

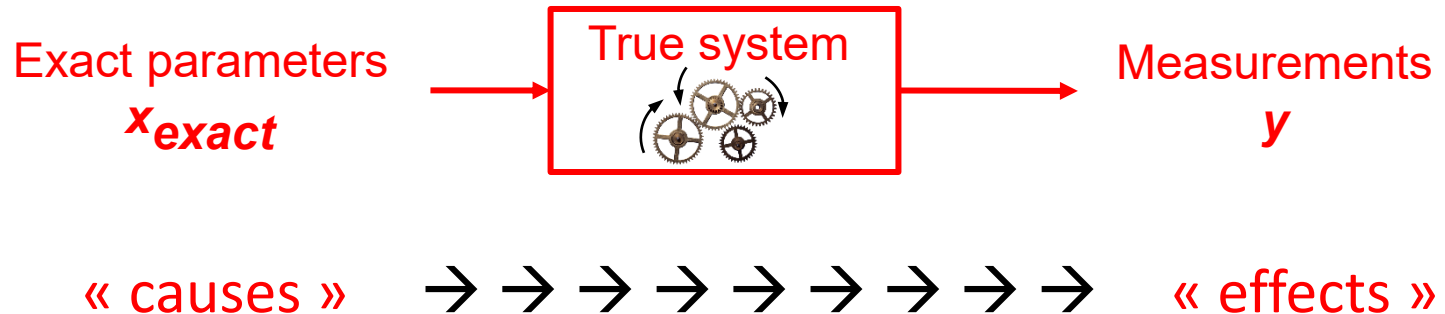
Présentation du Groupe **METTI** et de ses activités

Jean-Luc Battaglia – Denis Maillet – Fabrice Rigollet

- ❑ **METTI : MEsures Thermiques et Techniques Inverses**
- ❑ 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**



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

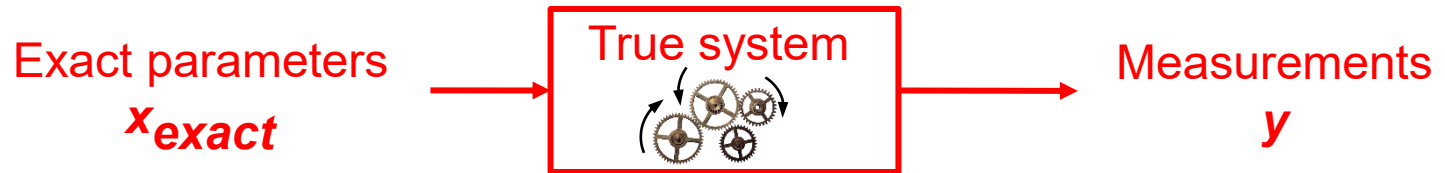
- influencing factors (thermophysical properties, radiative properties, etc),
- boundary conditions (heat flux, etc),
- initial conditions,
- Internal source term, etc

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

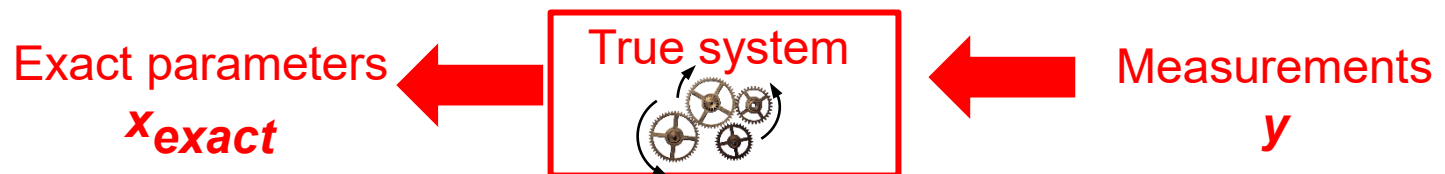
First count of the waltz : at the beginning there are **measurements**



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

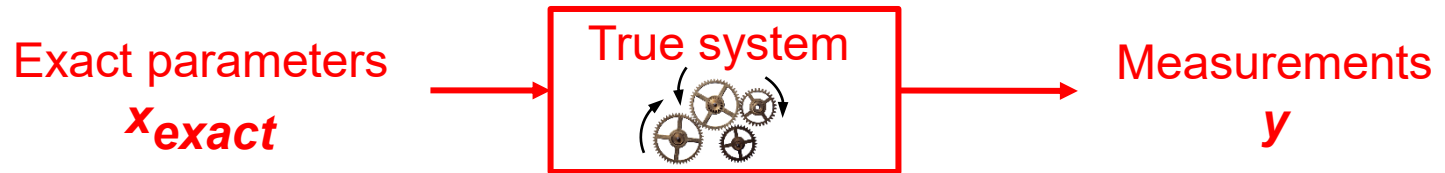
Measurements are an indirect way to access **parameters**
... if we **understand** the link, **the « mechanism »**
working in the direction

Parameters (« causes ») → Measurements (« effects »)



Introduction : forward / inverse problem

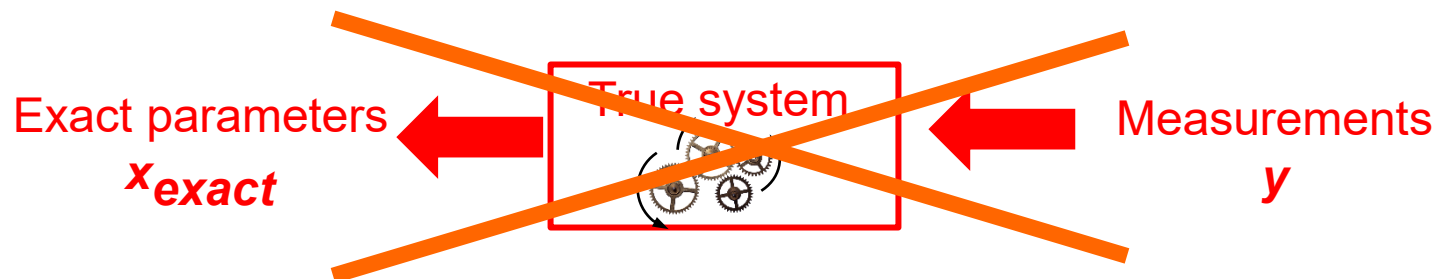
First count of the waltz : at the beginning there are **measurements**



