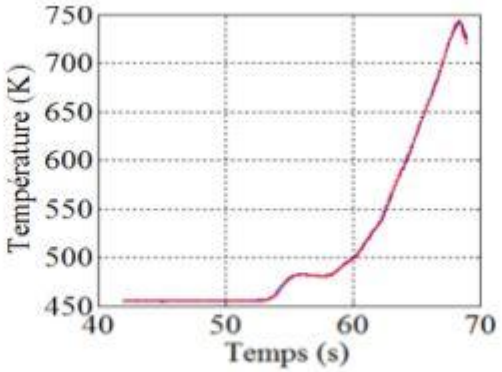
Système **réel**

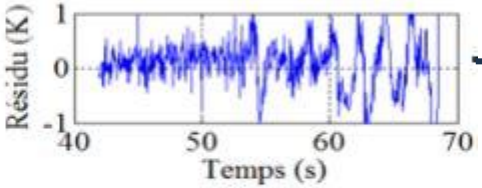
Données d'entrée réelles ***u(t):***
Conditions aux limites $\varphi(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques x

Données de sorties réelles ***y***
dont certaines sont observables $T(r_0, t)$







Système **modélisé**

Données d'entrée estimées $\hat{u}(t)$**:**
Conditions aux limites $\hat{\varphi}(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties modélisées y_{mo}
dont certaines sont observables
$\hat{T}(r_0, t, \hat{\varphi}(t), \hat{x})$

ajustement de $\hat{\varphi}(t)$

Minimisation itérative du coût (norme des résidus)

Descente de gradient

Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

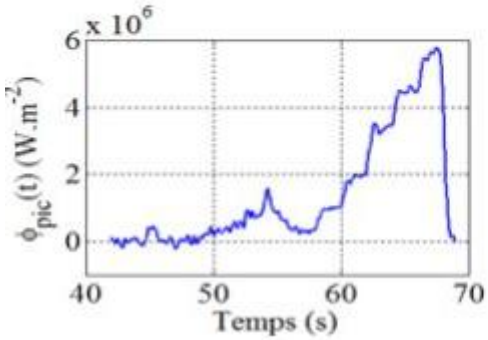
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies

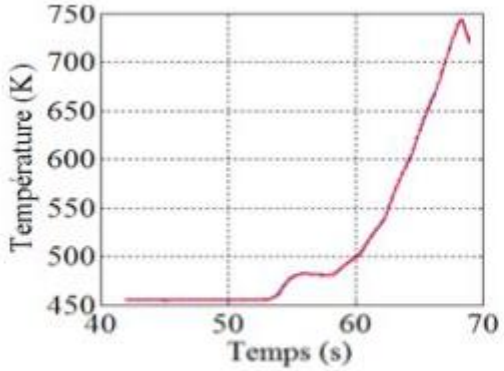
Système **réel**

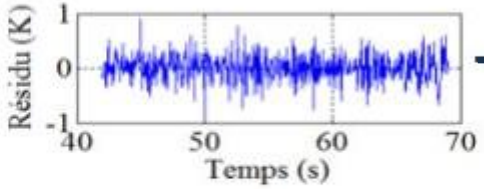
Données d'entrée réelles ***u(t):***
Conditions aux limites $\varphi(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques x

Données de sorties réelles ***y***
dont certaines sont observables $T(r_0, t)$







Système **modélisé**

Données d'entrée estimées $\hat{u}(t)$**:**
Conditions aux limites $\hat{\varphi}(t)$
Sources
Condition initiale

