

# WITHOUT TAILORED MODELING DATA, NO SATISFACTORY CONTROL

Xavier Bombois

Laboratoire Ampère  
Ecole Centrale de Lyon

Journée Ampère - 6 juillet 2015

# Introduction

*Sans modèle, pas d'ingénierie avancée*

*Sans modèle, pas d'automatique performante*

Les systèmes en ingénierie deviennent de plus en plus complexes

Il est **illusoire de trouver un modèle parfait**

**Bonne nouvelle:** pour un objectif donné (p.ex. la commande), seul un nombre limité de propriétés du système sont vraiment pertinentes à modéliser

**Cahier des charges pour un modèle adéquat pour la commande:** un modèle avec peu d'incertitude sur ces propriétés pertinentes du système; grande incertitude permise pour les autres propriétés

# Introduction

*Sans modèle, pas d'ingénierie avancée*

*Sans modèle, pas d'automatique performante*

Les systèmes en ingénierie deviennent de plus en plus complexes

Il est **illusoire de trouver un modèle parfait**

**Bonne nouvelle:** pour un objectif donné (p.ex. la commande), seul un nombre limité de propriétés du système sont vraiment pertinentes à modéliser

**Cahier des charges pour un modèle adéquat pour la commande:** un modèle avec peu d'incertitude sur ces propriétés pertinentes du système; grande incertitude permise pour les autres propriétés

# Introduction

*Sans modèle, pas d'ingénierie avancée*

*Sans modèle, pas d'automatique performante*

Les systèmes en ingénierie deviennent de plus en plus complexes

Il est **illusoire de trouver un modèle parfait**

**Bonne nouvelle:** pour un objectif donné (p.ex. la commande), seul un nombre limité de propriétés du système sont vraiment pertinentes à modéliser

**Cahier des charges pour un modèle adéquat pour la commande:** un modèle avec peu d'incertitude sur ces propriétés pertinentes du système; grande incertitude permise pour les autres propriétés

## *Sans données, pas de modèle*

Des données sont toujours nécessaires pour déterminer/identifier un modèle d'un système

Données obtenues en appliquant un signal d'excitation à l'entrée du système et en mesurant l'effet de cette excitation en sortie

le signal d'excitation perturbe le système et engendre ainsi un coût économique - particulièrement important si le système est une unité de production industrielle

**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

## *Sans données, pas de modèle*

Des données sont toujours nécessaires pour déterminer/identifier un modèle d'un système

Données obtenues en appliquant un signal d'excitation à l'entrée du système et en mesurant l'effet de cette excitation en sortie

le signal d'excitation perturbe le système et engendre ainsi un coût économique - particulièrement important si le système est une unité de production industrielle

**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

**Notre solution:** choisir le signal d'excitation de manière optimale

Ce signal doit être optimisé pour faire ressortir **uniquement** les propriétés pertinentes du système pour la commande

⇒ coût économique minimal menant néanmoins à un modèle adéquat pour la commande

*Without tailored modeling data, no satisfactory control at a reasonable cost*

**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

**Notre solution:** choisir le signal d'excitation de manière optimale

Ce signal doit être optimisé pour faire ressortir **uniquement** les propriétés pertinentes du système pour la commande

⇒ coût économique minimal menant néanmoins à un modèle adéquat pour la commande

*Without tailored modeling data, no satisfactory control at a reasonable cost*



**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

**Notre solution:** choisir le signal d'excitation de manière optimale

Ce signal doit être optimisé pour faire ressortir **uniquement** les propriétés pertinentes du système pour la commande

⇒ coût économique minimal menant néanmoins à un modèle adéquat pour la commande

*Without tailored modeling data, no satisfactory control at a reasonable cost*

**Objectif:** obtenir un modèle adéquat pour la commande à un coût économique raisonnable

**Notre solution:** choisir le signal d'excitation de manière optimale

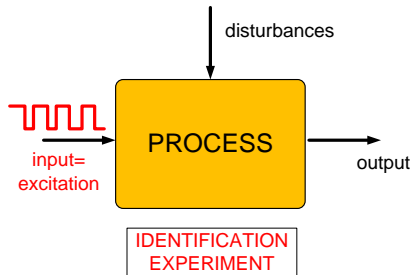
Ce signal doit être optimisé pour faire ressortir **uniquement** les propriétés pertinentes du système pour la commande