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

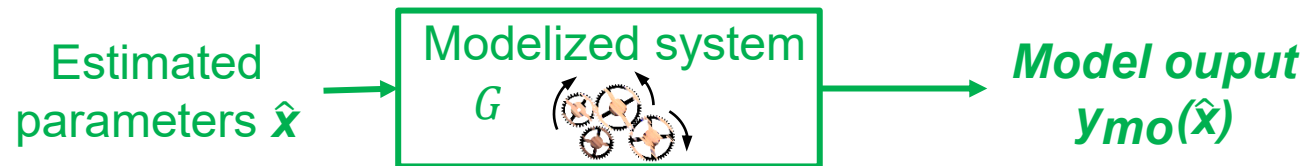
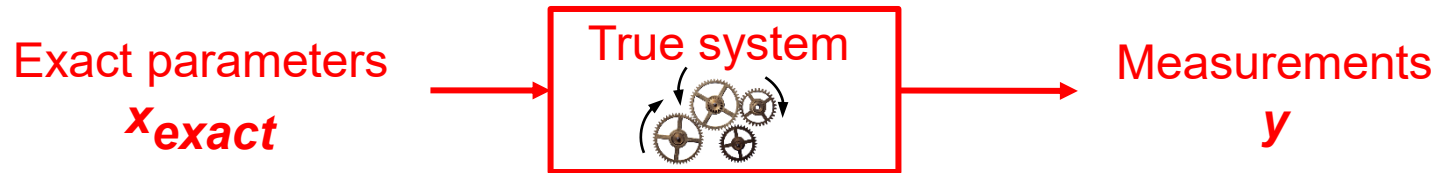
Measurements are an indirect way to access **parameters**
... if we **understand** the link, the « **mechanism** »
working in the direction

Parameters (« causes ») → Measurements (« effects »)



Introduction : forward / inverse problem

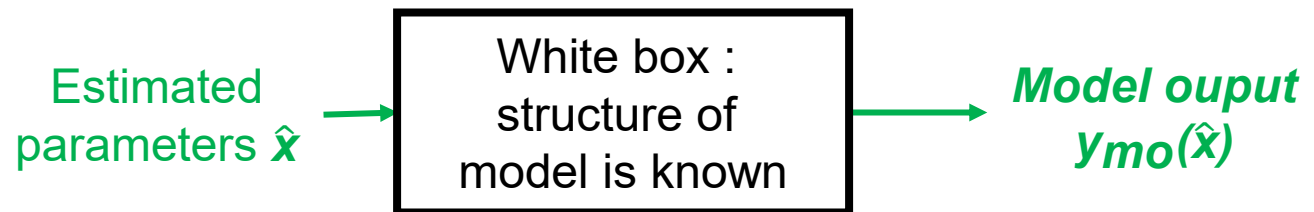
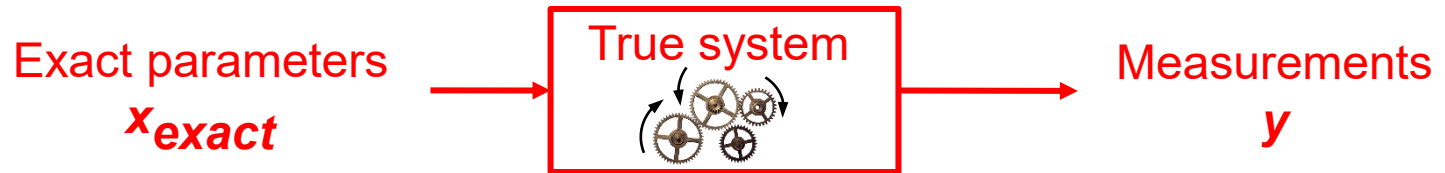
Second count of the waltz : the **modelization** of the « mechanism »



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 »



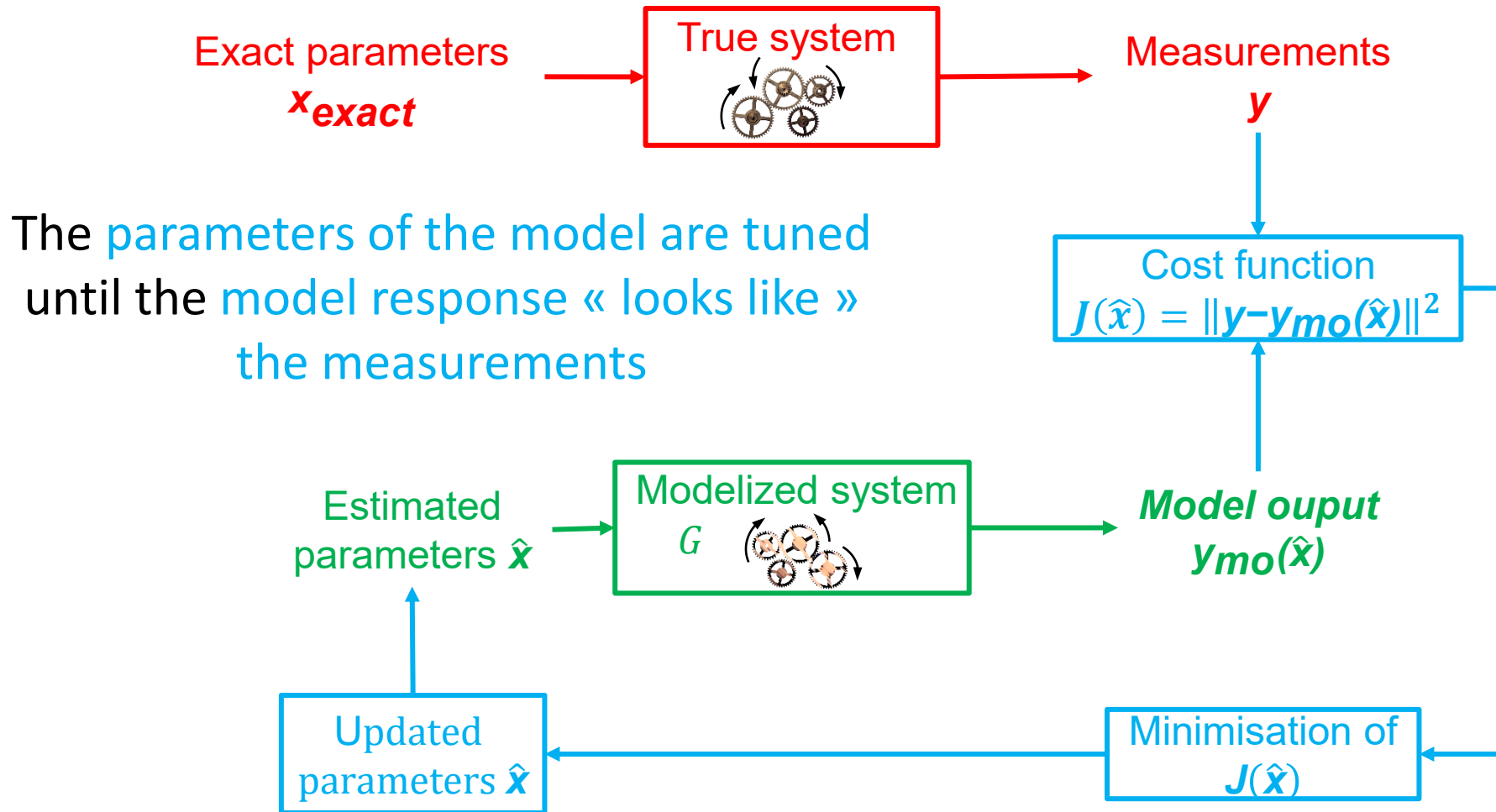
The model is classically based on **physical laws** (thermal, radiative, etc)

