



# Analyse statistique d'expériences simulées : Modélisation adaptative de réponses non régulières par krigeage et plans d'expériences

*Application à la quantification des incertitudes  
en ingénierie des réservoirs pétroliers*

Thèse préparée par :  
Céline SCHEIDT

Responsable : Dominique COLLOMBIER

Encadrant IFP : Isabelle ZABALZA-MEZGHANI

- On dispose d'un modèle numérique de simulation  $f : \mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}$ 
  - $K$  : nombre de paramètres du modèle ( $K \gg 100$ )
    - Paramètres potentiellement incertains et de fort impact sur les réponses du modèle  $f$
  - Temps d'évaluation du modèle  $f$  très important
  - Régularité de  $f$  aux paramètres *a priori* inconnue
  - Évaluation numérique de  $f$  : expériences déterministes
- Objectif de la thèse :
  - Construire une approximation  $\tilde{f}$  du modèle numérique  $f$  sur l'ensemble du domaine défini comme l'espace de variation des paramètres incertains ( $k < K$ )
    - Ajustement d'un comportement polynomial ou non-régulier
    - Utilisation d'un nombre réduit d'évaluations de  $f$
- Application à la quantification des incertitudes en ingénierie pétrolière
  - Meilleure quantification des incertitudes et gestion des risques

- Mise en place d'une méthodologie de construction d'une fonction approchée  $\tilde{f}$ 
  - Modèle d'ajustement : régression & krigeage des résidus
  - Echantillonnage adaptatif
    - Plans d'expériences : Définition du plan initial
    - Ajout itératif de nouvelles simulations au plan d'expériences
      - prise en compte des caractéristiques du plan ET de la réponse
- Validation sur des fonctions types non-régulières et sur un cas synthétique pétrolier
- Mise en œuvre pour la quantification des incertitudes d'un réservoir pétrolier brésilien

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- Modélisation adaptative des incertitudes
- Applications
- Conclusions et Perspectives

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
  - Objectifs et enjeux
  - Notion d'incertitudes
  - Évaluation des incertitudes
    - Quels objectifs
    - Approche classique
    - Objectifs de la thèse
- Modélisation adaptative des incertitudes
- Applications
- Conclusions et Perspectives

## *Objectifs et enjeux*

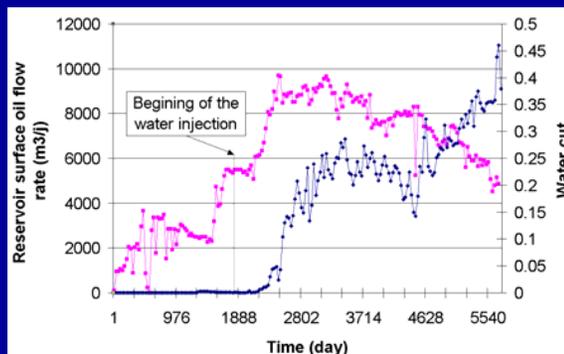
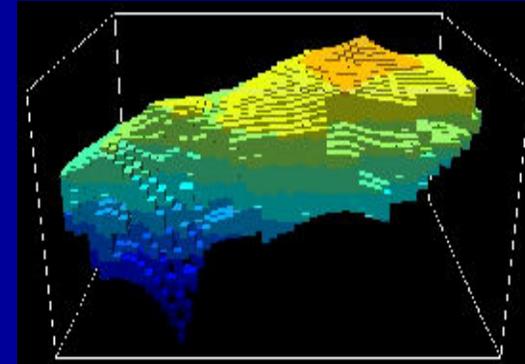
- Exploitation d'un gisement de gaz ou de pétrole pour l'optimisation des rendements économiques
- Enjeux économiques : coûts d'exploitation et de production importants
  - Plusieurs dizaines ou centaines de puits - prix pour un puits (\$ 1-10M)
  - Récupération assistée – injection de fluide pour augmenter la production
- Nécessité de comprendre, caractériser et prévoir le comportement dynamique du gisement
  - ➔ Recours à une modélisation numérique des phénomènes dans le gisement
- Problèmes :
  - Les gisements les plus complexes restent à exploiter
  - Plusieurs km<sup>2</sup>, enfouis dans de grandes profondeurs ou difficiles d'accès
  - Propriétés du gisement très mal connues et peu caractérisées

## Objectifs et enjeux

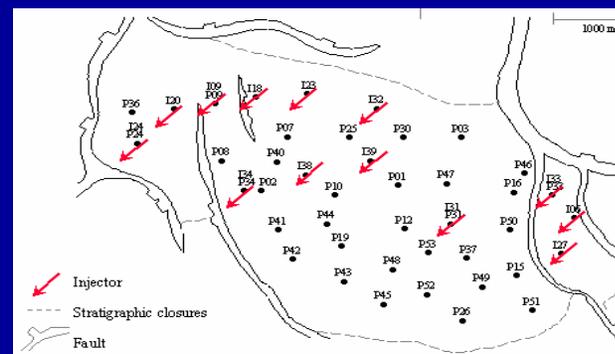
- Construction d'un modèle numérique de simulation de la production d'hydrocarbures en fonction des paramètres caractérisant les gisements :

$$f : IR^K \rightarrow IR$$

- Utilisation du simulateur  $f$  pour :
  - Comprendre le comportement dynamique du gisement
  - Prévoir la production future du gisement
  - Décider de l'intérêt économique d'un gisement
  - Construire et optimiser le schéma de production du gisement



Estimation de la production future



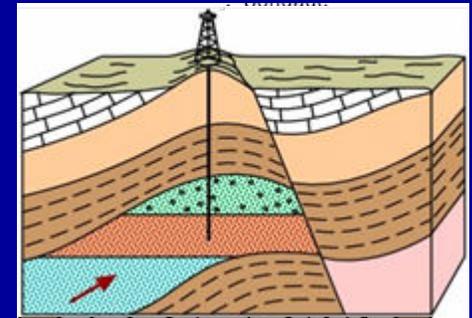
Emplacement des puits

## *Notion d'incertitudes*

- **Modèle de simulation impliquant un grand nombre de paramètres potentiellement incertains :**

- Paramètres liés au gisement

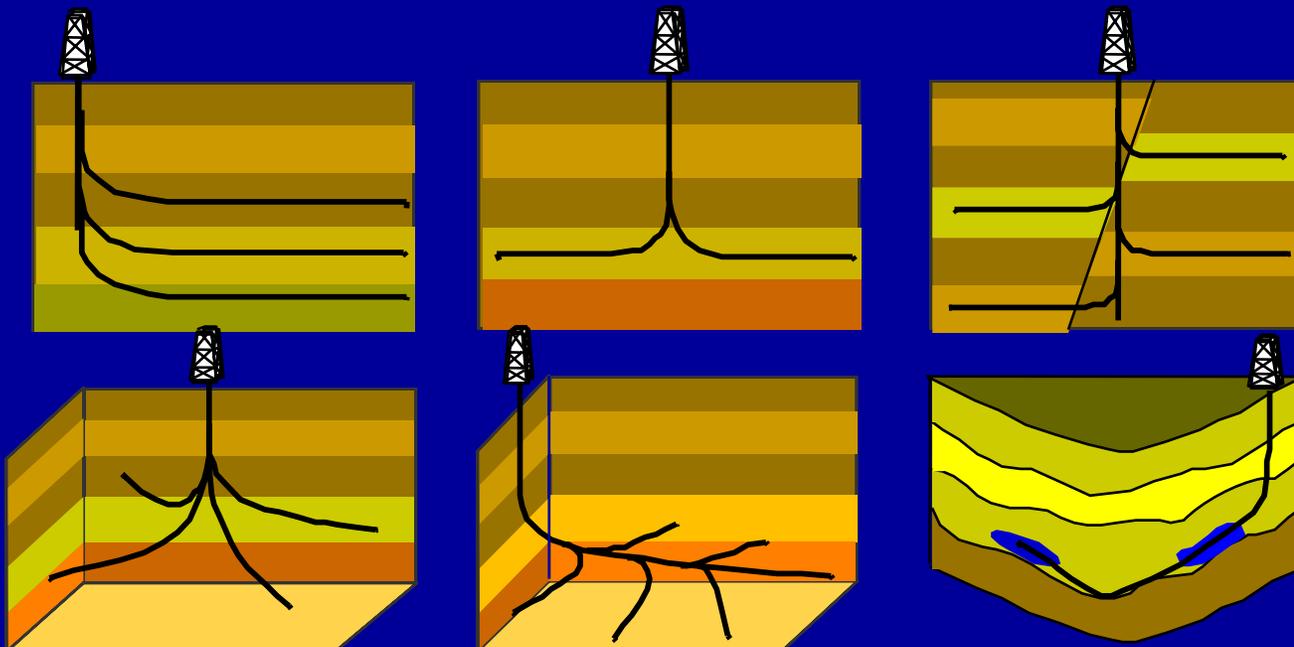
- **Géométrie du réservoir :** épaisseur, limites, présence d'aquifère, présence de faille, etc.



- **Propriétés des fluides** eau/gaz/huile : niveau des contacts entre les fluides, viscosité, saturations, PVT
- **Interactions roches/fluides :** perméabilités relatives
  - Capacité d'un fluide à se déplacer gênée par la présence d'un autre fluide
- **Puits & production :** Indice de productivité (IP), effet pariétal (skin)
  - Endommagement de la perméabilité aux abords du puits lié au forage

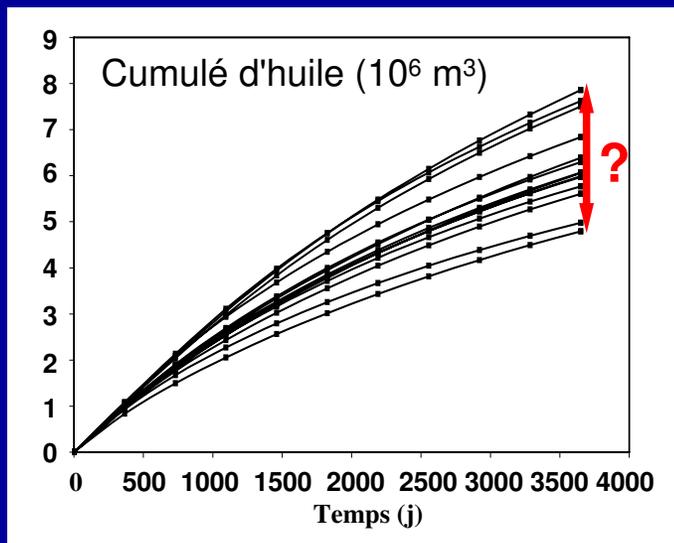
## *Notion d'incertitudes*

- Paramètres liés aux options de production :
  - **techniques de récupération** : injection, type d'injection (eau, gaz, eau+gaz, vapeur, polymères)
  - **puits** : nombre, type, emplacement, architecture
  - **débits** d'injection, de production



## Évaluation des incertitudes – Quels objectifs ?

- Propagation des incertitudes des paramètres du modèle sur les prévisions de production  $f(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}^k$



- Ces incertitudes sont-elles influentes sur les prévisions de production ?
- Comment quantifier ou réduire leur impact ?