Géométrie
Propriétés thermophysiques $\hat{x}$

Données de sorties modélisées ***y$_{mo}$***
dont certaines sont observables
$\hat{T}(r_0, t, \hat{\varphi}(t), \hat{x})$

ajustement de $\hat{\varphi}(t)$

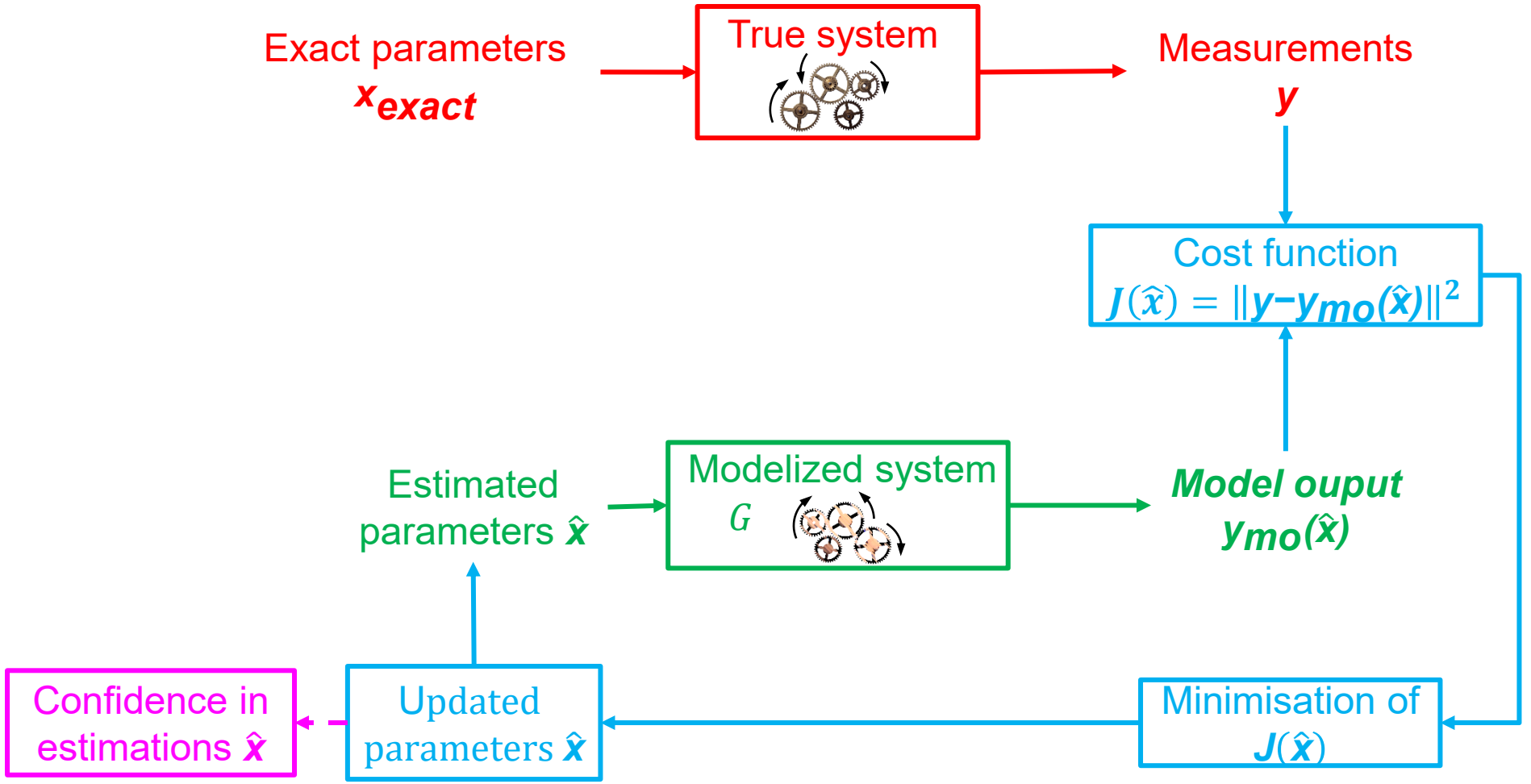
Minimisation itérative du coût (norme des résidus)