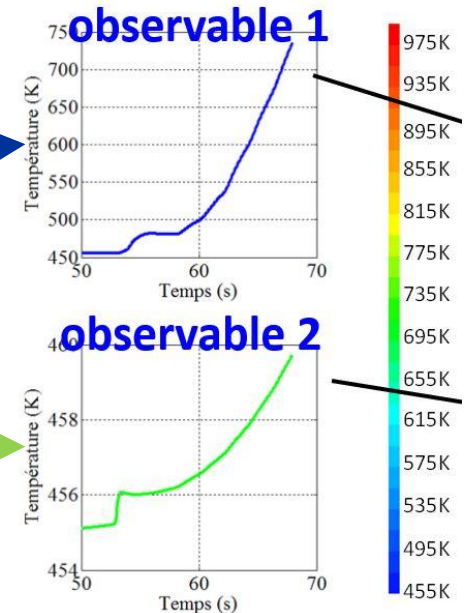
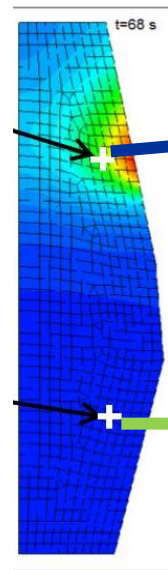
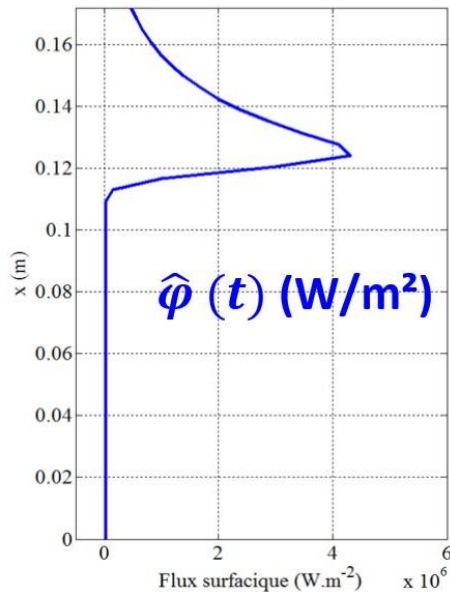
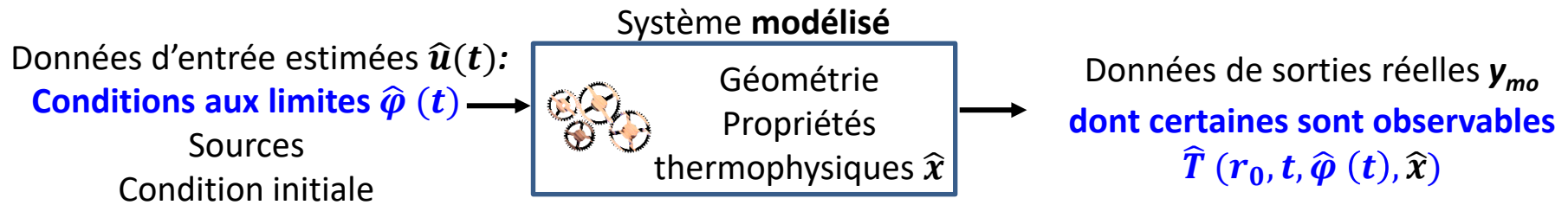
Mathematical resolution, numerical tools :

try to **imitate the ground truth** (measurements)