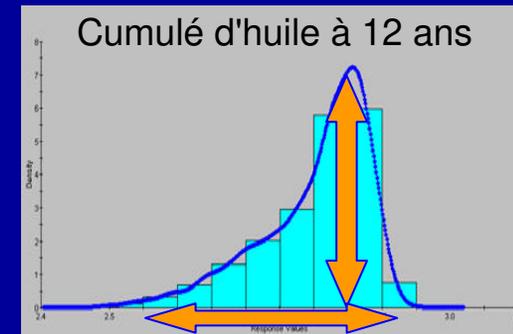
- ✓ Diagnostiquer les risques venant d'une mauvaise connaissance du réservoir
- ✓ Optimisation des schémas de développement

## Évaluation des incertitudes – Approche classique

- Évaluations de production obtenues par simulation déterministe
  - Incertitude sur les paramètres d'entrée permet de considérer la sortie du simulateur comme une **variable aléatoire**

### ➔ Emploi de techniques statistiques classiques

- Prédiction de la réponse moyenne et du risque induit par le contexte incertain par **échantillonnage Monte-Carlo** (Walstrom et al., 1967)
- Temps de simulation très importants :
  - de quelques heures à quelques jours



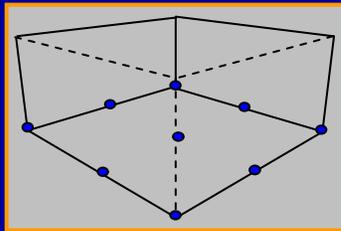
➔ Construction d'un **modèle approché** du simulateur pour une évaluation des risques par échantillonnage Monte-Carlo

Évaluation des risques

Plusieurs milliers de simulations

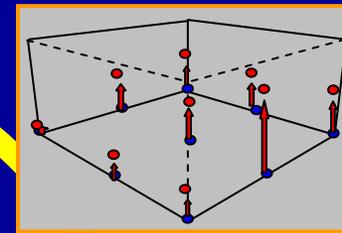
## Évaluation des incertitudes – Approche classique

- Évaluation des risques par un modèle approché → Calculs intensifs possibles

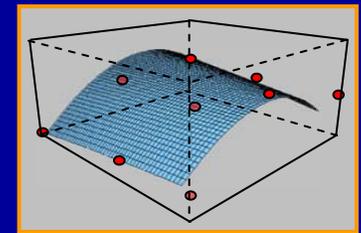


Plan d'expériences

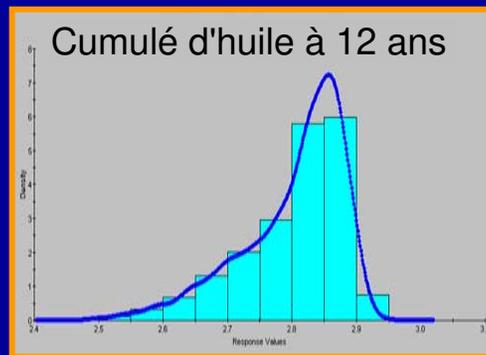
Sélection/Définition des simulations nécessaires à la compréhension des variations de production dues aux paramètres incertains



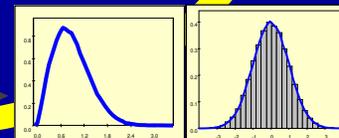
Simulation de la production



Surface ajustée par régression moindres-carrés



Echantillonnage Monte-Carlo



Distribution *a priori* des paramètres incertains

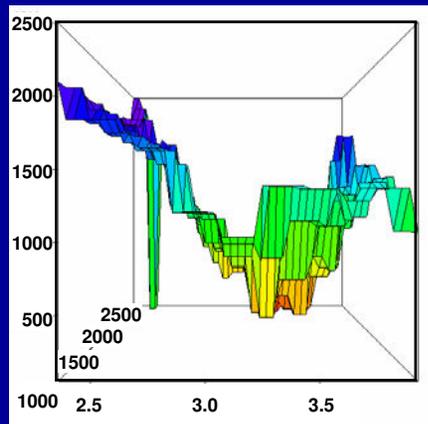
## *Évaluation des incertitudes – Approche classique*

- **Basée sur la méthode des plans d'expériences (Damsleth, 1992)**
  - utilisée pour les expériences **numériques** depuis 1990
  - peu coûteuse – analyse statistique rigoureuse
- **Application des plans d'expériences efficace pour :**
  - étude de sensibilité aux paramètres (Dejean *et al.*, 1999)
  - quantification des incertitudes (Zabalza-Mezghani *et al.*, 2003):
    - pour une réponse régulière
    - pour un domaine incertain restreint
- **Limite de la méthode des plans d'expériences :**
  - ne permet pas l'ajustement de réponses non-régulières

## Évaluation des Incertitudes – Objectifs de la thèse

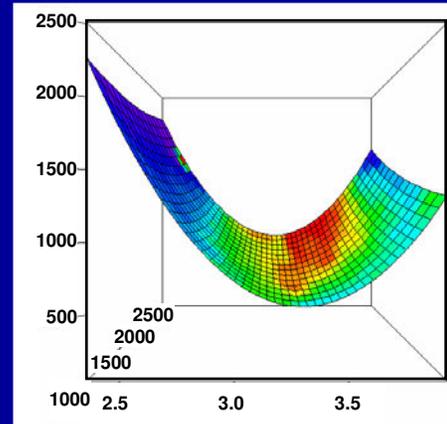
- $f$  peut être de comportement non-régulier
  - Mal approché par un polynôme de faible degré
  - Exemple : Production d'eau en fonction de la longueur et l'orientation d'un puits

Production d'eau simulée



Référence - 345 simulations

Production d'eau approchée



plan composite centré  
9 simulations

D'après C. Scheidt & al,  
ECMOR IX, Cannes, 2004

→ Nécessité de définir une nouvelle approche pour modéliser précisément une réponse non-régulière

Construction d'un **MODELE APPROCHE**  $\tilde{f}$  du  
modèle numérique d'écoulement  $f$  sur  $IR^k$

- Définition d'une méthodologie de modélisation du comportement de la production
  - ✓ sur l'ensemble du domaine incertain  $D=[-1,1]^k$
  - ✓ pour une réponse POLYNOMIALE ou NON-REGULIERE
  - ✓ pour un nombre limité de simulations

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**
  - Proposition méthodologique
  - Plan d'expériences initial et modèle
  - Augmentation du plan d'expériences
  - Amélioration du modèle
- Applications
- Conclusions et Perspectives

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**
  - Proposition méthodologique
  - Plan d'expériences initial et modèle
  - Augmentation du plan d'expériences
  - Amélioration du modèle
- Applications
- Conclusions et Perspectives

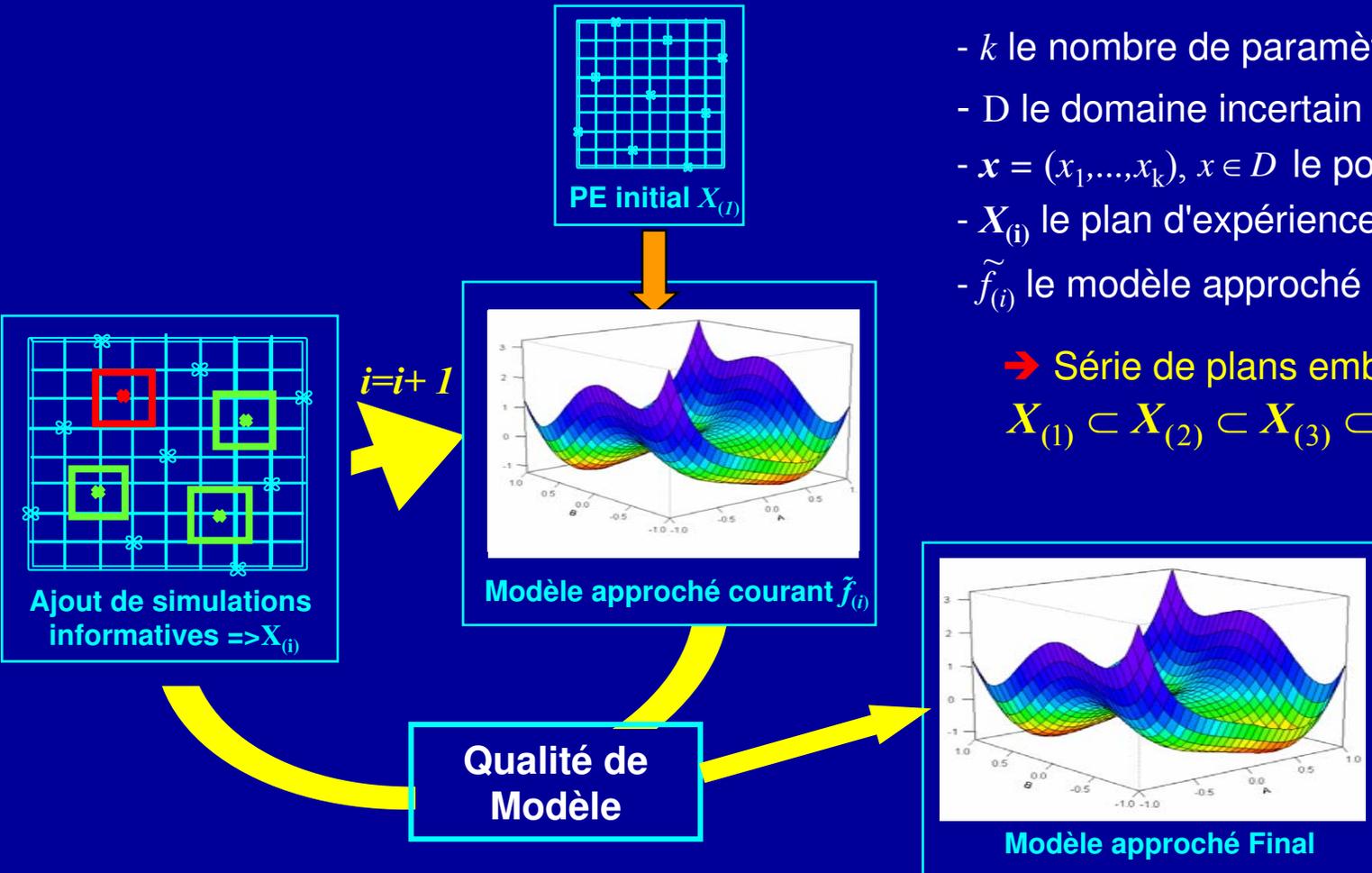
- **Motivation** : Prédiction fiable du modèle  $f$  sur l'ensemble du domaine  $D$
- **Modélisation** : Utilisation de méthodes d'interpolation géostatistique
  - adaptées aux expériences numériques déterministes
  - prise en compte de la structure de covariance entre les observations
- **Plans d'expériences adaptatifs** : pour un échantillon suffisamment représentatif
  - basés sur un **plan d'expériences classique**
    - mise à profit des propriétés des plans d'expériences :  
analyse statistique précise, réduction du nombre de simulations
  - amélioration de l'échantillon  $X$  et du modèle  $\tilde{f}$  par **corrections successives**