Descente de gradient

Thèse J. Gaspar, IUSTI Marseille, 2013

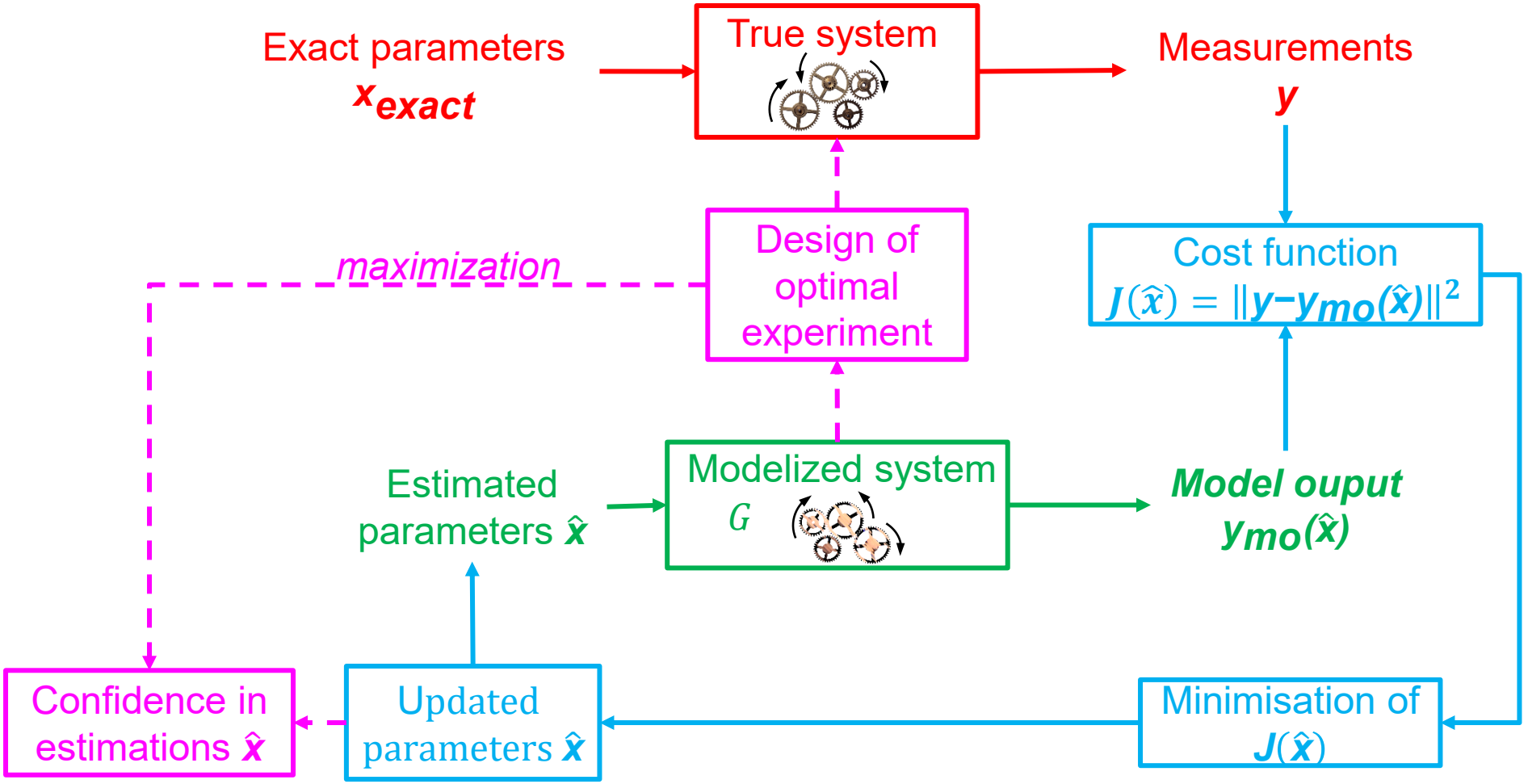
Introduction : forward / inverse problem

Third count : the **identification** **of** **parameter** of the « mechanism »