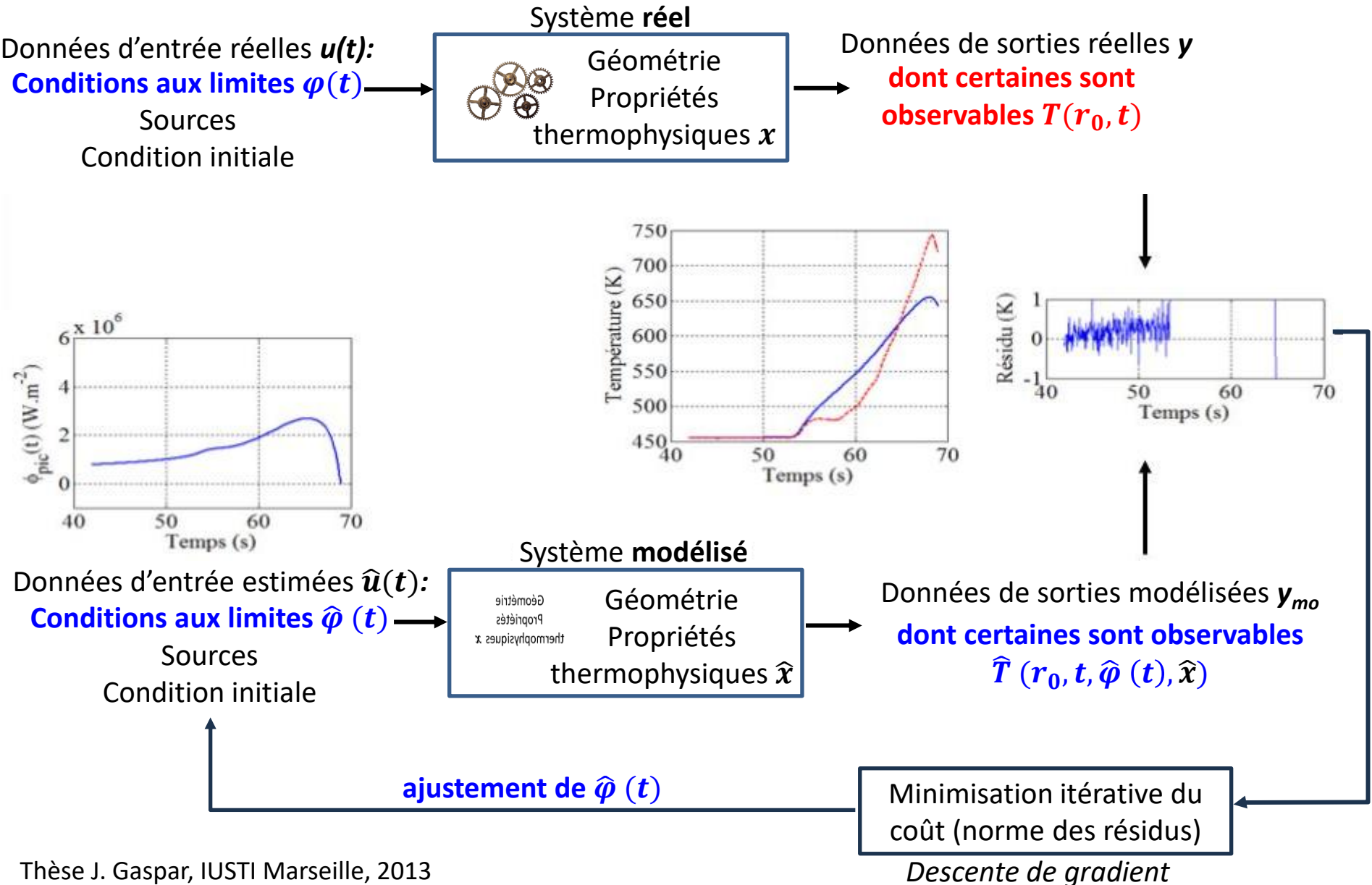
Introduction : forward / inverse problem