## Proposition méthodologique

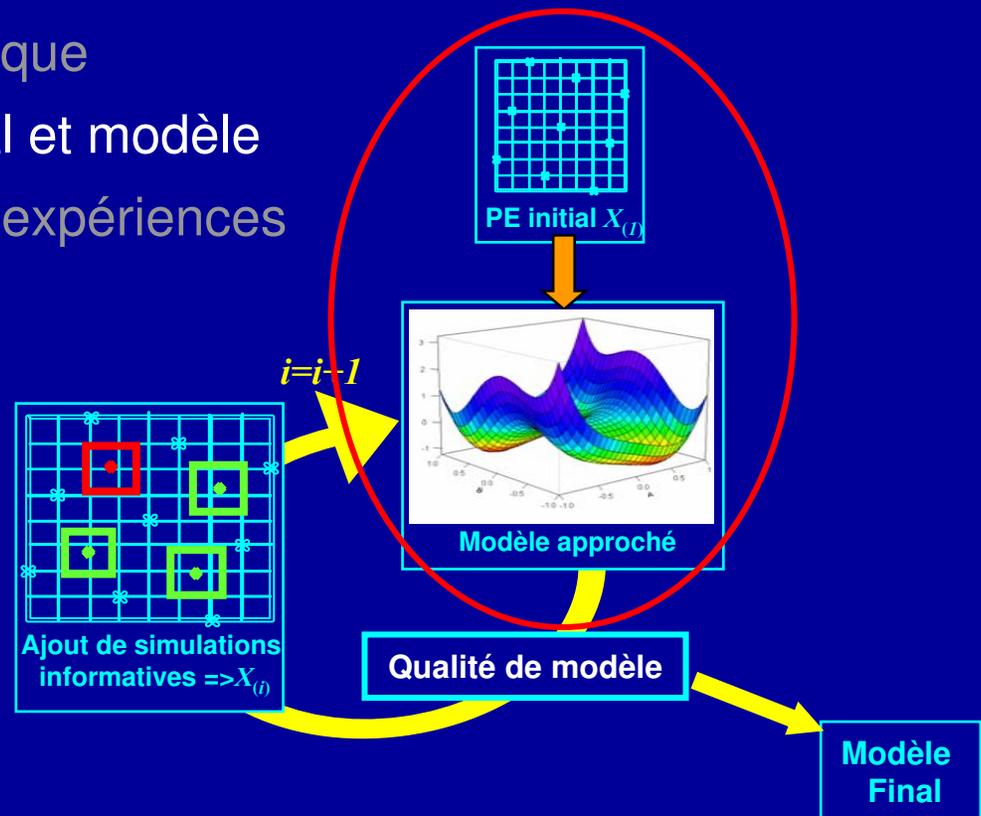
- $k$  le nombre de paramètres incertains
- $D$  le domaine incertain :  $D = [-1,1]^k$
- $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$ ,  $x \in D$  le point à simuler
- $X_{(i)}$  le plan d'expériences à l'itération  $i$
- $\tilde{f}_{(i)}$  le modèle approché associé à  $X_{(i)}$

→ Série de plans emboîtés :

$$X_{(1)} \subset X_{(2)} \subset X_{(3)} \subset \dots \subset X_{(m)} \in D$$



- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**
  - Proposition méthodologique
  - Plan d'expériences initial et modèle
  - Augmentation du plan d'expériences
  - Amélioration du modèle
- Applications
- Conclusions et Perspectives



## *Choix du plan d'expériences initial*

- **Plan initial  $X_{(1)}$  : plan d'expériences classique**
  - Différents  $X_{(1)}$  ont été étudiés : plans factoriels fractionnaires, plans composites, space filling designs, Hypercubes Latins, etc.
- **Choix du plan initial en fonction de l'objectif fixé :**
  - **Analyse de sensibilité** : Plans classiques factoriels fractionnaires ou Plackett-Burman
  - **Prédiction** : plans composites centrés ou Hypercubes Latins de distance maximin (Morris et al., 1995)

**→ Pas d'impact sur la qualité du modèle final  
à convergence**

## Choix du Modèle Approché : Un estimateur "composite" (1/2)

- Somme d'un modèle de **régression** et d'un **processus résiduel** (Sacks *et al.*, 1989)

$$\tilde{f}(\mathbf{x}) = \sum_j^p g_j(\mathbf{x}) \beta_j + Z(\mathbf{x}) = G(\mathbf{x})\beta + Z(\mathbf{x})$$

- avec  $G(\mathbf{x})\beta = E[f(\mathbf{x})]$  la partie paramétrique **déterministe** du modèle, par exemple un polynôme du second degré
- $Z(\mathbf{x})$  est un processus **STATIONNAIRE** de moyenne nulle et de covariance  $C$  :

$$C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = Cov(Z(\mathbf{x}_1), Z(\mathbf{x}_2)) = \sigma^2 R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2), \quad \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in D$$

## – Modèle composite / Interpolation directe des observations

- Classiquement : modèle de régression avec les plans d'expériences
  - Régression suffisante dans un grand nombre de cas
- Pas d'information dans tout le domaine : besoin d'un ajustement moyen

## Choix du Modèle Approché : Un estimateur "composite" (2/2)

- **Estimation de la partie moyenne** : moindres carrés ordinaires (MCO)

$$\tilde{\beta} = \left( {}^t\mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)})\mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)}) \right)^{-1} {}^t\mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)})\mathbf{f}(\mathbf{X}_{(i)})$$

– MCO / MCP

- MCO : A moindri l'impact de la covariance par ailleurs mal connue
- MCP : Fort poids dans les zones fortement échantillonnées

- **Estimation de la partie résiduelle par krigeage simple** :

– estimateur linéaire de **variance minimale** (Journel & Huijbregts, 1978)

$$\tilde{Z}(\mathbf{x}) = {}^t\mathbf{c}(\mathbf{x})\mathbf{C}^{-1}\mathbf{Z}(\mathbf{X}_{(i)}) \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbf{D}$$

avec :  $\mathbf{C} = \left[ \text{Cov}\left(\mathbf{Z}(\mathbf{x}_m), \mathbf{Z}(\mathbf{x}_j)\right), m, j = 1, \dots, n \right]$  et  ${}^t\mathbf{c}(\mathbf{x}) = \left[ \text{Cov}\left(\mathbf{Z}(\mathbf{x}), \mathbf{Z}(\mathbf{x}_j)\right), j = 1, \dots, n \right]$

→ **Modèle composite** :  $\tilde{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{G}(\mathbf{x})\tilde{\beta} + {}^t\mathbf{c}(\mathbf{x})\mathbf{C}^{-1}\left[\mathbf{f}(\mathbf{X}_{(i)}) - \mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)})\tilde{\beta}\right]$

Modèle préconisé en prédiction bayésienne (Currin et al., 1991)

*Problème : Estimation de la fonction de covariance*

- Structure de covariance *classiquement* utilisée (Sacks *et al.*, 1989) :

➤ *a priori* **gaussien** :  $C(\mathbf{h}) = \tilde{\sigma}^2 \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k \left( \frac{h_i}{\tilde{\theta}_1} \right)^2 \right\}$

- Optimisation des paramètres de covariance par **maximum de vraisemblance** (Currin *et al.*, 1991) :

➤  $\tilde{\sigma}_{MV}^2 = \tilde{\sigma}_{MV}^2(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{n} {}^t(\mathbf{f}(\mathbf{X}_{(i)}) - \mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)})\tilde{\boldsymbol{\beta}})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f}(\mathbf{X}_{(i)}) - \mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)})\tilde{\boldsymbol{\beta}})$

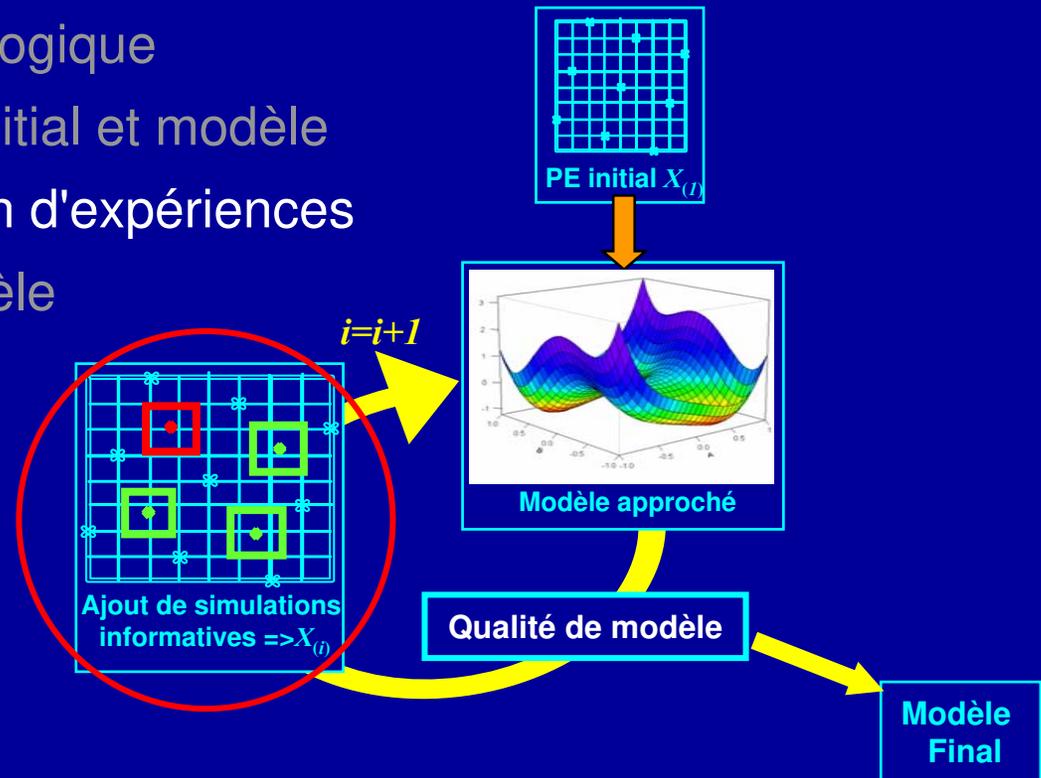
➤  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{MV} = \min_{\boldsymbol{\theta}} \left\{ n \log(\tilde{\sigma}_{MV}^2(\boldsymbol{\theta})) + \log(\det(\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}))) \right\}$

avec  $n$  le nombre de points du plan d'expériences courant  $\mathbf{X}_{(i)}$

- MAIS **suppose la régularité de la réponse**

➔ Remise en question de l'hypothèse gaussienne  
**pour améliorer le modèle**

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**
  - Proposition méthodologique
  - Plan d'expériences initial et modèle
  - Augmentation du plan d'expériences
  - Amélioration du modèle
- Applications
- Conclusions et Perspectives