Introduction : forward / inverse problem

Fourth count ! The design of optimal experiment, if possible

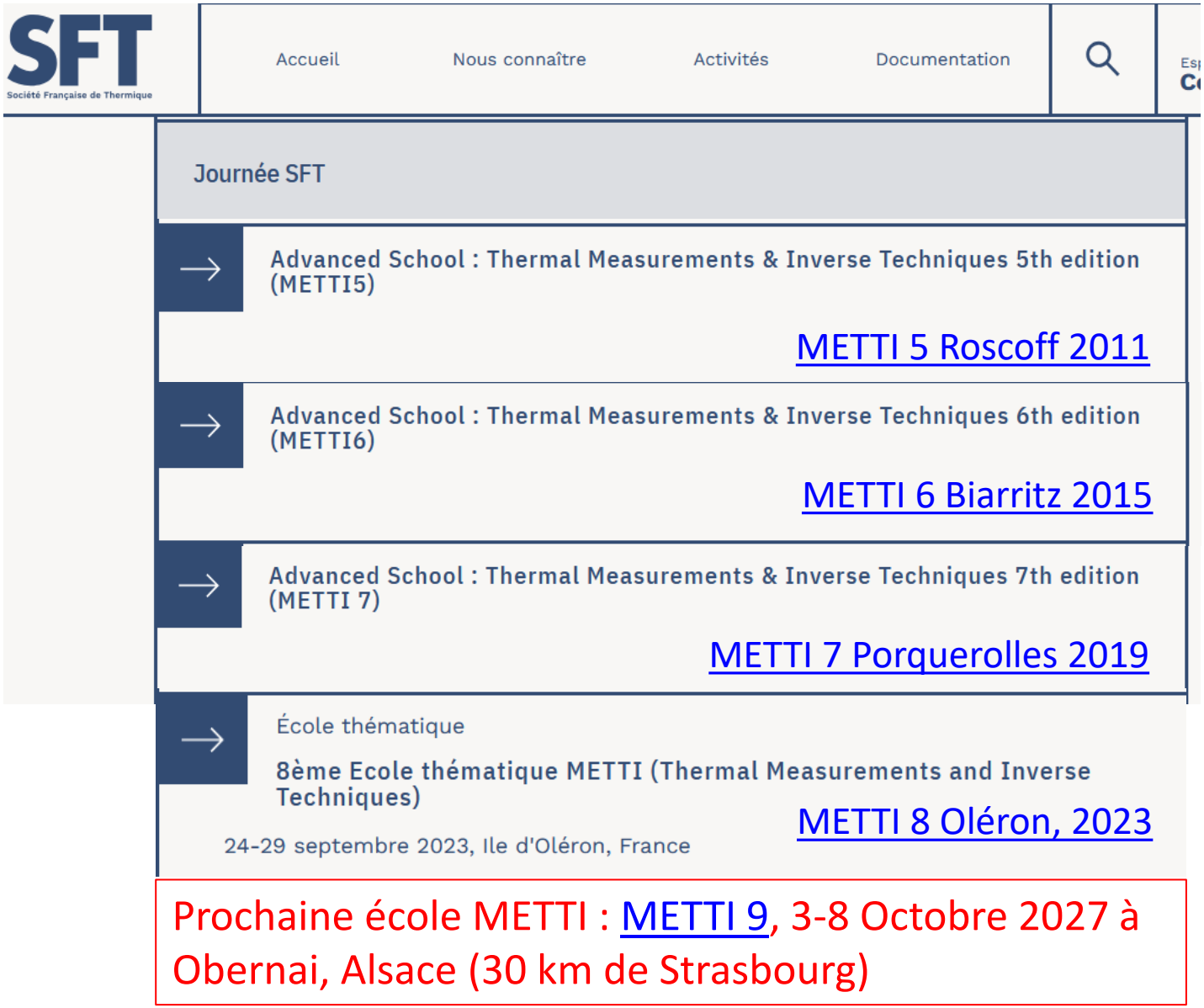


Les problématiques abordées dans METTI

Si, dans vos activités en transferts thermiques, au moins une de ces questions vous intéresse alors **vous êtes, peut-être sans le savoir, adepte des problèmes inverses en thermique** :