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

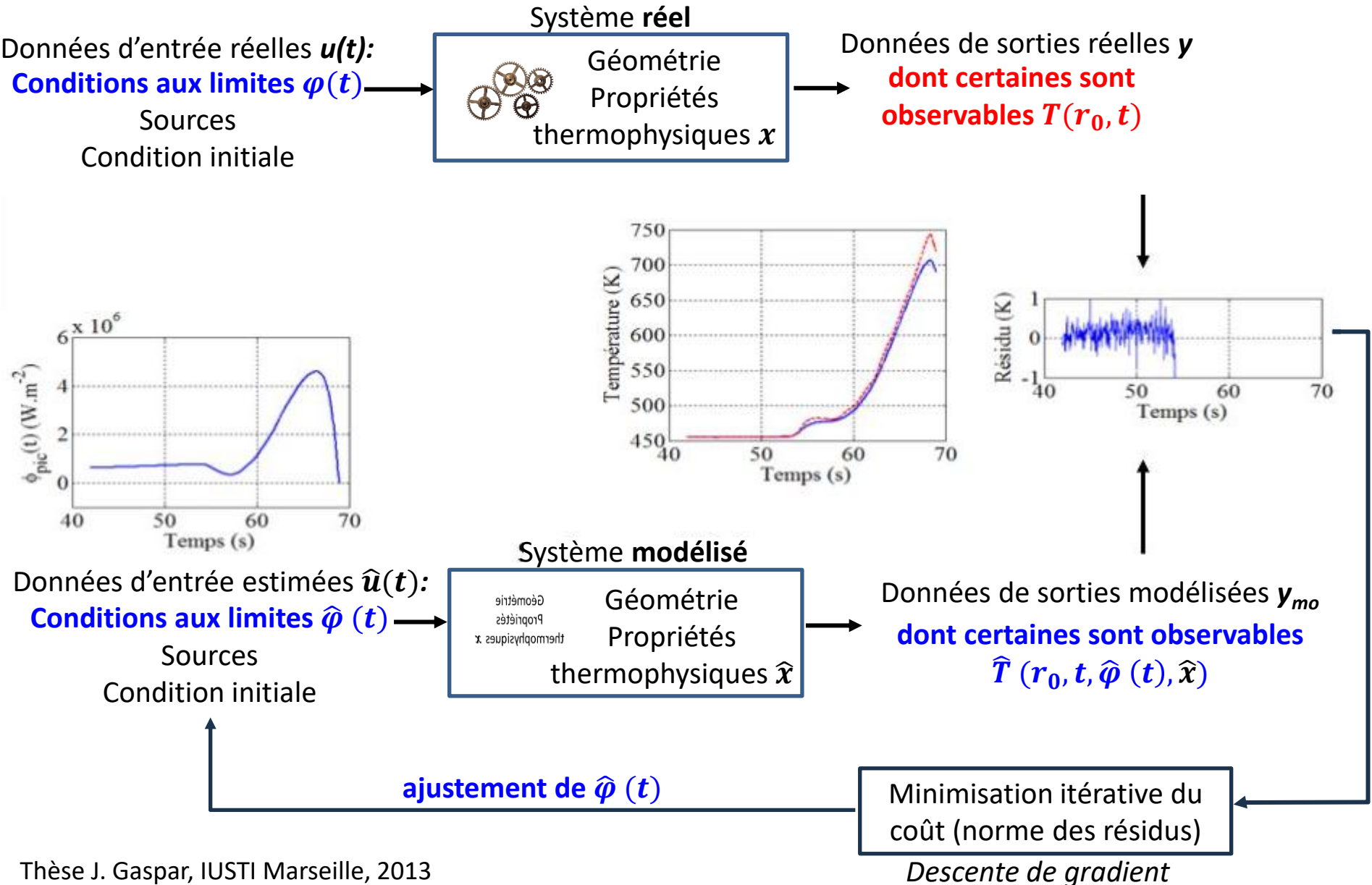




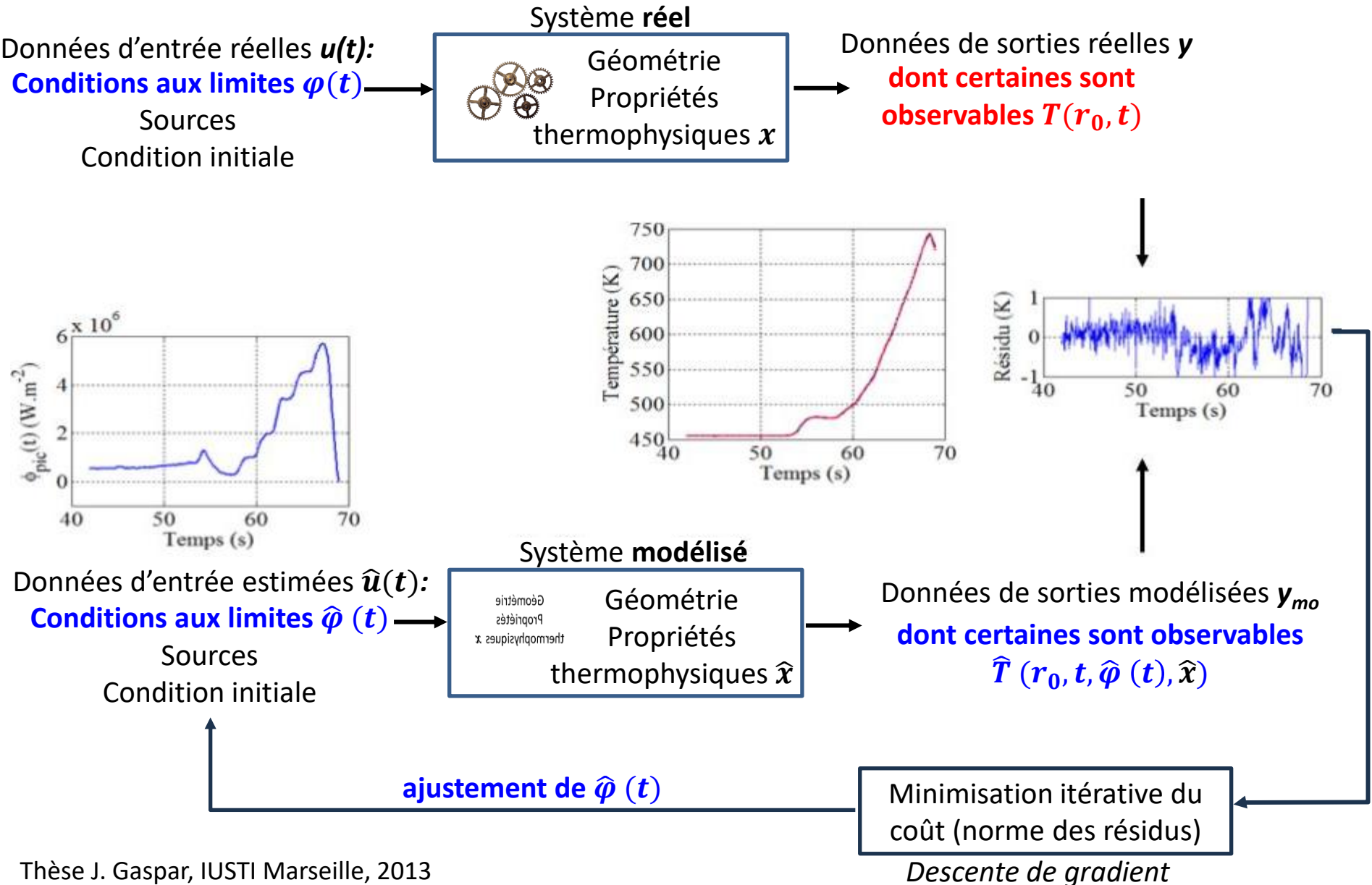
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies



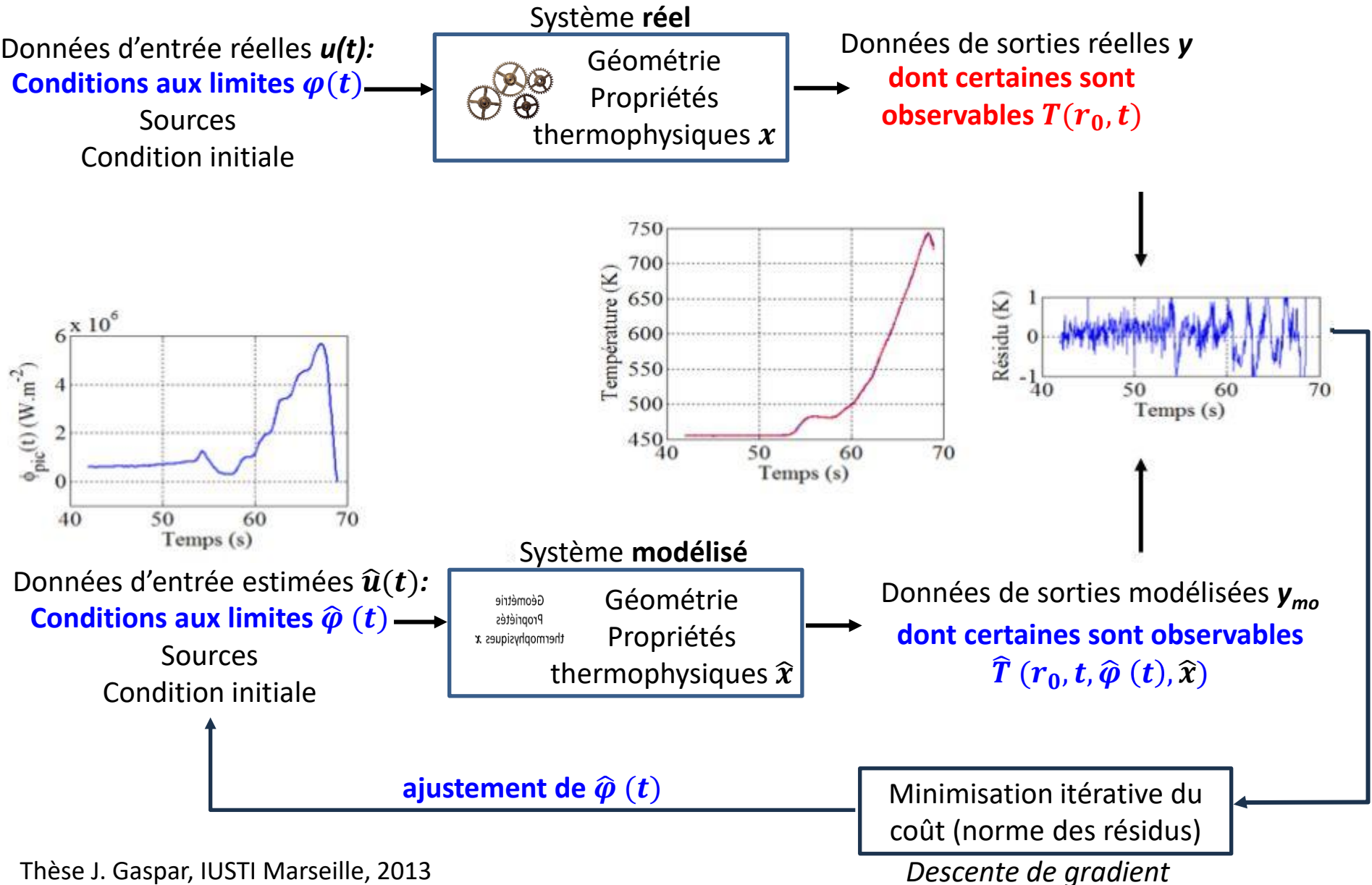
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies



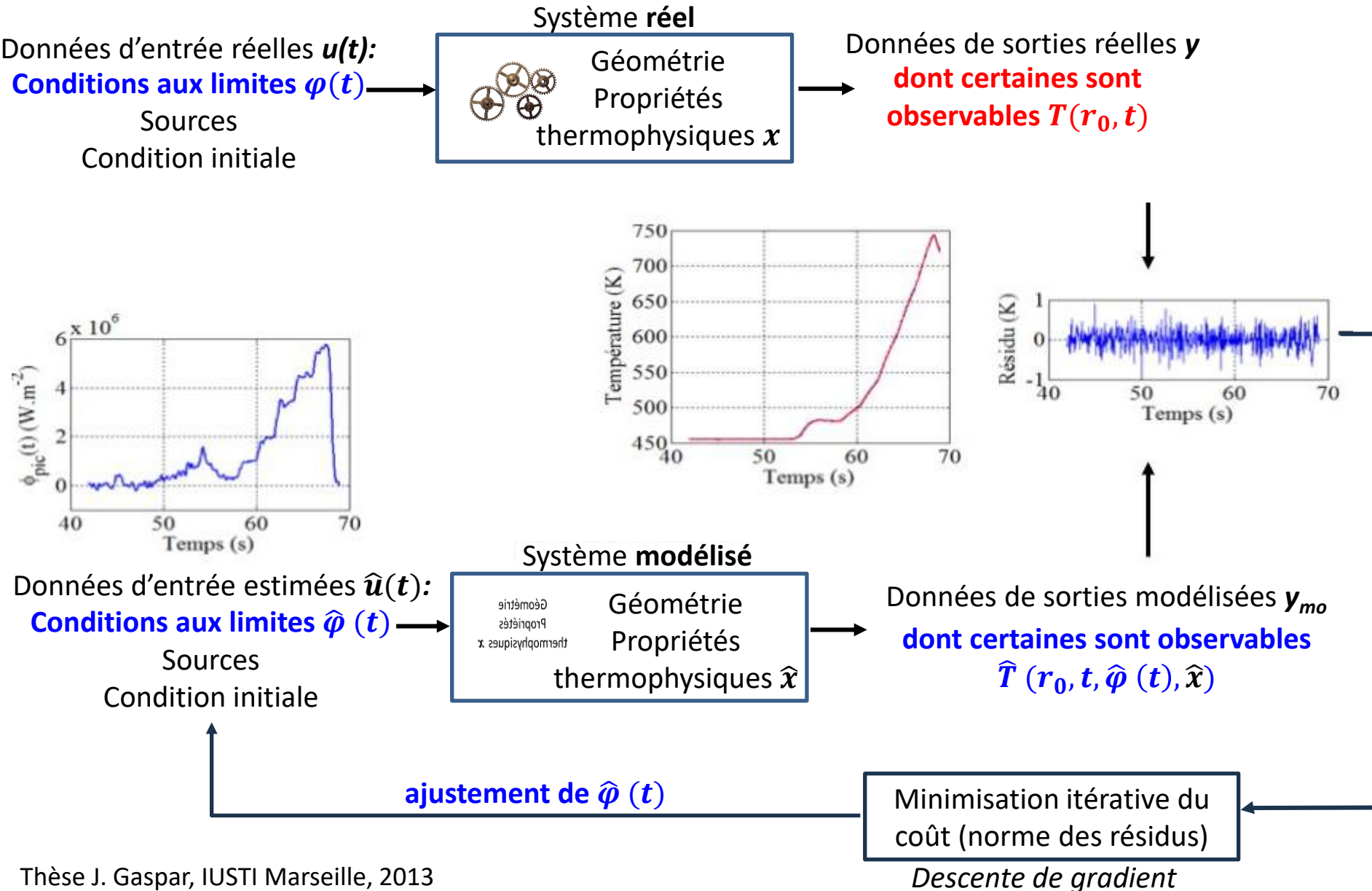
Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies



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

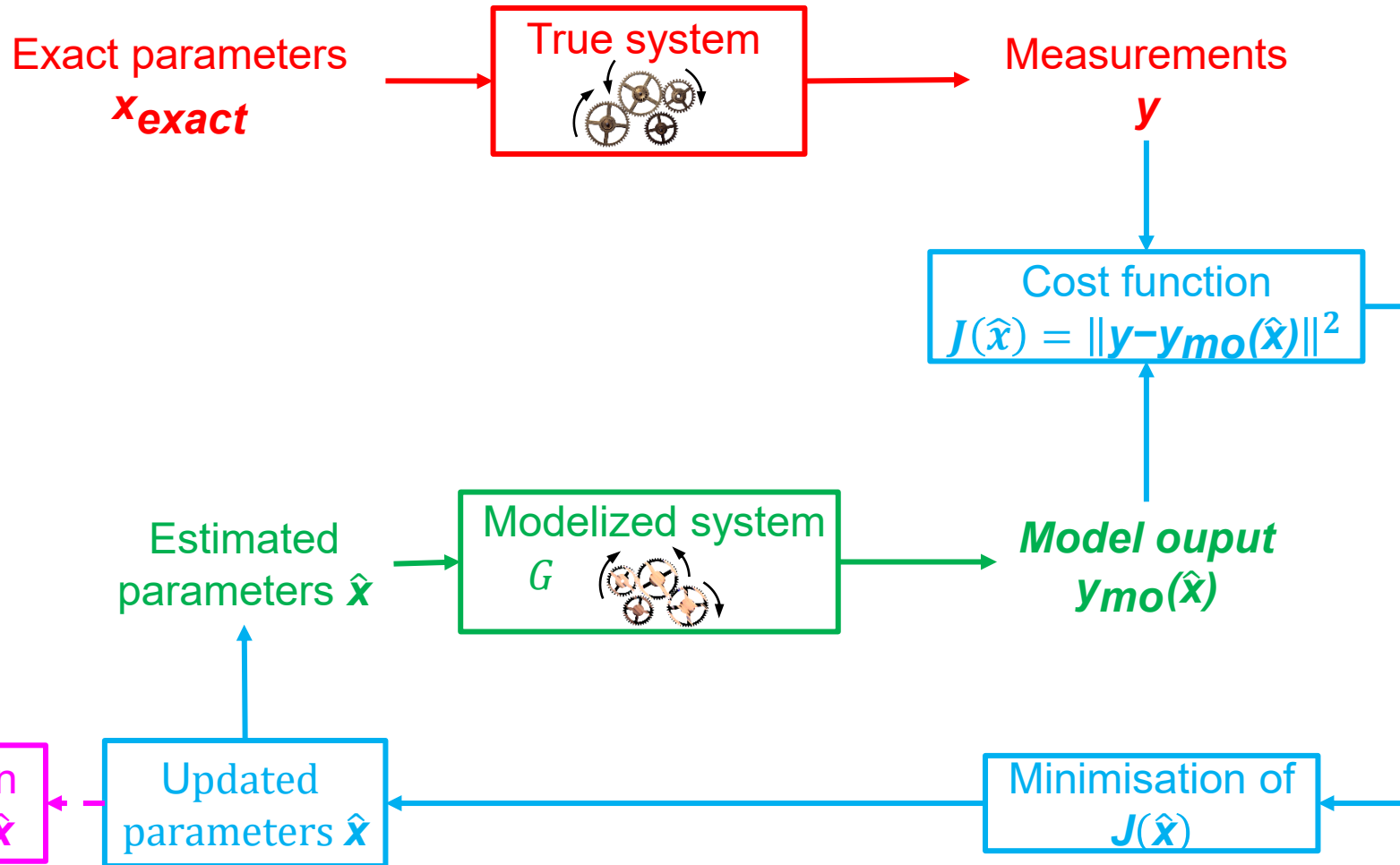


Exemple d'inversion de mesures en thermique : recherche d'un flux surfacique à partir de mesures d'échauffements enfouies



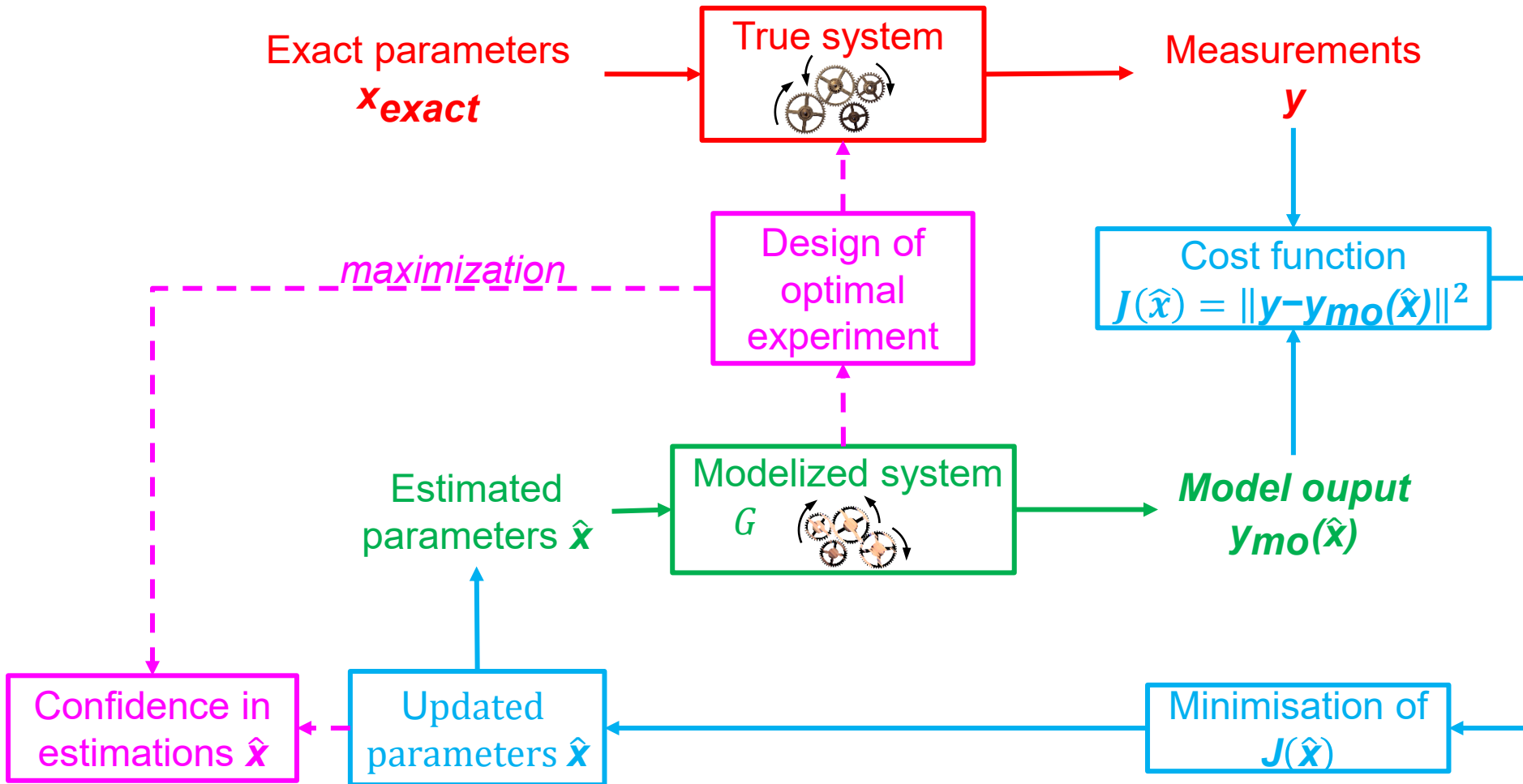
Introduction : forward / inverse problem

3,5th count : the **confidence** in **estimated parameters**



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 l'IA** peuvent-ils m'aider à résoudre certains de ces problèmes ?