⇒ coût économique minimal menant néanmoins à un modèle adéquat pour la commande

*Without tailored modeling data, no satisfactory control at a reasonable cost*

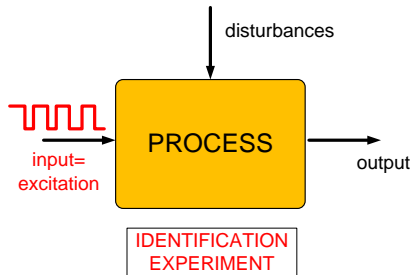
# Combinaison Identification et Commande

p.ex. synthèse d'un correcteur de haut niveau pour un procédé industriel



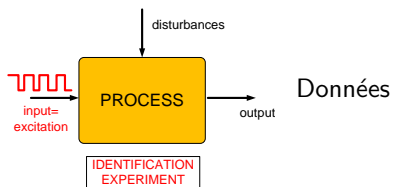
# Combinaison Identification et Commande

p.ex. synthèse d'un correcteur de haut niveau pour un procédé industriel

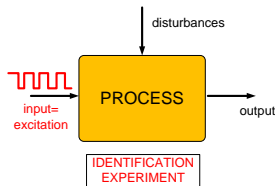


le signal d'excitation perturbe le système et engendre ainsi un **coût économique** - pouvant être p.ex. mesuré par la puissance du signal d'excitation

# Combinaison Identification et Commande

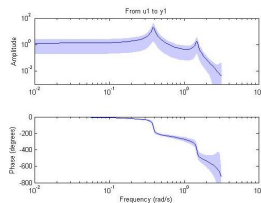


# Combinaison Identification et Commande

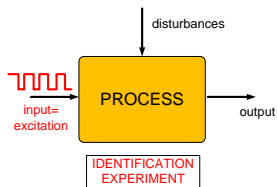


Identification

Données  $\rightarrow$  Modèle incertain

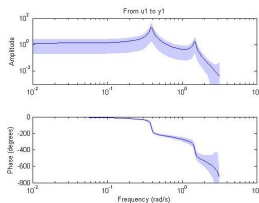


# Combinaison Identification et Commande



## Identification

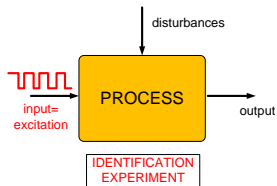
Données  $\rightarrow$  Modèle incertain



## Commande

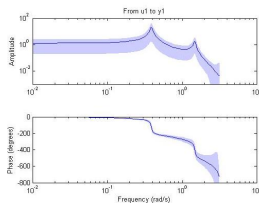
Modèle  $\rightarrow$  Régulateur

# Combinaison Identification et Commande



## Identification

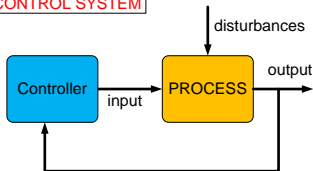
Données  $\rightarrow$  Modèle incertain



## Commande

Modèle  $\rightarrow$  Régulateur

MODEL-BASED  
CONTROL SYSTEM



Performance  
évaluée a priori par  
**analyse de la robustesse**  
p/r à  
l'incertitude du modèle



# Identification d'un modèle adéquat pour la commande: un problème complexe

Identification et Commande Robuste: thématiques bien développées (identification par erreur de prédiction, commande  $H_\infty$ ,  $\mu$ -analyse), mais de manière indépendante

Une combinaison optimale de ces deux techniques est un problème complexe

En d'autres mots, obtenir des modèles adéquats pour la commande par identification est une tâche difficile

Gevers, "Towards a joint design of identification and control?", *Essays on Control: Perspectives in the Theory and its Applications*, 1993

# Identification d'un modèle adéquat pour la commande: un problème complexe

rôle central de l'incertitude du modèle identifié dans l'interaction  
identification-commande

- L'incertitude du modèle identifié dépend fortement de l'expérience d'identification (càd du signal d'excitation)
- excitation  $\searrow$  (càd coût  $\searrow$ )  $\implies$  taille de l'incertitude  $\nearrow$
- Une incertitude trop grande rend impossible la synthèse d'un régulateur satisfaisant

Bombois et al., "Robustness analysis tools for an uncertainty set obtained by prediction error identification", *Automatica*, 2001

Bombois et al., "Least costly identification for control", *Automatica*, 2006

# Identification d'un modèle adéquat pour la commande: un problème complexe

rôle central de l'incertitude du modèle identifié dans l'interaction  
identification-commande

- L'incertitude du modèle identifié dépend fortement de l'expérience d'identification (càd du signal d'excitation)
- excitation  $\searrow$  (càd coût  $\searrow$ )  $\implies$  taille de l'incertitude  $\nearrow$
- Une incertitude trop grande rend impossible la synthèse d'un régulateur satisfaisant