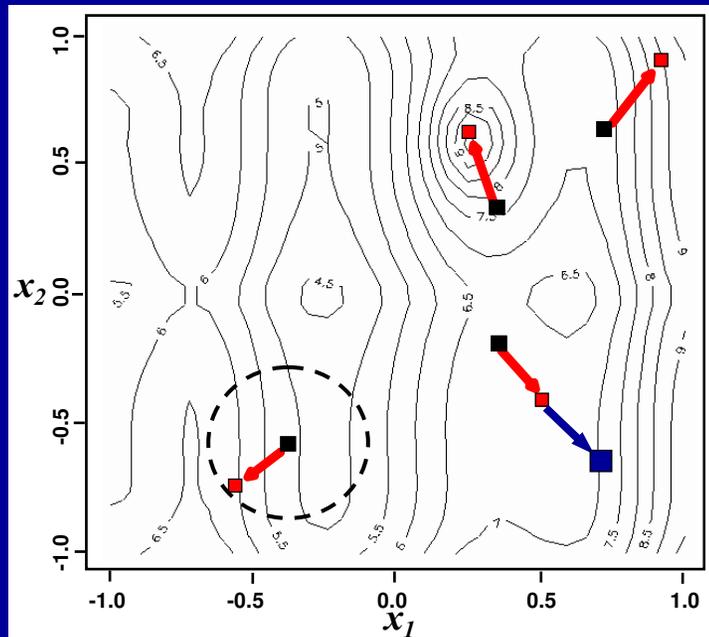


- Deux types de critères envisagés pour l'augmentation du dispositif expérimental
  - Dans l'espace  $IR$  de sortie de  $f$ 
    - Simulations ajoutées en tenant compte des caractéristiques de la réponse
      - recherche des « anomalies » de la réponse
    - « Anomalies » : extrema de  $\tilde{f}$ , ou des changements de signe des dérivées partielles du premier ordre de  $\tilde{f}$
  - Dans l'espace  $D \subset IR^k$  des entrées de  $f$ 
    - Sélection de nouveaux points basée sur des critères spatiaux
    - Test de la sensibilité de  $\tilde{f}$  à l'ajout d'information

- Deux types de critères envisagés pour l'augmentation du dispositif expérimental
  - Dans l'espace  $IR$  de sortie de  $f$ 
    - Simulations ajoutées en tenant compte des caractéristiques de la réponse
      - recherche des « anomalies » de la réponse
    - « Anomalies » : extrema de  $\tilde{f}$ , ou des changements de signe des dérivées partielles du premier ordre de  $\tilde{f}$
  - Dans l'espace  $D \subset IR^k$  des entrées de  $f$ 
    - Sélection de nouveaux points basée sur des critères spatiaux
    - Test de la sensibilité de  $\tilde{f}$  à l'ajout d'information

*Dans l'espace IR de sortie de f*

- Recherche des maxima et minima de  $\tilde{f}_{(i)}$ 
  - recherche **multiple** : plusieurs points initiaux  $\mathbf{x}_{init}^j$  pour l'optimisation
 
$$\mathbf{x}_{max}^{\mathcal{G}_j} = \arg \max_{\mathbf{x} \in \mathcal{G}_j} (\tilde{f}_{(i)}(\mathbf{x})) \quad \text{où } \mathcal{G}_j \text{ est un } \underline{\text{voisinage}} \text{ de } \mathbf{x}_{init}^j$$
  - recherche **iso-simplexe** :
    - dans le cas où la simulation aboutit à un «meilleur extremum»



$$\mathbf{x}_{new}^{\mathcal{G}_j} = \mathbf{x}_{init}^j + (\mathbf{x}_{init}^j - \mathbf{x}_{max}^{\mathcal{G}_j})$$

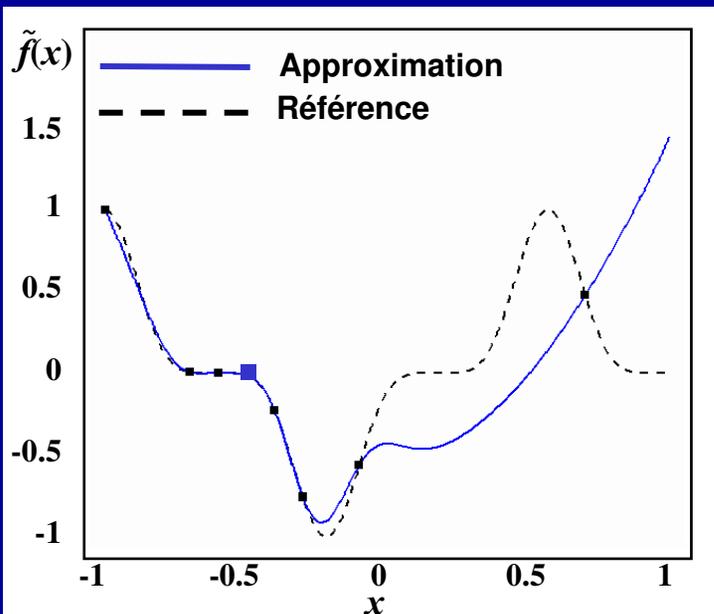
$\mathbf{x}_{new}$  est le symétrique de  $\mathbf{x}_{init}$ ,  
par rapport à  $\mathbf{x}_{max}$

*Dans l'espace IR de sortie de f*

- Recherche des points annulant au moins une dérivée partielle de l'approximation courante  $\tilde{f}_{(i)}$

– dérivée analytique :  $\frac{\partial \tilde{f}_{(i)}}{\partial X_j}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{x})}{\partial X_j} \hat{\boldsymbol{\beta}} + \frac{\partial \mathbf{c}(\mathbf{x})}{\partial X_j} \mathbf{C}^{-1} \left[ \mathbf{f}(\mathbf{X}_{(i)}) - \mathbf{G}(\mathbf{X}_{(i)}) \hat{\boldsymbol{\beta}} \right], j=1, \dots, k$

– minimisation du carré :  $\mathbf{x}_g = \left\{ \mathbf{x}, \exists X_j, i=1, \dots, k \text{ où } \mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x} \in D} \left( \frac{\partial \tilde{f}_{(i)}(\mathbf{x})}{\partial X_j} \right)^2 \right\}$



➤ Recherche des **extrema et points d'inflexion** important pour assurer

- Une **bonne compréhension** du comportement de la réponse
- Une **prédiction globale** de bonne qualité

- Deux types de critères envisagés pour l'augmentation du dispositif expérimental
  - Dans l'espace  $IR$  de sortie de  $f$ 
    - Simulations ajoutées en tenant compte des caractéristiques de la réponse
      - recherche des « anomalies » de la réponse
    - « Anomalies » : extrema de  $\tilde{f}$ , ou des changements de signe des dérivées partielles du premier ordre de  $\tilde{f}$
  - Dans l'espace  $D \subset IR^k$  des entrées de  $f$ 
    - Sélection de nouveaux points basée sur des critères spatiaux
    - Test de la sensibilité de  $\tilde{f}$  à l'ajout d'information

*Dans l'espace  $D$  des entrées de  $f$*

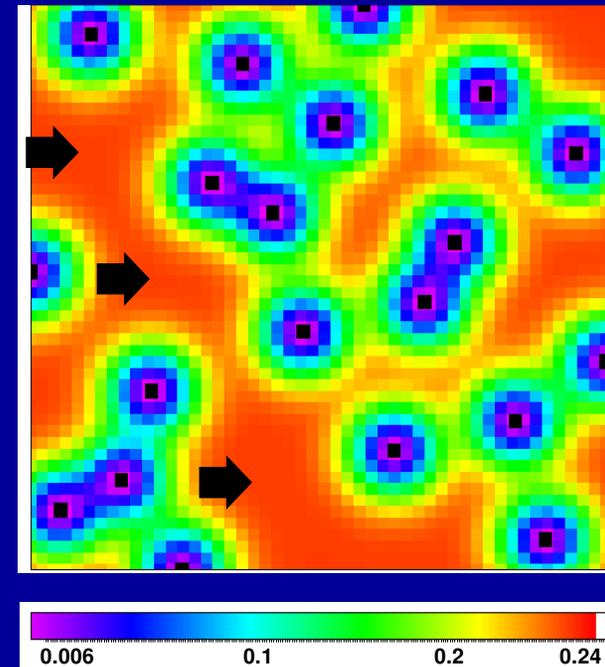
- **Enrichissement dans les zones sous-échantillonnées du dispositif expérimental courant  $X_{(i)}$**

- Basé sur des propriétés des estimateurs par krigeage
- Recherche des points  $x_i^{PP}$  maximisant la **variance de krigeage** :

$$x_i^{PP} = \max_{x \in D} \left\{ \tilde{\sigma}^2 \left( 1 - {}^t r(x) R^{-1} r(x) \right) \right\}$$

- **Approche naturelle** : simuler directement ces points

- Systématique et fiable MAIS :
  - Grand nombre de points vérifiant cette condition
  - Prohibitif pour un espace  $D$  de grande dimension



**→ Recherche des points  $x_i^{PP}$  sensibles à l'ajout d'information**

*Dans l'espace  $D$  des entrées de  $f$*

Évaluation de la sensibilité à l'ajout d'information supplémentaire

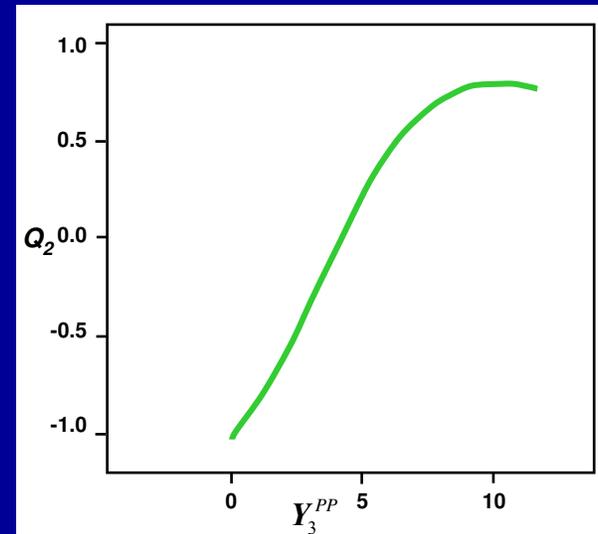
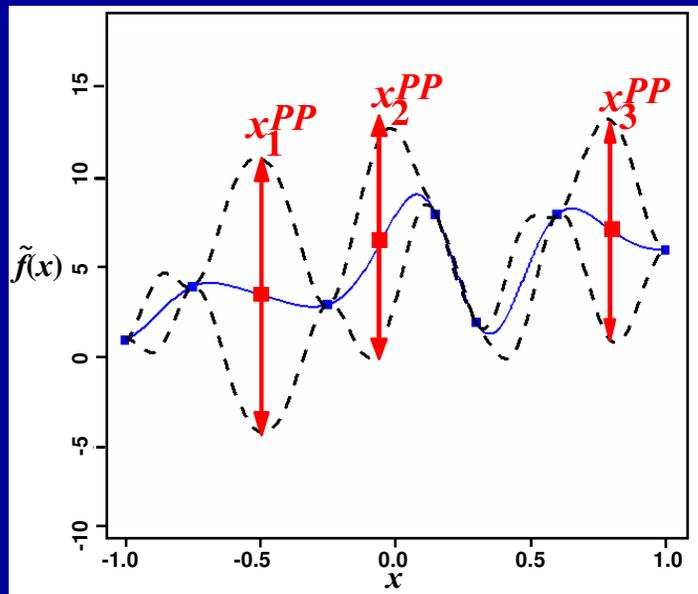
=> technique des points pilotes (de Marsily *et al.*, 1984)

1. Localisation des points  $\mathbf{x}_i^{PP}$  afin de maximiser la variance de krigeage
2. Attribution d'une valeur fictive de  $f$  aux points  $\mathbf{x}_i^{PP}$  (pas de simulation)
  - Variation de la valeur fictive dans son intervalle de prédiction :
 
$$\left[ \tilde{f}(\mathbf{x}_i^{PP}) \pm q_\alpha \sqrt{\text{VarKrig}(\mathbf{x}_i^{PP})} \right] \quad \text{où } q_\alpha \text{ quantiles de la distribution pivotale}$$
  - Test de l'impact de cette variation sur un critère d'intérêt du modèle courant  $f_{(i)}$ , ici la **prédictivité**  $Q_2$ , erreur quadratique de validation croisée
3. **Simulation** du/des points de plus **grande influence** sur la prédictivité du modèle courant  $f_{(i)}$