Les documentations METTI – Ecoles thématiques



SFT
Société Française de Thermique

[Accueil](#)[Nous connaître](#)[Activités](#)[Documentation](#)

Journée SFT

→

Advanced School : Thermal Measurements & Inverse Techniques 5th edition (METTI5)

[METTI 5 Roscoff 2011](#)

→

Advanced School : Thermal Measurements & Inverse Techniques 6th edition (METTI6)

[METTI 6 Biarritz 2015](#)

→

Advanced School : Thermal Measurements & Inverse Techniques 7th edition (METTI 7)

[METTI 7 Porquerolles 2019](#)

→

École thématique

8ème Ecole thématique METTI (Thermal Measurements and Inverse Techniques)

24-29 septembre 2023, Ile d'Oléron, France

[METTI 8 Oléron, 2023](#)

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





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 Quémener, 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 Mallevial, 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:

- [Journée METTI – 11 juin 2026](#): Mesures Thermiques et Techniques Inverses : Approches originales en inversion de mesures - méthodes et applications.
- Journée commune METTI / Thermique Atmosphérique et adaptation au changement climatique : « Inversion de données radiatives », début décembre 2026
- 9th METTI School : 3-8 Octobre 2027 - Obernai, Alsace (30 km de Strasbourg)
- 12th ICIPE (Int. Conf. on Inverse Problems in Engineering : Theory and Practice. Ile de Porquerolles, 11-16 juin 2028.
<https://icipe2028.sciencesconf.org/>

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)

14h10 - 14h40 : 5 - " **Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les profils d'effusivité $\text{sech}(xi)$ (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 GASPARD (IUSTI, Aix Marseille U.), Jean-Laurent GARDAREIN (IUSTI, Aix Marseille U.), Nathalie EHRET (IUSTI, Aix Marseille U.)

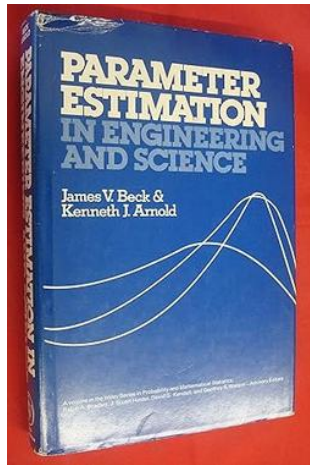
14h40 - 15h10 : 6 - " **Apports des modèles réduits paramétriques de type Spectral pour les problèmes inverses en thermique**", Julien BERGER (LASIE, U. La Rochelle), Suelen Gasparin (CEREMA), Helcio ORLANDE (COPPE RIO, Brésil), Caesar PACHECO (Universidade Federal Fluminense , Brésil)

• 15h10 - 15h30 : Pause

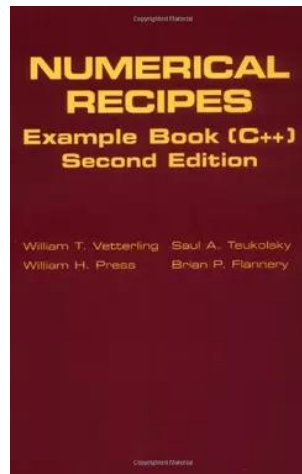
15h30 - 16h00 : 7 - " **Méthodes inverses appliquées à la modélisation de l'ablation de tumeurs du foie par micro-ondes** » , Ida BURGERS (I2M, CRMSB), Jean-Luc BATTAGLIA (I2M), Mariana de MELO ANTUNES (I2M), Valery OZENE (CRMSB)

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)

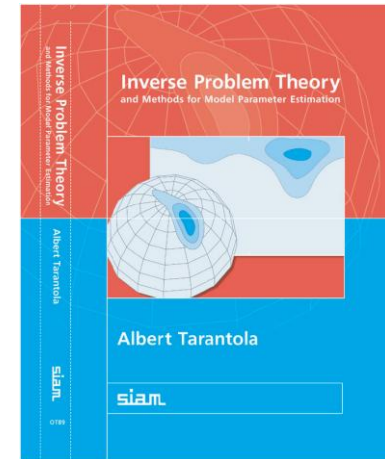
International references



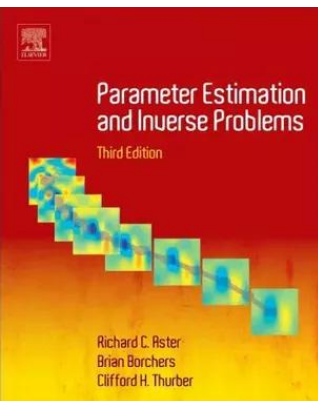
Beck, J. V. and Arnold K. J., *Parameter estimation in engineering and science*, John Wiley & Sons, 1977



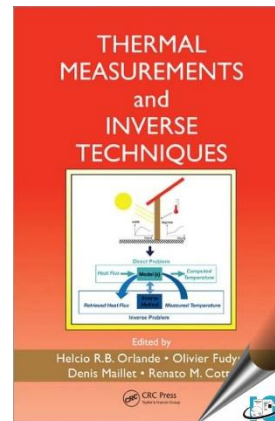
Numerical Recipes, William Press & al., Cambridge University Press, 1989



Tarantola 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. Orlando, 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.



Techniques inverses et estimation de paramètres. Partie 1

Techniques inverses et estimation de paramètres. Partie 2

par **Daniel PETIT**
Professeur à l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique ENSMA
Laboratoire d'Études Thermiques LET, UMR CNRS 6608
et **Denis MAILLET**
Professeur à l'Institut national polytechnique de Lorraine INPL
Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée LEMTA,
Nancy Université & CNRS

par **Daniel PETIT**
Professeur à l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique ENSMA
Laboratoire d'Études Thermiques LET, UMR CNRS 6608
et **Denis MAILLET**
Professeur à l'Institut national polytechnique de Lorraine INPL
Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée LEMTA,
Nancy Université & CNRS

<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 Énergétique.

- 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,



Problèmes inverses en diffusion thermique

Modèles diffusifs, mesures, sensibilités

Problèmes inverses en diffusion thermique

Formulation et résolution du problème des moindres carrés

par **Denis MAILLET**
Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL)
Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) - CNRS et
Nancy-Université
Yvon JARNY
Professeur à l'École Polytechnique de l'Université de Nantes
Laboratoire de Thermodynamique - UMR CNRS 8007 Nantes
Daniel PETIT
Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA)
Institut P' UPR CNRS 3346 Département Fluides, Thermique, Combustion - Poitiers

Problèmes inverses en diffusion thermique

Outils spécifiques de conduction inverse et de régularisation