Bombois et al., "Robustness analysis tools for an uncertainty set obtained by prediction error identification", *Automatica*, 2001

Bombois et al., "Least costly identification for control", *Automatica*, 2006

# Identification d'un modèle adéquat pour la commande: un problème complexe

rôle central de l'incertitude du modèle identifié dans l'interaction  
identification-commande

- L'incertitude du modèle identifié dépend fortement de l'expérience d'identification (càd du signal d'excitation)
- excitation  $\searrow$  (càd coût  $\searrow$ )  $\implies$  taille de l'incertitude  $\nearrow$
- Une incertitude trop grande rend impossible la synthèse d'un régulateur satisfaisant

Bombois et al., "Robustness analysis tools for an uncertainty set obtained by prediction error identification", *Automatica*, 2001

Bombois et al., "Least costly identification for control", *Automatica*, 2006

# Notre paradigme pour la synthèse de l'identification en vue de la commande

Bombois et al., "Least costly identification for control", Automatica, 2006

Synthèse de l'expérience d'**identification la moins coûteuse menant à une incertitude de modèle suffisamment petite** pour permettre la synthèse d'un régulateur satisfaisant

compromis idéal entre le coût de l'identification et la taille de l'incertitude

# Notre paradigme pour la synthèse de l'identification en vue de la commande

Bombois et al., "Least costly identification for control", Automatica, 2006

Synthèse de l'expérience d'**identification la moins coûteuse menant à une incertitude de modèle suffisamment petite** pour permettre la synthèse d'un régulateur satisfaisant

**compromis idéal** entre le coût de l'identification et la taille de l'incertitude

# Signal d'excitation optimal pour la commande

L'incertitude dépend de la puissance du signal et de sa distribution dans le domaine fréquentiel

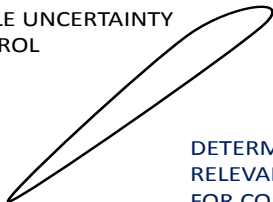
Concentrer la puissance dans une bande de fréquence optimale permet d'**obtenir l'information pertinente pour la commande à un moindre coût**

# Signal d'excitation optimal pour la commande

L'incertitude dépend de la puissance du signal et de sa distribution dans le domaine fréquentiel

Concentrer la puissance dans une bande de fréquence optimale permet d'**obtenir l'information pertinente pour la commande à un moindre coût**

ADMISSIBLE UNCERTAINTY  
FOR CONTROL



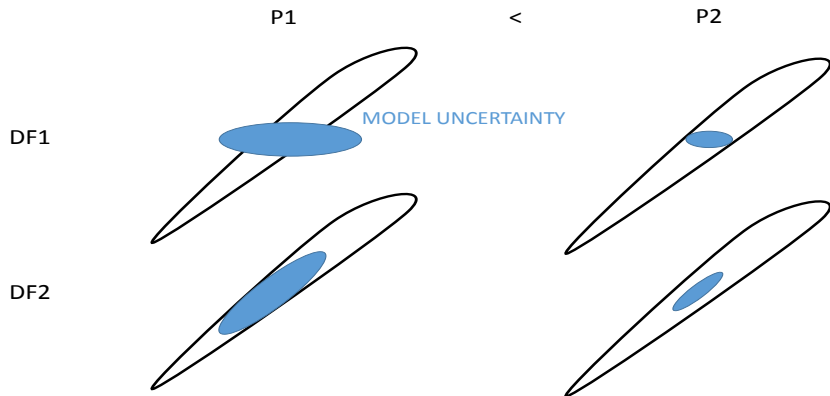
DETERMINES THE  
RELEVANT PROPERTIES  
FOR CONTROL



# Signal d'excitation optimal pour la commande

L'incertitude dépend de la puissance du signal et de sa distribution dans le domaine fréquentiel

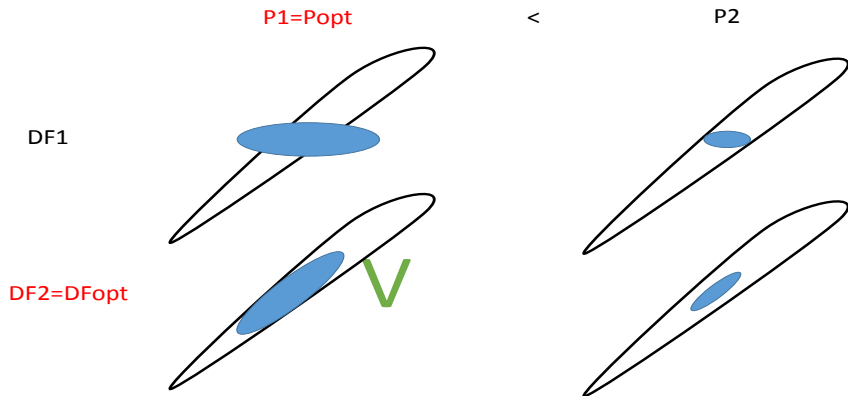
Concentrer la puissance dans une bande de fréquence optimale permet d'**obtenir l'information pertinente pour la commande à un moindre coût**