~

*Dans l'espace D des entrées de f*

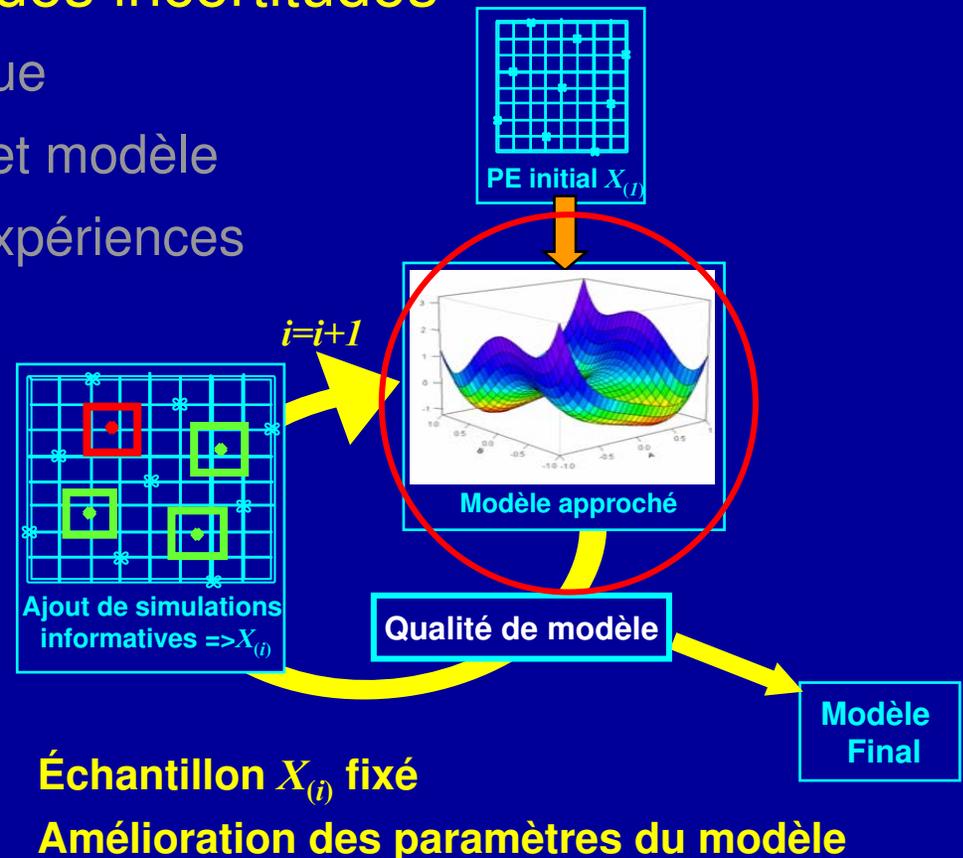
- Exemple : sensibilité sur le critère  $Q_2$ 
  - Optimisation successive de 3 points de variance de krigeage maximale
  - Définition des intervalles de valeurs pour la réponse
  - **Prédictivité** en fonction de la valeur attribuée au point pilote



Sensibilité aux variations  
 $Q_2$  fort

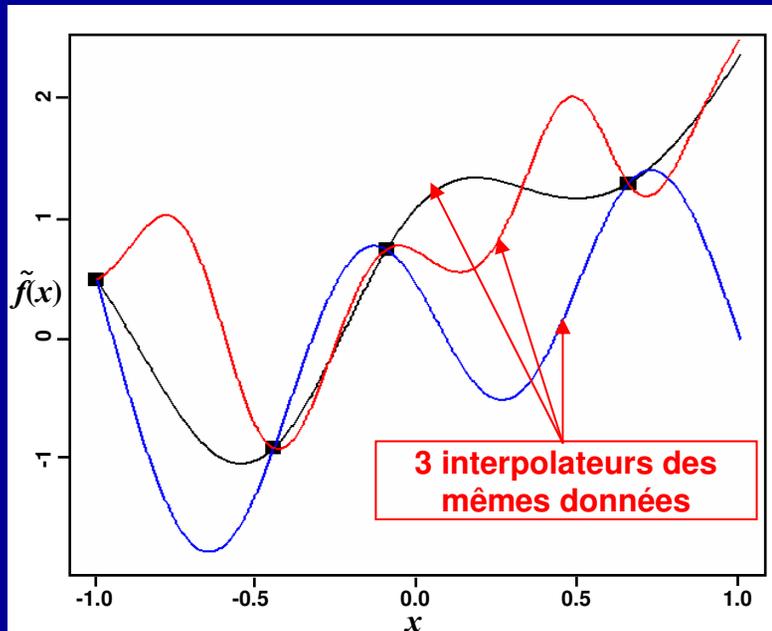
→ Simulation du point  $x_3^{PP}$  car plus grande variation de la prédictivité

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**
  - Proposition méthodologique
  - Plan d'expériences initial et modèle
  - Augmentation du plan d'expériences
  - Amélioration du modèle
    - ✓ Prédicativité
    - ✓ Covariance
- Application
- Conclusions et Perspectives



## Optimisation de la prédictivité (1/3)

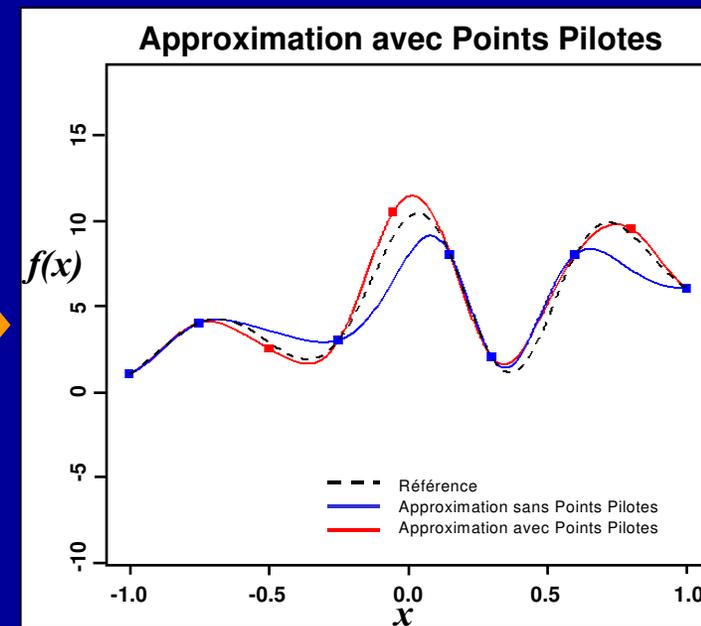
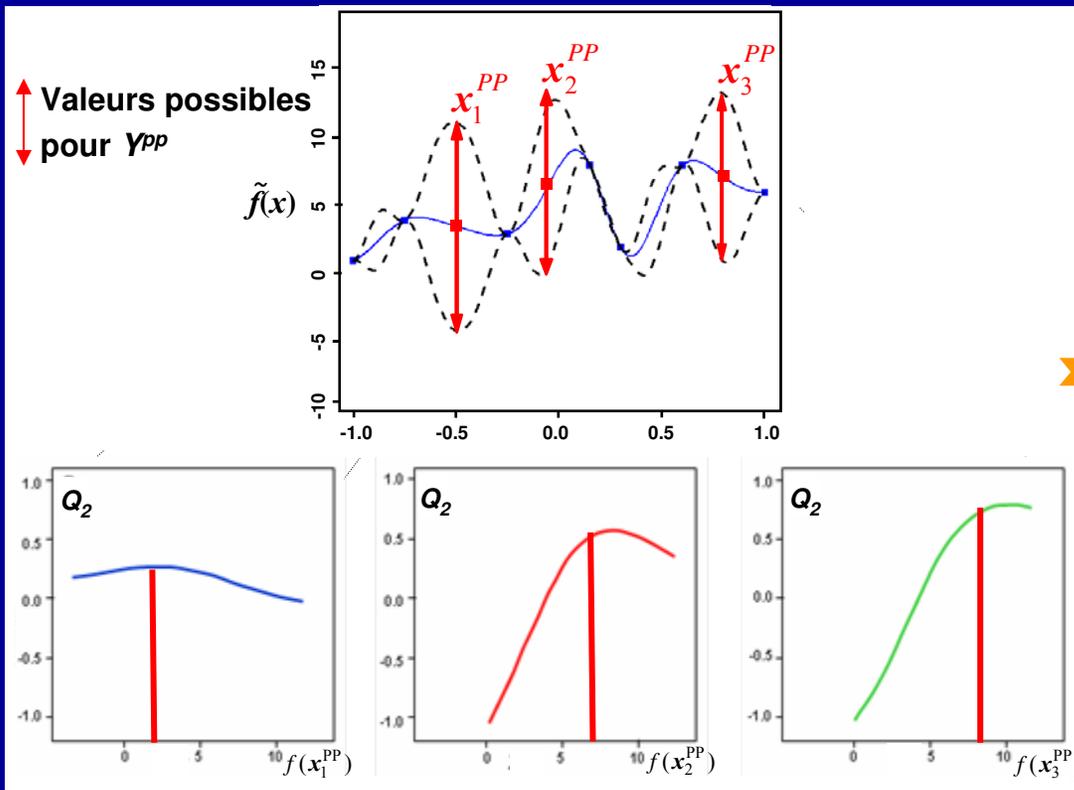
- Choix d'un modèle parmi les interpolateurs possibles



- Nombreuses réalisations équiprobables interpolant les réponses simulées
- Détermination d'une paramétrisation pour décrire l'espace des interpolateurs possibles

➔ Ajout de points pilotes  $x_i^{PP}$  pour obtenir un modèle de prédictivité  $Q_2$  maximale