- **Une source de chaleur existe à un endroit inaccessible à la mesure** : comment puis-je la connaître à partir de mesures déportées ?
- **Puis-je estimer tous les paramètres structurels et/ou les entrées de mon modèle** thermique avec une seule expérience ?
- **Comment concevoir l'expérience idéale** pour accéder aux propriétés thermophysiques de mon matériau ?
- **Le modèle thermique de mon expérience est trop lourd** à manipuler, comment puis-je **le réduire** ?
- **Les outils de de l'IA** peuvent-ils m'aider à résoudre certains de ces problèmes ?

Les documentations METTI – Ecoles thématiques



Prochaine école METTI : METTI 9, 3-8 Octobre 2027 à Obernai, Alsace (30 km de Strasbourg)

Journées SFT récentes:

- Journée SFT – METTI- 8 juin 2023 - Inversion de données faisant appel à un modèle en thermique, quels apports de l'intelligence artificielle ? (Abordé aussi en atelier au congrès SFT Chambéry 2025) 

- Journée SFT -16 juin 2025 -Apport des modèles réduits dans la modélisation des transferts thermiques 

Programme Journée SFT – METTI- 8 juin 2023 - Inversion de données faisant appel à un modèle en thermique, quels apports de l'intelligence artificielle ?

E. Abisset-Chavanne (I2M, Bordeaux) - Quel apport de l'IA dans l'obtention et le traitement des données expérimentales ?	Mécanique, IA, nombreuses data
J.-L. Battaglia (I2M, Bordeaux) - Identification de systèmes thermiques linéaires et non linéaires par des structures mathématiques d'intégration d'ordre non entier.	Thermique Instationnaire, identification de modèle

F. André (CETHIL, Lyon) – Combinaison de modèles physiques et d'outils d'apprentissage statistique pour l'approximation des propriétés radiatives d'atmosphères non-uniformes. Partie 1 : Principe et fondements théoriques	Rayonnement gaz, IA, réduction de modèle?
C. Delage (CETHIL, Lyon) – Partie 2 : Ajustement des paramètres du modèle sur des données d'apprentissage - cas de la bande A de l'oxygène (EPS-SG 3MI)	Rayonnement gaz, IA, réduction de modèle?
M.-H. Aumeunier (CEA, Cadarache) – Réseaux neuronaux convolutifs pour la thermographie quantitative en environnement complexe.	Rayonnement de surface, IA, réduction de modèle?

H. Orlande (COPPE, Rio de Janeiro) – Metamodel based on evolutionary neural networks for the solution of inverse problems within the Bayesian framework of statistics	Hydraulique, IA, réduction de modèle
B. Gaume, Y. Rouizi, F. Joly, O. Quéméner (LMEE, Evry Val d'Essone) - Apport des modèles réduits pour la mesure thermique indirecte en temps réel dans un four rayonnant	Rayonnement de surface instationnaire, réduction de modèle
O. Farges (LEMTA, Nancy) – Modélisation du transfert radiatif dans des milieux participants, par réseaux de neurones bayésiens et méthode de Monte Carlo.	Rayonnement gaz, IA, réduction de modèle?
Y. Cheny (LEMTA, Nancy) – Reconstruction de courants de gravité par réseaux de neurones informés par la physique (PINNs)	Mécanique des fluides, IA, Réduction de modèle?
D. Maillet, B. Rémy, A. Barthélemy (LEMTA, Nancy) – Construction de modèles convolutifs transitoires ou paramétriques (ARX) pour une utilisation ultérieure directe ou inverse en thermique	Thermique Instationnaire, identification de modèle

Cahier de la SFT - L'I.A. et la Thermique

Programme Journée SFT -16 juin 2025 - Apport des modèles réduits dans la modélisation des transferts thermiques