# Signal d'excitation optimal pour la commande

L'incertitude dépend de la puissance du signal et de sa distribution dans le domaine fréquentiel

Concentrer la puissance dans une bande de fréquence optimale permet d'**obtenir l'information pertinente pour la commande à un moindre coût**



# Quelques remarques sur notre paradigme

Problème d'**optimisation convexe** (utilisation d'un *first guess* du procédé à identifier)

Coût d'une expérience d'identification ??

- puissance du signal d'excitation
- puissance des perturbations induites par ce signal d'excitation sur les conditions opérationnelles du système

**Extension possible:** d'autres applications du modèle identifié peuvent aussi être considérées (diagnostic, déconvolution, supervision)

# Quelques remarques sur notre paradigme

Problème d'**optimisation convexe** (utilisation d'un *first guess* du procédé à identifier)

Coût d'une expérience d'identification ??

- puissance du signal d'excitation
- puissance des perturbations induites par ce signal d'excitation sur les conditions opérationnelles du système

**Extension possible:** d'autres applications du modèle identifié peuvent aussi être considérées (diagnostic, déconvolution, supervision)

# Quelques remarques sur notre paradigme

Problème d'**optimisation convexe** (utilisation d'un *first guess* du procédé à identifier)

Coût d'une expérience d'identification ??

- puissance du signal d'excitation
- puissance des perturbations induites par ce signal d'excitation sur les conditions opérationnelles du système

**Extension possible:** d'autres applications du modèle identifié peuvent aussi être considérées (diagnostic, déconvolution, supervision)

# Utiliser l'excitation optimale: est-ce vraiment nécessaire?

Utilisons notre approche pour le système de laboratoire suivant

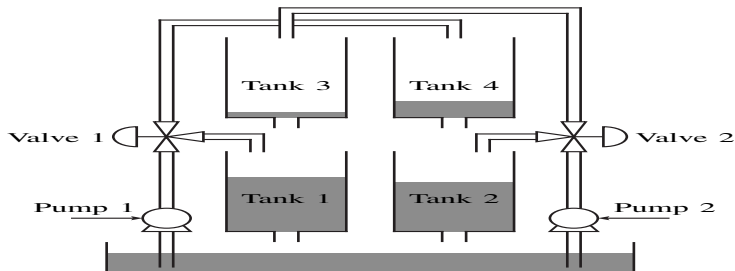
Collaboration avec M. Annegren, C. Larsson et H. Hjalmarsson (KTH Stockholm)

# Utiliser l'excitation optimale: est-ce vraiment nécessaire?

Utilisons notre approche pour le système de laboratoire suivant

**Objectif de commande:** asservissement du niveau des réservoirs 1 et 2

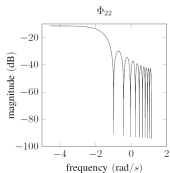
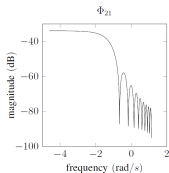
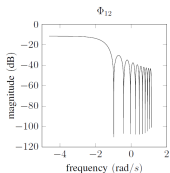
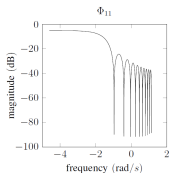
**Signaux de commande et d'excitation:** tensions pompes 1 et 2



Collaboration avec M. Annegren, C. Larsson et H. Hjalmarsson (KTH Stockholm)

# Identifions le modèle nécessaire à la synthèse d'un correcteur MPC pour l'asservissement

- avec le signal d'excitation optimal pour cet objectif de commande
- 

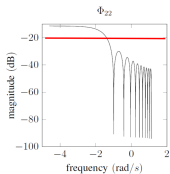
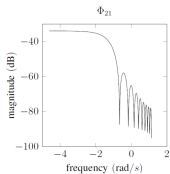
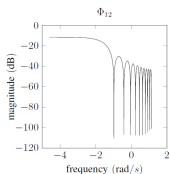
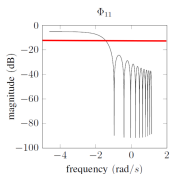