- Illustration – Recherche d'un interpolateur de meilleure prédictivité



➔ **Meilleure prédictivité sans ajout de simulations supplémentaires**

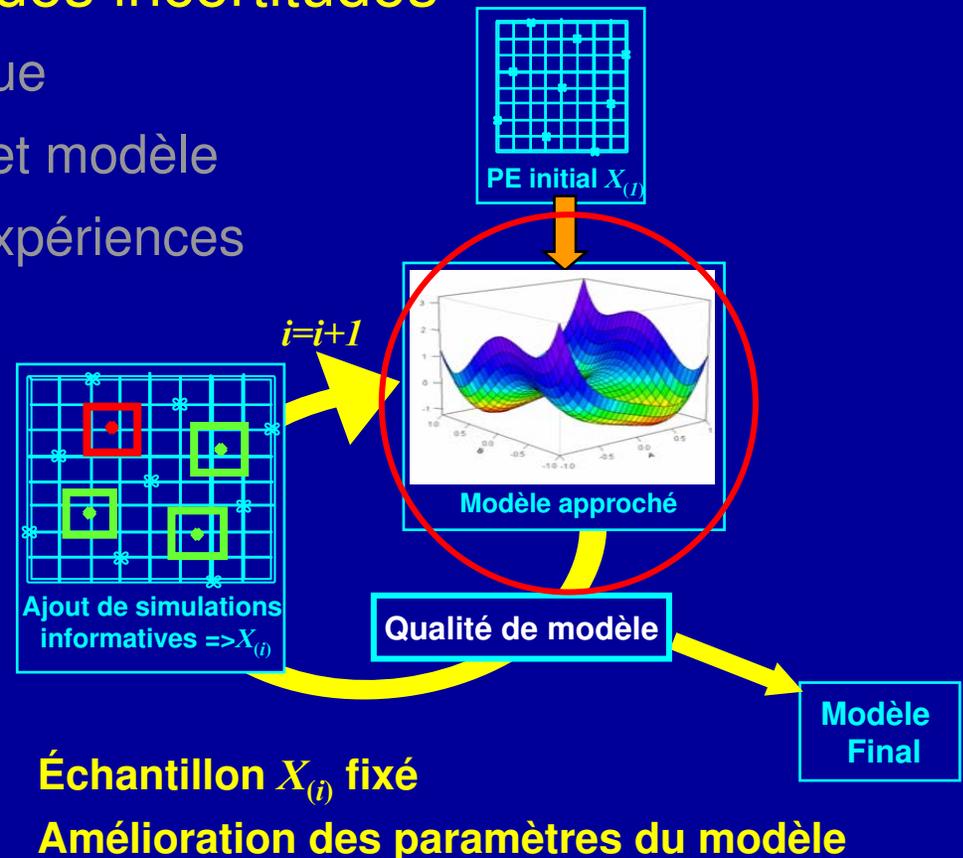
➤ Sélection de la valeur qui **maximise** la prédictivité  $Q_2$  :  $f(x_i^{PP}) = \arg \max(Q_2(\tilde{f}_i^{PP}))$

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- **Modélisation adaptative des incertitudes**

- Proposition méthodologique
- Plan d'expériences initial et modèle
- Augmentation du plan d'expériences
- Amélioration du modèle

- ✓ Prédicativité
- ✓ Covariance

- Application
- Conclusions et Perspectives



## Structure de Covariance

- Variogramme**

- Relation entre Variogramme et Covariance :

$$\gamma(\mathbf{h}) = \sigma^2 - Cov(Z(\mathbf{x}), Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}))$$

- Corrélation des données en fonction de la distance

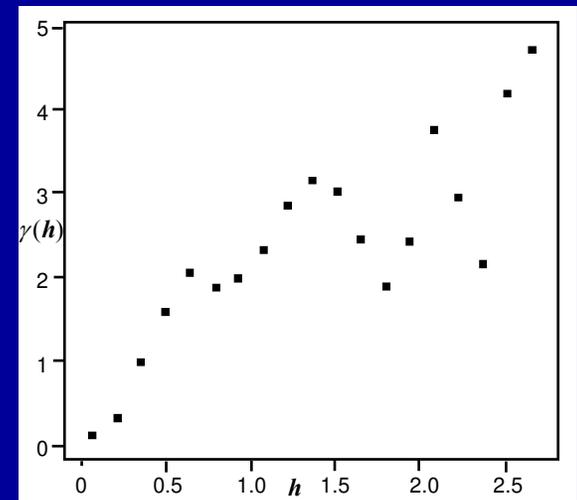
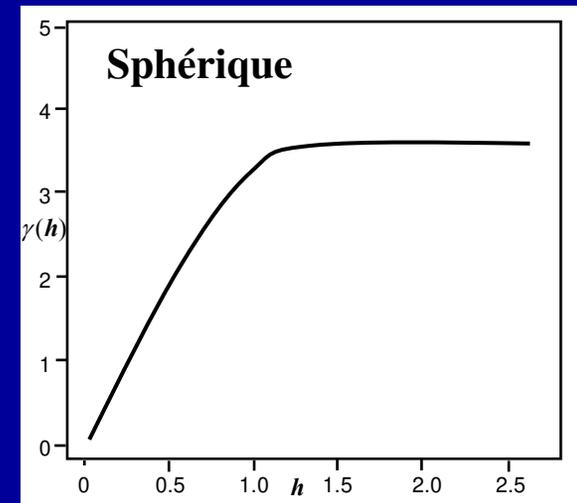
- Variogrammes théoriques classiques :

- Gaussien, exponentiel, sphérique, Matérn, etc.

- Variogramme basé sur les observations :**

- Construction d'un variogramme empirique :

$$\gamma_e(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2$$



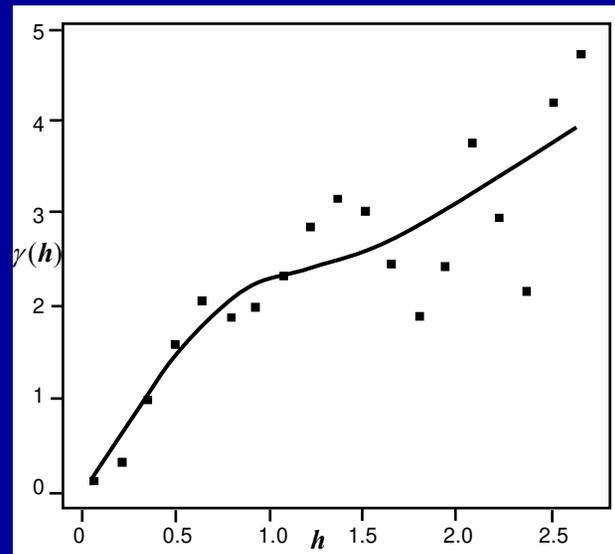
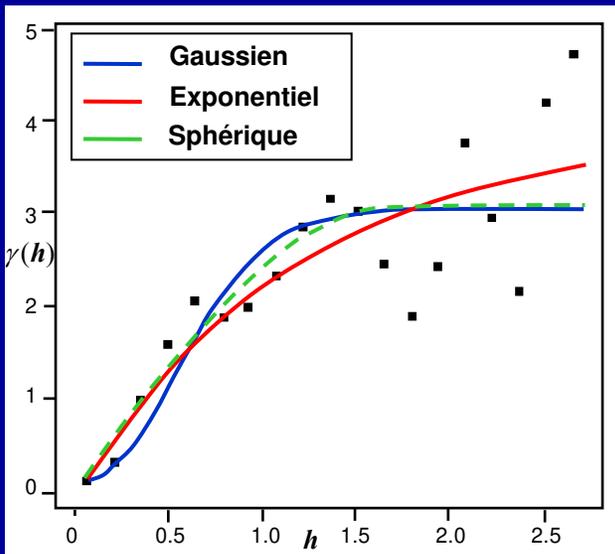
## Optimisation de la structure de covariance

- Optimisation des paramètres pour minimiser l'erreur moindré carrée entre le variogramme empirique et un variogramme théorique :

$$J = \sum_i \left( \gamma_{th}(h^i, \theta) - \gamma_e(h^i) \right)^2$$

- Combinaison linéaire de plusieurs variogrammes théoriques :

$$\gamma(h, \theta, c) = \lambda_1 \gamma_{exp}(h, \theta_1, c_1, p) + \lambda_2 \gamma_{sph}(h, \theta_2, c_2)$$



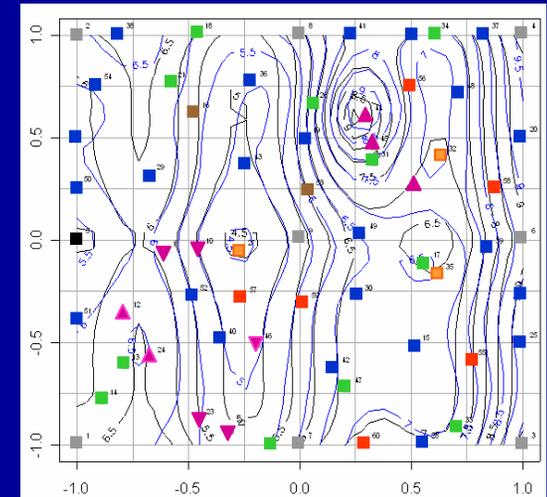
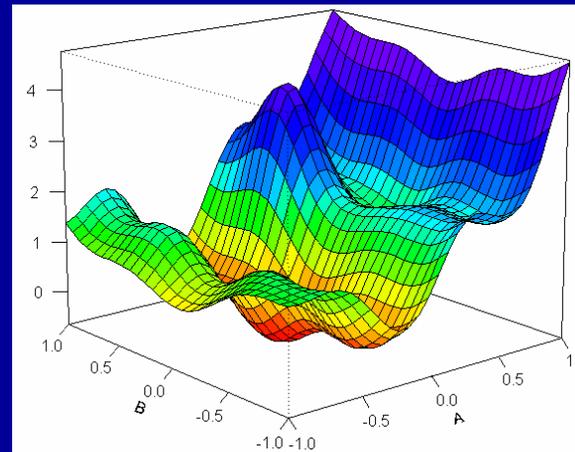
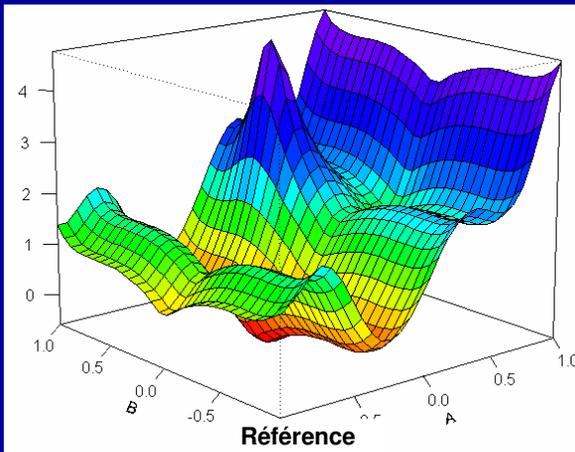
→ Affaiblit l'impact d'une hypothèse *a priori* purement gaussienne

- Ajout de nouvelles simulations en considérant 3 critères :
  - Simulation des points maximum ou minimum de la réponse assure la **détection des irrégularités**
  - Simulation des points de dérivée partielle nulle permet l'identification de **points d'inflexion**
  - Simulation des points de plus grande sensibilité permet de caractériser des **zones non-explorées** du domaine D potentiellement **informatives**
  - **Critère d'arrêt** : Ajout de points de confirmation
    - Choisis dans les zones non-explorées du domaine D
    - Comparaison des valeurs simulées et prédites par le modèle approché en ces points
- **Amélioration du modèle** :
  - Estimation de la covariance par ajustement d'un variogramme empirique
  - Amélioration de la prédictivité par la méthode des **points pilotes** sans ajout de simulations

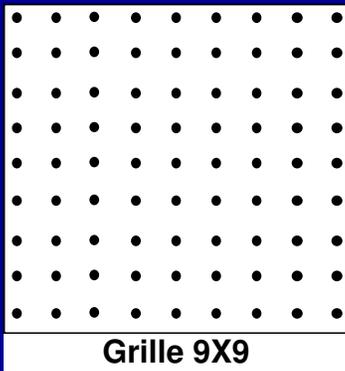
- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- Modélisation adaptative des incertitudes
- **Applications**
  - Fonctions types à plusieurs dimensions
    - $k=2, 3, 4$  et  $5$  paramètres
  - Cas dans l'offshore brésilien : PBR
- Conclusions et Perspectives

D'après C. Scheidt & al, IAMG, Toronto 2005

Fonction type à  $k=2$  paramètres :  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$



Plan adaptatif - 58 simulations  
 $D = [-1, 1]^2$



Même erreur que pour une grille  
9x9 de simulations  
**25% de simulations en moins**