- 9h30 : Accueil/café
- 10h00 : 1 - Jean Luc Battaglia, Laboratoire I2M, Université Bordeaux, modèles réduits identifiés.
- 10h30 : 2 -Bérengère Podvin, Laboratoire EM2C, Paris-Saclay : POD dans des écoulements décollés.
- 11h00 : 3 - Olivier Quéméner, Laboratoire LM2E, Univ Evry Paris Saclay : Traitement de la non-linéarité en thermique par méthode AROMM.
- 11h30 : 4 - David Néron, Laboratoire LMPS, ENS Paris-Saclay : Réduction de modèles en mécanique non linéaire pour la construction d'abaques virtuels.
- 12h00 : 5 - Benjamin Remy, Laboratoire LEMTA, Université de Lorraine : Réduction de modèles par modèles convolutifs et modèles paramétriques de type ARX.
- 12h30 - 14h00 : Repas
- 14h00 : 6 - Elsa Piollet, société MAYA HTT : Évaluation de plusieurs méthodes de réduction thermiques pour la création de jumeaux numériques dans l'industrie aérospatiale.
- 14h30 : 7 - Pierre-Eliot Malleval, Laboratoire LMPS, ENS Paris-Saclay : Résolution de problèmes thermiques non linéaires dans un code industriel à l'aide d'une méthode de réduction de modèles faiblement intrusive.
- 15h00 : 8 - Frédéric Joly, Laboratoire LM2E, Univ Evry Paris Saclay : Sous-structuration modale par méthode AROMM de problèmes thermiques.
- 15h30 : 9 -Julien Berger, Laboratoire LASIE, Univ La Rochelle : Modèles d'ordre réduit pour les transferts dans les matériaux poreux du bâtiments.

Prochaines manifestations:

- (now!) Journée METTI – 11 juin 2026: Mesures Thermiques et Techniques Inverses : Approches originales en inversion de mesures - méthodes et applications.

- 3 décembre 2026 Journée SFT 'Inversion de données radiatives', commune METTI / Thermique Atmosphérique et adaptation au changement climatique,

- 9th METTI School : 3-8 Octobre 2027 - Obernai, Alsace (30 km de Strasbourg)

- 12th ICIPE (Int. Conf. on Inverse Problemes in Engineering : Theory and Practice. Ile de Porquerolles, 11-16 juin 2028. https://icipe2028.sciencesconf.org/

(now!) Journée METTI – 11 juin 2026: Mesures Thermiques et Techniques Inverses : Approches originales en inversion de mesures - méthodes et applications

10h10 - 10h40 : **1** – "**Estimation d'un coefficient d'échange par convection en régime permanent et dynamique à partir d'un modèle 1D de sonde thermique**", Imene LATIKI (Framatome, le Creusot et IMFT, Toulouse), Christophe AIRIAU (IMFT, Toulouse), Alejandro MOURGUES (Framatome, le Creusot)

10h40 -11h10 : **2** - " **Estimation de la résistance thermique de parois de bâtiments par méthode active : effets de la géométrie du modèle direct et des données de mesure prises en compte comme conditions limites sur les résultats d'inversion** ", Mostafa MORTADA (CERTES, U. Paris-Est Créteil), Vincent FEUILLET(CERTES), Laurent IBOS (CERTES), Kamel ZIBOUCHE (CSTB), Julien WAEYTENS (Département COSYS, U . Gustave Eiffel)

- 11h10 - 11h30 : Pause

11h30 – 12h00 : **3** – "**A reduced-order cylindrical conduction model for transient heat flux reconstruction based on an improved lumped formulation**", João SILVA FILHO (LEMTA, U. Lorraine), Arthur OLIVEIRA (GOTAS/LETeF, Department of Mechanical Engineering, U. São Paulo, Brazil), Juan LUNA VALENCIA (ASNR), Tony GLANTZ (ASNR), Alexandre LABERGUE (LEMTA, U. Lorraine), Michel GRADECK (LEMTA, U. Lorraine)