Puissance faible pour une expérience de 5 minutes



# Identifions le modèle nécessaire à la synthèse d'un correcteur MPC pour l'asservissement

- avec le signal d'excitation optimal pour cet objectif de commande
- avec un bruit blanc de même puissance càd de même coût (rouge)



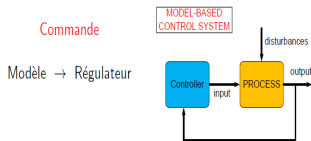
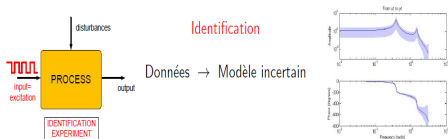
Puissance faible pour une expérience de 5 minutes

Identifions le modèle nécessaire à la synthèse d'un correcteur MPC pour l'asservissement

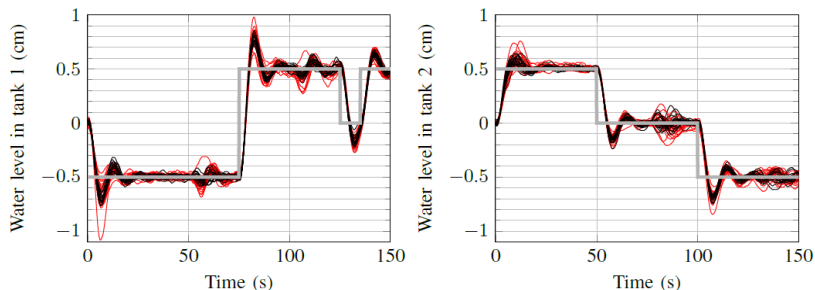
- avec le signal d'excitation optimal pour cet objectif de commande
- avec un bruit blanc de même puissance càd de même coût

Effectuons 20 essais.

Comparons la performance d'un MPC obtenu avec ces deux signaux.



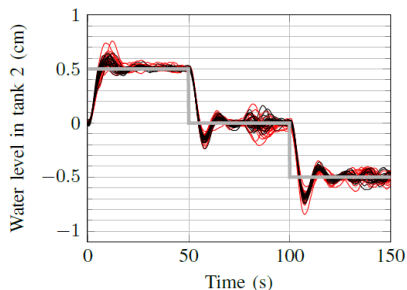
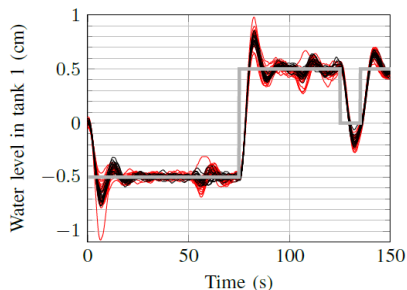
## Performance en poursuite des correcteurs MPC obtenus avec ces deux signaux de même puissance



Malgré la faible excitation, la performance est toujours adéquate avec le signal optimal (noir)

Elle est plus variable avec le bruit blanc de même puissance (rouge)

## Performance en poursuite des correcteurs MPC obtenus avec ces deux signaux de même puissance



Malgré la faible excitation, la performance est toujours adéquate avec le signal optimal (noir)

Elle est plus variable avec le bruit blanc de même puissance (rouge)

# Attractivité de notre paradigme

De la théorie à la pratique

## *Une identification efficace et au coût minimum*

Ces caractéristiques attractives du point de vue économique ont permis

- de rassembler un consortium de partenaires académiques et industriels pour son application dans les **procédés industriels** (projet européen FP7 Autoprofit)
- de travailler avec le Smart Transmission Systems Lab (KTH Stockholm) pour son application dans les **réseaux de transmission électrique**

# Attractivité de notre paradigme

De la théorie à la pratique

*Une identification efficace et au coût minimum*

Ces caractéristiques attractives du point de vue économique ont permis

- de rassembler un consortium de partenaires académiques et industriels pour son application dans les **procédés industriels** (projet européen FP7 Autoprofit)
- de travailler avec le Smart Transmission Systems Lab (KTH Stockholm) pour son application dans les **réseaux de transmission électrique**

# Autoprofit (Budget: 2,5 millions d'euros)

Maintenance globale des procédés industriels

Identification de procédé chimique  $\implies$  modification de la qualité de la production  $\implies$  coût élevé



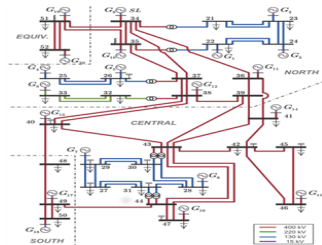
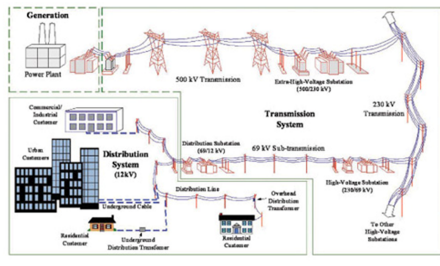
RWTHAACHEN