→ Stratégie informative pour  
l'ajout de nouveaux points  
→ Plan spécifique à la réponse  
considérée

✓ Méthode testée sur dizaine de fonctions 2D puis pour 3,4 et 5 paramètres  
→ Convergence toujours obtenue

## Étude de l'intérêt des différents critères d'ajout de points

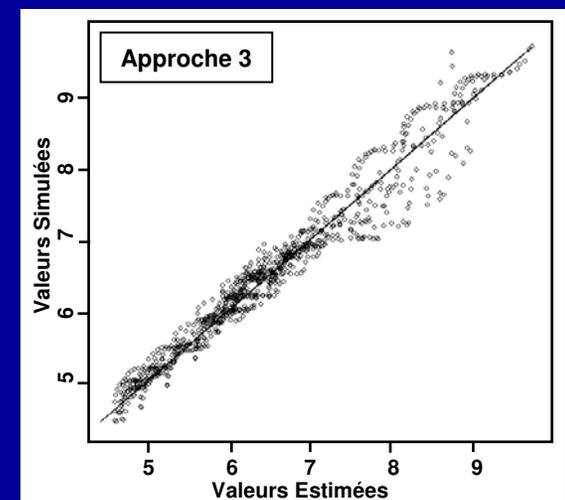
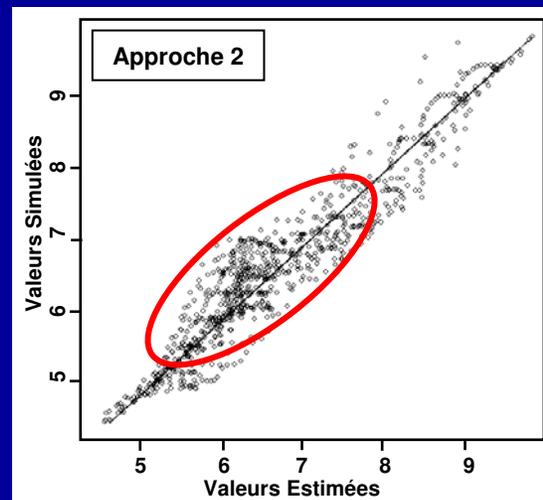
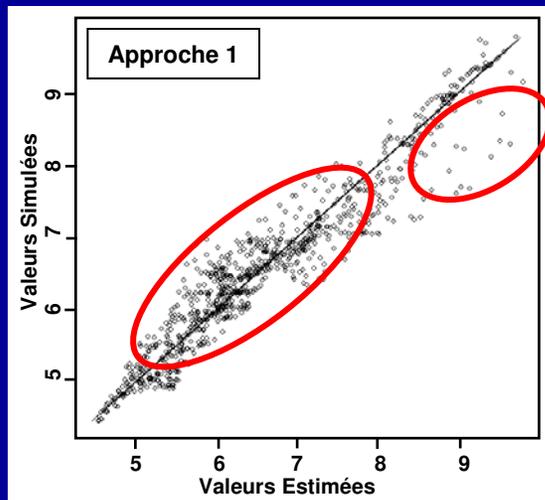
- Intérêt de rechercher les extrema et les points de dérivée partielle nulle

- Tracé des valeurs estimées par le modèle vs valeurs simulées pour 900 points de validation

Approche 1 : Modélisation adaptative sans ajout des extrema

Approche 2 : Modélisation adaptative sans ajout des points de dérivée partielle nulle

Approche 3 : Modélisation adaptative



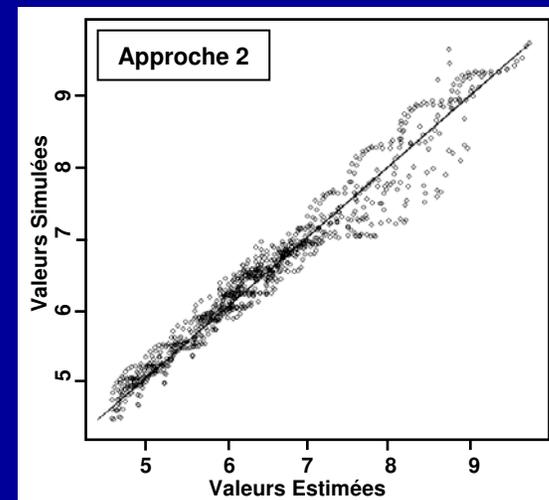
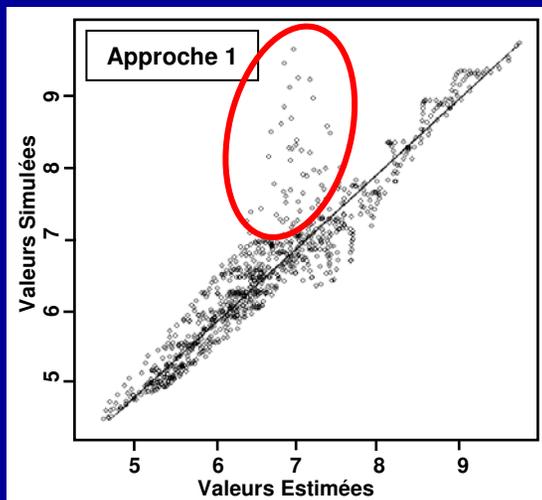
➔ Recherche des « anomalies » essentielle à une bonne détection des irrégularités de la réponse

*Étude de l'intérêt des différents critères d'ajout de points*

- Intérêt de la méthode des points pilotes

Fig. 1 : Simulation directe du point de plus grande variance de krigeage

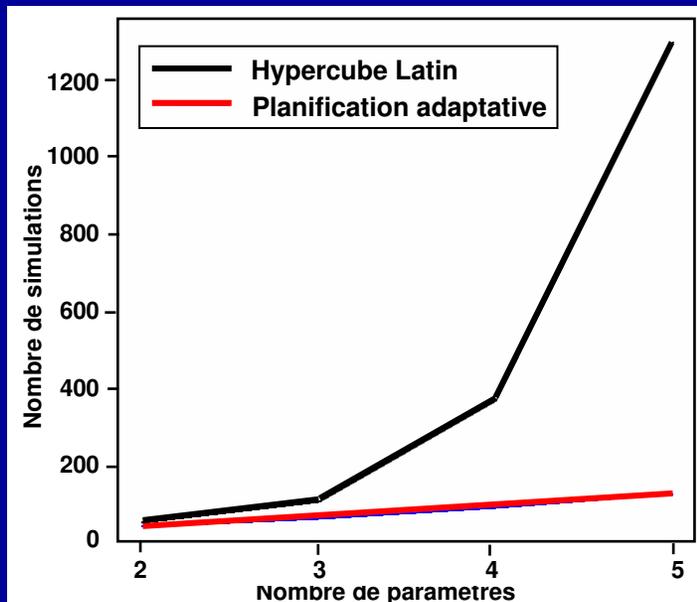
Fig. 2 : Simulation du point de plus grande sensibilité par la technique des points pilotes



- L'introduction de points pilotes joue un rôle majeur pour :
- la détection du/des points à simuler
  - l'augmentation de la prédictivité par l'ajout d'information fictive

## Performances en fonction du nombre $k$ de paramètres

- Comportement de la méthodologie en fonction du nombre de paramètres :
  - Comparaison - à qualité égale - du nombre de simulations requises par des hypercubes latins et par le plan adaptatif
    - Croissance exponentielle pour des hypercubes latins
    - Croissance linéaire pour la planification adaptative

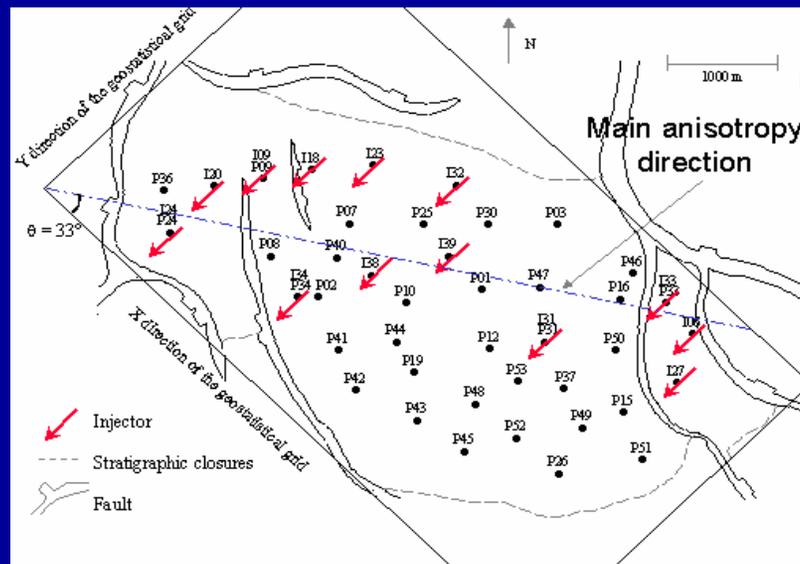


➔ **Intérêt** d'autant plus important de la méthode pour un **grand nombre de paramètres** incertains

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- Modélisation adaptative des incertitudes
- **Application**
  - Fonctions type à plusieurs dimensions
  - Cas dans l'offshore brésilien : PBR
- Conclusions et Perspectives

## Cas dans l'offshore brésilien : PBR

- **Présentation du cas PBR**
  - Situé dans l'offshore brésilien
  - Début de production en 1979
  - 34 puits producteurs et 13 puits injecteurs d'eau



- **Remerciements à Petrobras pour l'accès aux données du champs PBR et l'autorisation de publication**

## *Cas dans l'offshore brésilien : PBR*

- **Analyse d'incertitude**
  - Définition d'une **réponse** d'intérêt
    - La production d'huile cumulée à 6 ans de production : CumOil
  - Sélection des **paramètres** influents sur cette réponse
    - la profondeur du contact huile/eau : ZOW1
    - le coefficient d'endommagement du puits : SKIN
    - la perméabilité relative maximale au gaz : KRGM
    - la perméabilité relative maximale à l'eau : KRWM
- **Construction d'un modèle approché de la réponse CumOil en fonction des paramètres ZOW1, SKIN, KRGM et KRWM**
- **Référence : Construction d'une grille  $6^4 = 1296$  simulations pour l'analyse des résultats**