12h00 - 12h30 : **4** - " **Estimation de propriétés thermo-dépendantes d'un isolant par modèles réduits. Analyse de l'erreur d'identification** ", Jianan NI (LMIE, U. Evry-Val d'Essone), Frédéric JOLY (LMIE), Yassine ROUIZI (LMIE) , Olivier QUEMENER (LMIE)

(now!) Journée METTI – 11 juin 2026: Mesures Thermiques et Techniques Inverses : Approches originales en inversion de mesures - méthodes et applications

14h10 - 14h40 : **5** - " **Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les profils d'effusivité sech(xi) (sans jamais oser le demander) : application à la caractérisation de tungstène exposé au plasma du Tokamak WEST**", Clément MONET-VIDONNE (IUSTI, Aix Marseille U.), Jean-Claude Krapez (ONERA, Salon de Provence), Fabrice RIGOLLET (IUSTI, Aix Marseille U.), Jonathan GASPAR (IUSTI, Aix Marseille U.), Jean-Laurent GARDAREIN (IUSTI, Aix Marseille U.), Nathalie EHRET (IUSTI, Aix Marseille U.)

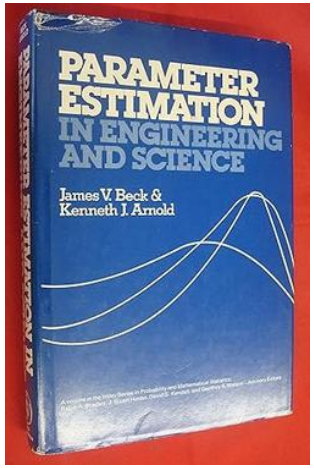
14h40 - 15h10 : **6** - "**Apports des modèles réduits paramétriques de type Spectral pour les problèmes inverses en thermique**", Julien BERGER (LASIE, U. La Rochelle), Suelen Gasparin (CEREMA), Helcio ORLANDE (COPPE RIO, Brésil), Caesar PACHECO (Universidade Federal Fluminense , Brésil)

- 15h10 - 15h30 : Pause

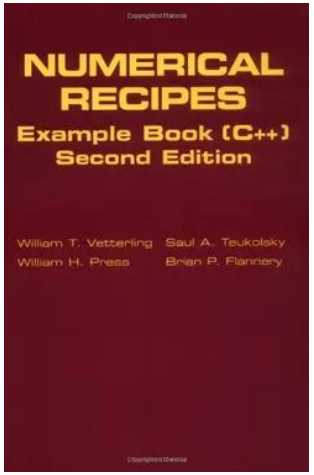
15h30 - 16h00 : ***7*** - "**Méthodes inverses appliquées à la modélisation de l'ablation de tumeurs du foie par micro-ondes** » , Ida BURGERS (I2M, CRMSB), Jean-Luc BATTAGLIA (I2M), Mariana de MELO ANTUNES (I2M), Valery OZENE (CRMSB)

16h00 - 16h30 : **8** - "**Inversion de mesures par une approche novatrice basée sur les réseaux de neurones informés par la physique (PINNs). Bases et application à l'inversion en diffusion thermique 2D-3D**", M.S. BiDOU (LTIE, U. Paris Nanterre), J-G. BAUZIN (LTIE), N. LARAQI (LTIE)

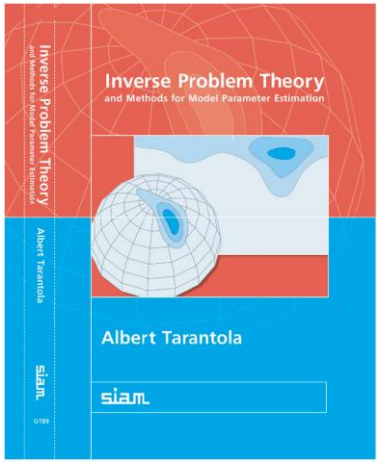
International references



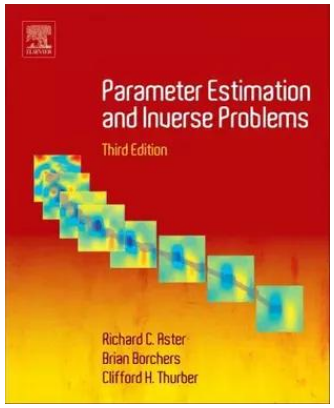
Beck, J. V. and Arnold K. J., *Parameter estimation in engineering and science*, John Wiley & Sons, 1977