Application sur un procédé de flottation (Boliden) et un procédé de raffinage (Sasol)

Résultats prometteurs publiés dans Journal of Process Control

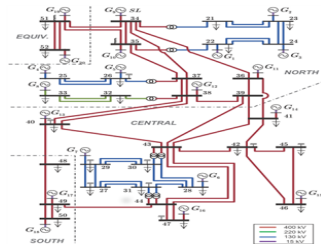
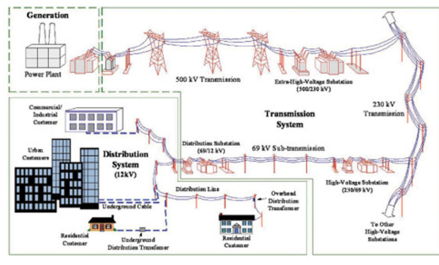
# Caractérisation des modes d'oscillation dans les réseaux de transmission électrique



Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)



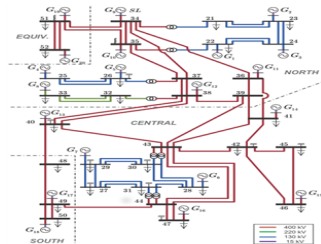
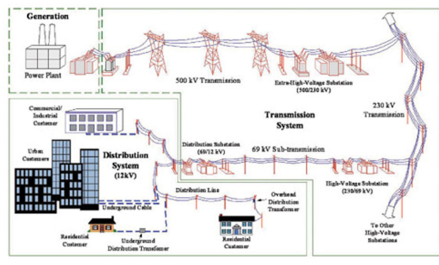
# Caractérisation des modes d'oscillation dans les réseaux de transmission électrique



le réseau doit pouvoir amortir les oscillations électromécaniques qui subviennent lors d'incidents (court-circuit)

Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)

# Caractérisation des modes d'oscillation dans les réseaux de transmission électrique



le réseau doit pouvoir amortir les oscillations électromécaniques qui subviennent lors d'incidents (court-circuit)

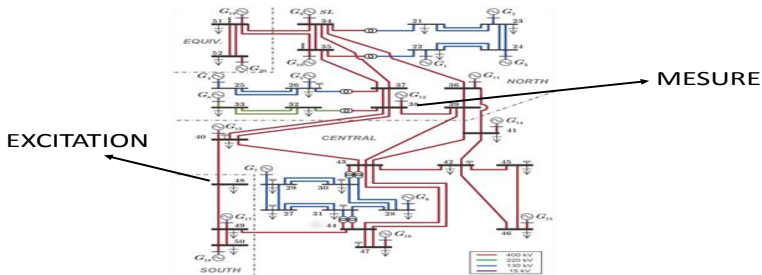
Ce coefficient d'amortissement  $\zeta$  peut varier au cours du temps et doit donc être monitoré

Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)

# Monitoring régulier de $\zeta$ : est-ce possible?

Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)

# Monitoring régulier de $\zeta$ : est-ce possible?

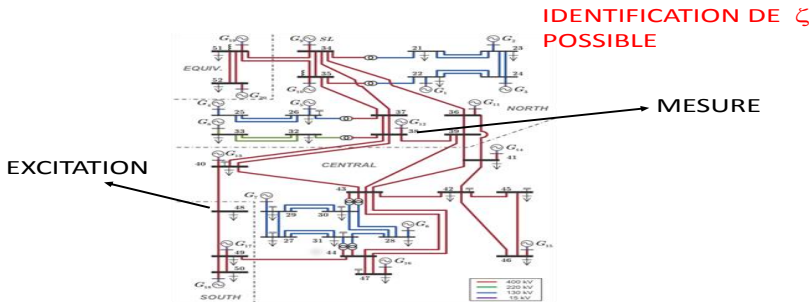


Mesure possible via Phasor Measurement Unit

De la puissance réactive peut être injectée en modulant la consigne d'un FACTS

Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)

# Monitoring régulier de $\zeta$ : est-ce possible?



Mesure possible via Phasor Measurement Unit

De la puissance réactive peut être injectée en modulant la consigne d'un FACTS

Collaboration avec V. Peric et L. Vanfretti (KTH Stockholm)