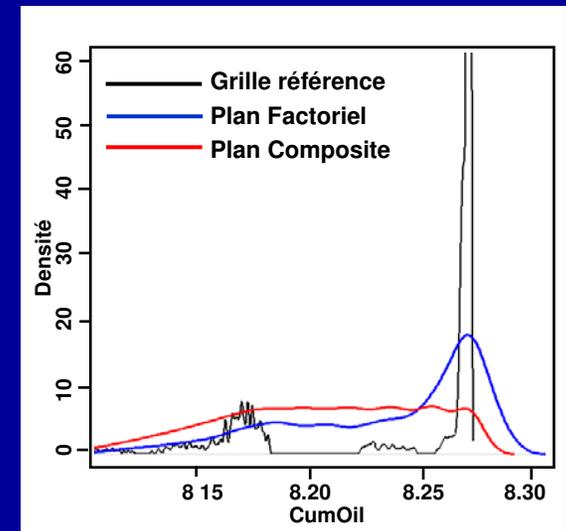
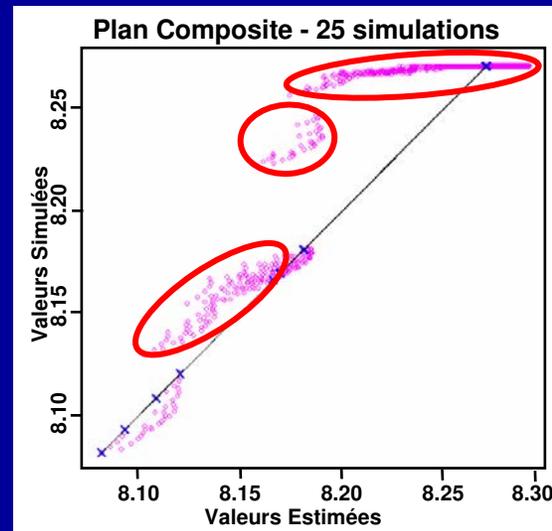
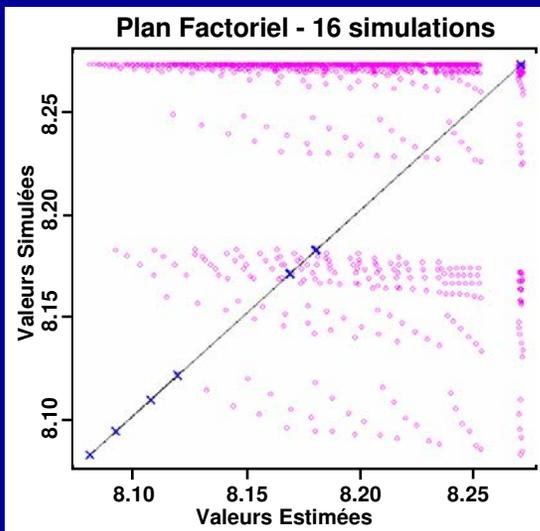
## Cas dans l'offshore brésilien : PBR

- Modélisation par plans d'expériences classiques & modèle composite

Fig. 1 : Plan factoriel

Fig. 2 : Plan composite centré

Fig. 3 : Densité de probabilité : tirage uniforme de 10 000 points dans  $D=[-1,1]^k$



- Modèles de mauvaise qualité
- Estimation de la densité de probabilité peu précise

➔ Inexploitable en terme de prédiction

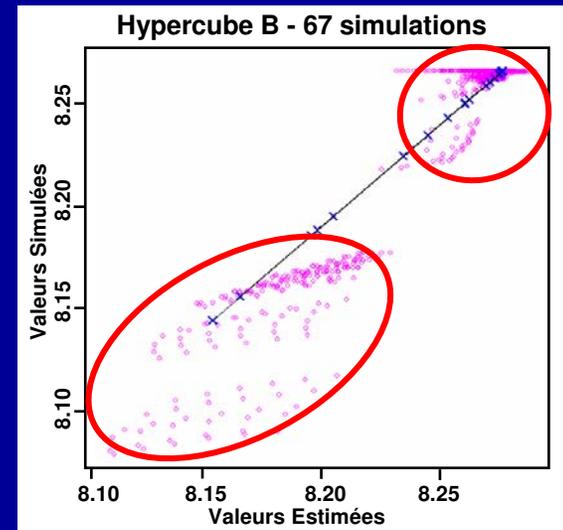
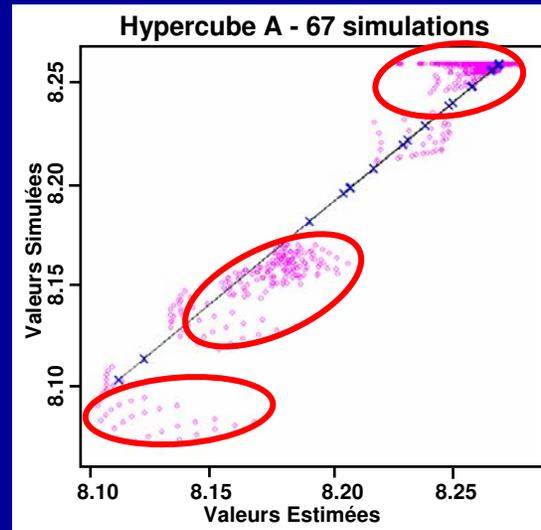
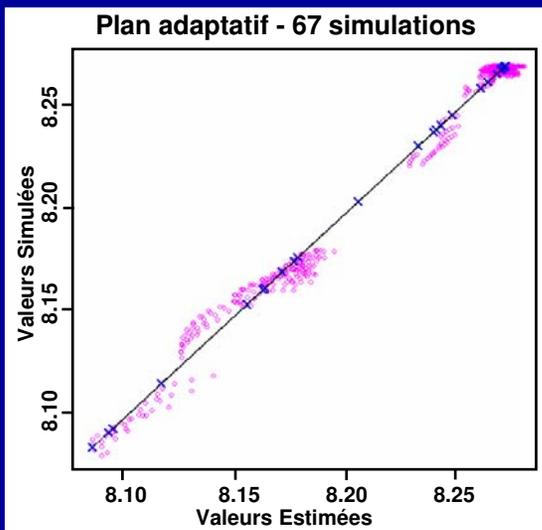
## Cas dans l'offshore brésilien : PBR

- Modélisation adaptative et hypercubes latins

Fig. 1 : Plan adaptatif – 67 simulations nécessaires pour une bonne qualité

Fig. 2 : Hypercube latin à 67 simulations - A

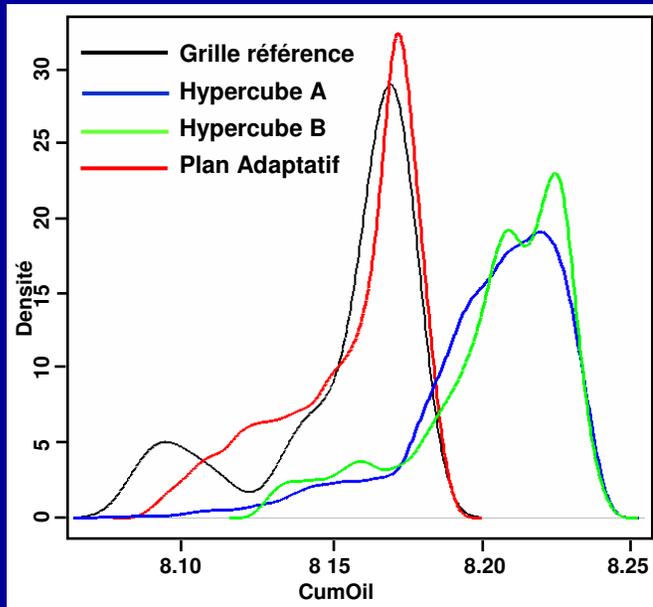
Fig. 3 : Hypercube latin à 67 simulations - B



➤ Modèles issus des hypercubes induisent une **surestimation** de la production, correspondant aux fortes valeurs du SKIN

## Cas dans l'offshore brésilien : PBR

- Échantillonnage Monte-Carlo
  - SKIN fixé à sa valeur maximale
  - tirage uniforme pour les autres paramètres



- Approche adaptative : estimation de la densité de probabilité très précise
- Hypercubes Latins : mauvaise estimation - surestimation de 50 000 m<sup>3</sup>
  - surestimation de plus de \$22 000 000 (pour un baril à \$70) !

➔ L'approche adaptative permet une meilleure quantification des incertitudes

- Introduction à l'ingénierie de réservoir
- Modélisation adaptative des incertitudes
  - Méthode générale
  - Plan d'expériences initial et choix du modèle
  - Augmentation du dispositif expérimental
  - Amélioration du modèle
- Application
  - Fonctions type à plusieurs dimensions
  - Cas dans l'offshore brésilien : PBR
- **Conclusions et Perspectives**

- Mise en place d'une méthodologie pour la modélisation de réponses non-régulières
  - Recherche de nouveaux points basée sur les caractéristiques de la réponse ET du plan courant
  - Emploi de réponses fictives – points pilotes
    - pour tester la sensibilité de l'approximation à l'ajout d'information
    - pour augmenter la prédictivité de l'approximation
  - Structure de covariance modélisée par une combinaison linéaire de covariances théoriques

- Permet une quantification des incertitudes fiable et robuste
  - Pour un nombre limité de simulations : critères d'ajout de points définis pour maximiser l'information apportée par les simulations
  - Sans hypothèse paramétrique *a priori*
- Validation de la méthodologie sur deux cas pétroliers et plusieurs fonctions type
  - Intérêt accru pour de plus grandes dimensions

- Réduction du nombre de simulations requis
  - Extension de la méthodologie à la modélisation de réponses partiellement non-régulières
- Remise en cause de l'hypothèse de stationnarité
  - Étudier le krigeage ordinaire avec voisinages glissants, krigeages emboîtés avec paramètres de corrélation variables, réseaux de neurones, SVM, etc.
- Analyse de réponses multiples :  $f : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^p, p > 1$ 
  - Exemple Ingénierie : Maximiser la production d'hydrocarbures tout en minimisant la production d'eau
- Prise en compte de données secondaires
  - gradients, données corrélées
- Formalisation de l'approche heuristique de la méthode des points pilotes

- Un brevet

- Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Collombier D., *"Méthode de modélisation de la production d'un gisement pétrolier"*, registration n° 04/09.177, Sept. 2004.

- Un article à comité de lecture

- Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Feraille M., Collombier D., *"Toward a reliable quantification of uncertainty on production forecasts - Adaptive experimental designs"*, Oil and Gas Science Technology - La Revue de l'IFP, à paraître

- Cinq communications à congrès

- Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Feraille M., Guard B., Collombier D., *"Adaptive Experimental Design for non-linear Modeling – Application to quantification of risk for real field production"*, ECMOR X, Amsterdam, 4 - 7 Sept., 2006.
- Zabalza-Mezghani I., Scheidt C., Feraille M., Collombier D., *"An innovative exploitation of geostatistical techniques for uncertainty assessment in reservoir engineering"*, RCSS, Dubai, 10-13 Dec. 2005
- Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Feraille M., Collombier D., *"Adaptive Evolutive Experimental Designs for Uncertainty Assessment - An innovative exploitation of geostatistical techniques"*, IAMG, Toronto, Canada, 21-26 août 2005.

- Zabalza-Mezghani I., Scheidt C., Manceau E., *"Quantification of Uncertainty for Improved Recovery Prediction"*, WPC 1<sup>st</sup> youth forum, Pekin, 17-23 Oct., 2004.
- Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., *"Assessing Uncertainty and Optimizing Production schemes - Experimental Designs for non-linear production response modeling - An application to early water breakthrough prevention"*, ECMOR IX, Cannes, 30 August - 2 Sept., 2004.
- Deux posters
  - Zabalza-Mezghani I., Scheidt C., Feraille M., Manceau E., *"Quantification of Uncertainty for Improved Recovery Prediction"*, WPC 1<sup>st</sup> youth forum, Pekin, 17-23 Oct., 2004.
  - Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Feraille M., Collombier D., *"Uncertainty Management for Oil Reservoir Production – Advanced Evolutive Experimental Designs"*, gOcad, Nancy, 5-7 Juin, 2006
- Une communication à colloque
  - Scheidt C., Zabalza-Mezghani I., Feraille M., Collombier D., *"Toward a reliable quantification of uncertainty on production forecasts - Adaptive experimental designs"*, Quantitative Methods for Reservoir Characterization, Rueil-Malmaison, 3-5 avril , 2006