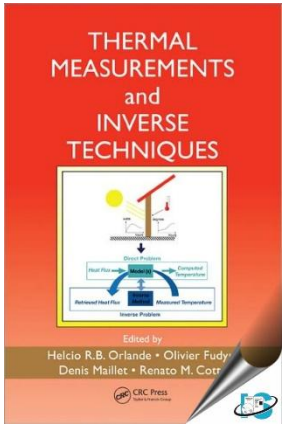
Numerical Recipes, William Press & al., Cambridge University Press, 1989



Tarentola A., Inverse Problem Theory and methods for model parameter estimation, SIAM 2005



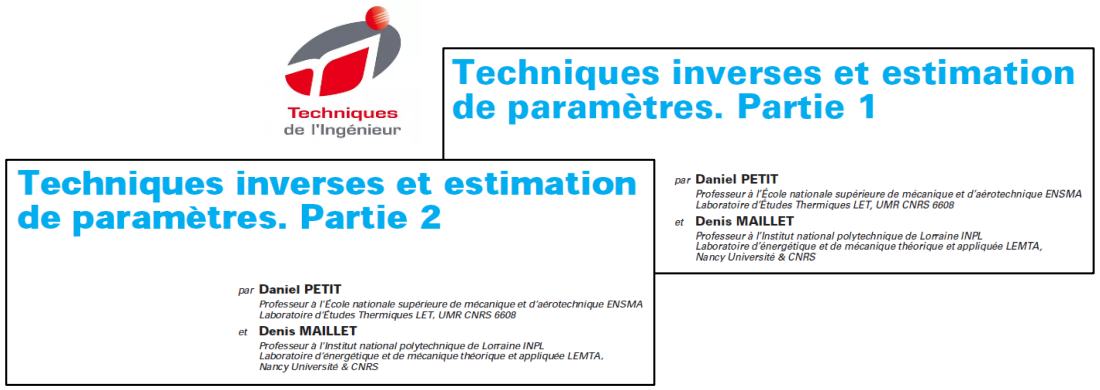
Aster R. C., Borchers B., Thurber C. H., *Parameter Estimation and Inverse Problems*, Third Ed., Elsevier Academic Press, 2018



Thermal measurements and inverse techniques, Edited by Helcio R. B. Orlande, Olivier Fudym, Denis Maillet, Renato M. Cotta, CRC Press, New York, ISBN : 978-1-4398-4555-4, 2011

National references

D. Petit, D. Maillet, *Techniques inverses et estimation de paramètres (Inverse techniques and parameter estimation),* Editeur : Techniques de l'Ingénieur, Paris. Thème : Sciences Fondamentales, base : Physique-Chimie, rubrique : Mathématiques pour la physique.
- Dossier AF 4515, pp. 1- 18, janvier 2008.
- Dossier AF 4516, pp. 1-24, janvier 2008.



https://www.techniques-ingenieur.fr/

D. Maillet, Y. Jarny, D. Petit, *Problèmes inverses en diffusion thermique (Inverse Problems in thermal diffusion),* Editeur : Techniques de l'Ingénieur, Paris. Base documentaire: Génie Energétique.
- Dossier BE 8265 "*Modèles diffusifs, mesures sensibilités (Diffusive models, measurements, sensitivities)* ", pp. 1- 54, octobre 2010,
- Dossier BE 8266 "*Formulation et résolution du problème des moindres carrés" (Formulation and solution of the least squares problem*)", pp. 1-46, janvier 2011
- Dossier BE 8267 "*Outils spécifiques de conduction inverse et de régularisation" (Specific tools for inverse conduction and regularization)*", pp. 1-46, July 2011,