# Expérience optimale pour estimer $\zeta$

Notre paradigme permet de synthétiser une expérience garantissant

- a-priori une certaine précision pour l'estimée de  $\zeta$
- le minimum de perturbations dans le réseau

KTH Nordic Grid Simulator: la puissance injectée n'est que de 6 MVA pour une durée d'expérience de 10 minutes ( $\approx$  puissance d'un TGV)

Cette puissance doit être comparée à la puissance de 40000 MW traversant le réseau

Progrès significatif par rapport aux tests consistant

- en une étude transitoire après l'introduction d'une perturbation artificielle (ringdown): énorme perturbation
- en une identification en utilisant le bruit ambiant: faible précision

## Expérience optimale pour estimer $\zeta$

Notre paradigme permet de synthétiser une expérience garantissant

- a-priori une certaine précision pour l'estimée de  $\zeta$
- le minimum de perturbations dans le réseau

KTH Nordic Grid Simulator: la **puissance injectée n'est que de 6 MVA** pour une durée d'expérience de 10 minutes ( $\approx$  puissance d'un TGV)

Cette puissance doit être **comparée à la puissance de 40000 MW** traversant le réseau

Progrès significatif par rapport aux tests consistant

- en une étude transitoire après l'introduction d'une perturbation artificielle (ringdown): énorme perturbation
- en une identification en utilisant le bruit ambiant: faible précision

## Expérience optimale pour estimer $\zeta$

Notre paradigme permet de synthétiser une expérience garantissant

- a-priori une certaine précision pour l'estimée de  $\zeta$
- le minimum de perturbations dans le réseau

KTH Nordic Grid Simulator: la **puissance injectée n'est que de 6 MVA** pour une durée d'expérience de 10 minutes ( $\approx$  puissance d'un TGV)

Cette puissance doit être **comparée à la puissance de 40000 MW** traversant le réseau

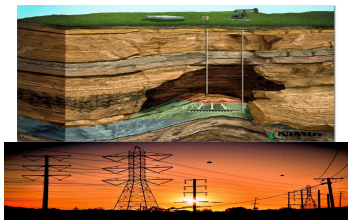
Progrès significatif par rapport aux tests consistant

- en une étude transitoire après l'introduction d'une perturbation artificielle (ringdown): énorme perturbation
- en une identification en utilisant le bruit ambiant: faible précision

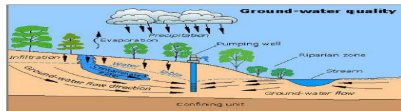
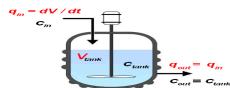


# Identification de paramètres physiques

- systèmes à paramètres distribués (EDP)
- systèmes nonlinéaires



Transmission of heat



⇒ **identification de paramètres physiques** dans une structure boîte grise

# Identification de paramètres physiques: Pourquoi?

Le cas d'estimées peu précises (variance ↗) est souvent rapporté

Le **choix du signal d'excitation** peut donc être encore plus **critique** pour ce genre de modèles

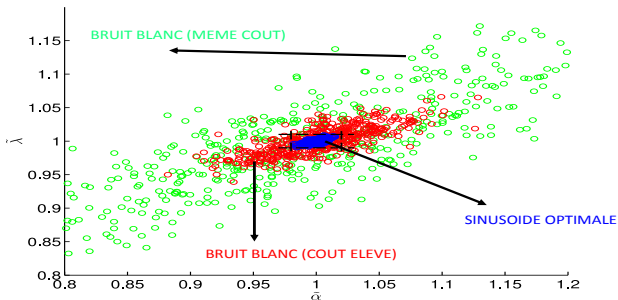
Collaboration avec M. Potters (TU Delft)

# Identification de paramètres physiques: Pourquoi?

Le cas d'estimées peu précises (variance ↗) est souvent rapporté

Le **choix du signal d'excitation** peut donc être encore plus **critique** pour ce genre de modèles

**Exemple:** Identification de la conductivité  $\lambda$  et de la diffusivité  $\alpha$



# Perspectives: systèmes à paramètres distribués

## 1) Identification de la porosité et de la perméabilité d'échantillons de réservoirs pétrolières

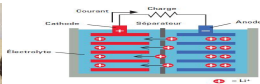
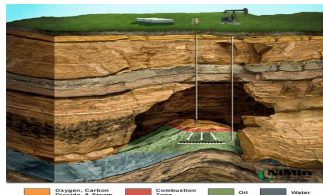
- Collaboration: Max Potters (DCSC, TU Delft) et Jan Dirk Janssen (Petroleum Engineering, TU Delft)

## 2) Localisation de défauts dans les lignes de transmission HVDC

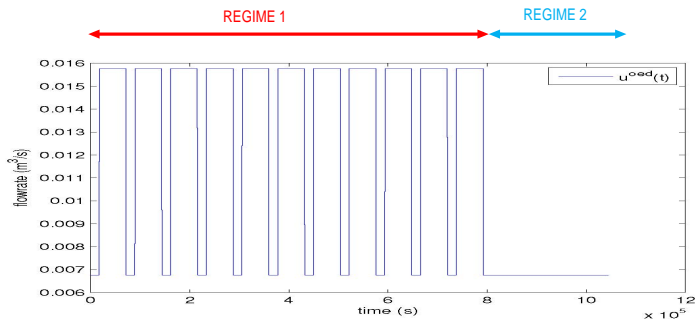
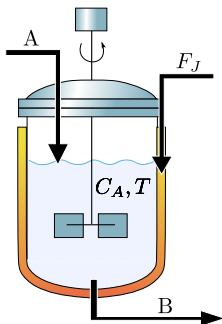
- Collaboration: M. di Loreto et F. Bribiesca

## 3) Identification des paramètres décrivant l'impédance des accumulateurs électrochimiques

- Collaboration: T. Poinot, J.D. Gabano et G. Mercère (LIAS, Poitiers)

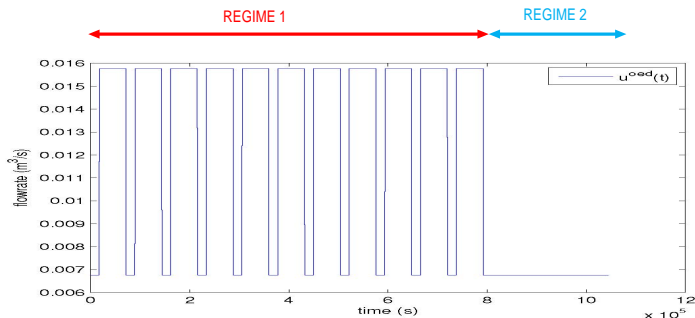
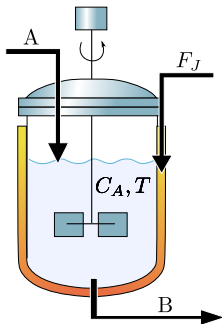


# Cas non linéaire: un cas vraiment particulier



Collaboration avec M. Forgione

# Cas non linéaire: un cas vraiment particulier



A l'opposé du cas LTI, le signal optimal d'excitation est non-stationnaire !!!

Cas non linéaire  $\implies$  choix du signal d'excitation doit se faire de manière non-classique

Collaboration avec M. Forgione

# Perspective: Identification optimale des systèmes nonlinéaires pour la commande

Beaucoup de nos résultats sont limités au cadre LTI, cadre d'origine de l'identification et la commande robuste

Une extension de notre paradigme au cas nonlinéaire est nécessaire

En effet, la prise en compte des dynamiques nonlinéaires permettent d'optimiser encore plus la performance des systèmes

Un **impact encore plus important** est attendu car les signaux d'excitation classiques seront inappropriés dans beaucoup de cas

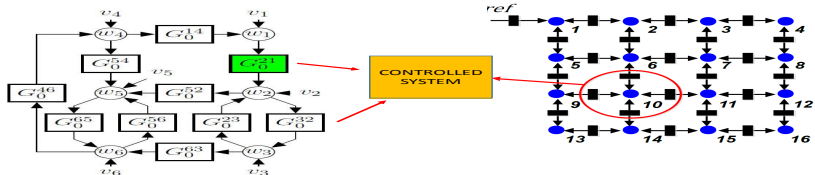
Première étape: le cas de systèmes temps-variants

Collaboration avec G. Scorletti, J. Huillery

# Perspective: De la performance locale à la performance globale

Jusqu'à présent, l'expérience d'identification est optimisée pour obtenir une performance satisfaisante **dans une boucle donnée**

Les systèmes commandés sont cependant de plus en plus interconnectés



*Comment tenir compte de la performance globale lors de l'identification de chaque module de système interconnecté?*



# Remarques finales

*Without tailored modeling data, no satisfactory control at a reasonable cost*

Optimisation du signal d'identification en vue de l'objectif du modèle

Des résultats prometteurs démontrent l'importance de cette thématique

Premières collaborations établies avec des membres du labo

En espérant que cette présentation puisse mener à de **nouveaux contacts**, je vous souhaite une bonne journée

*Un tout grand merci à Gérard, Hakan, Michel, Marco, Max, Mariette, Christian, Vedran, Luigi, Paul,...*