

Expériences numériques en contexte industriel

Avancées récentes et problèmes ouverts

Sébastien Da Veiga

Snecma

Journées MAS 2014 28/08/2014

PLAN

→ Contexte et problématique

→ Avancées récentes

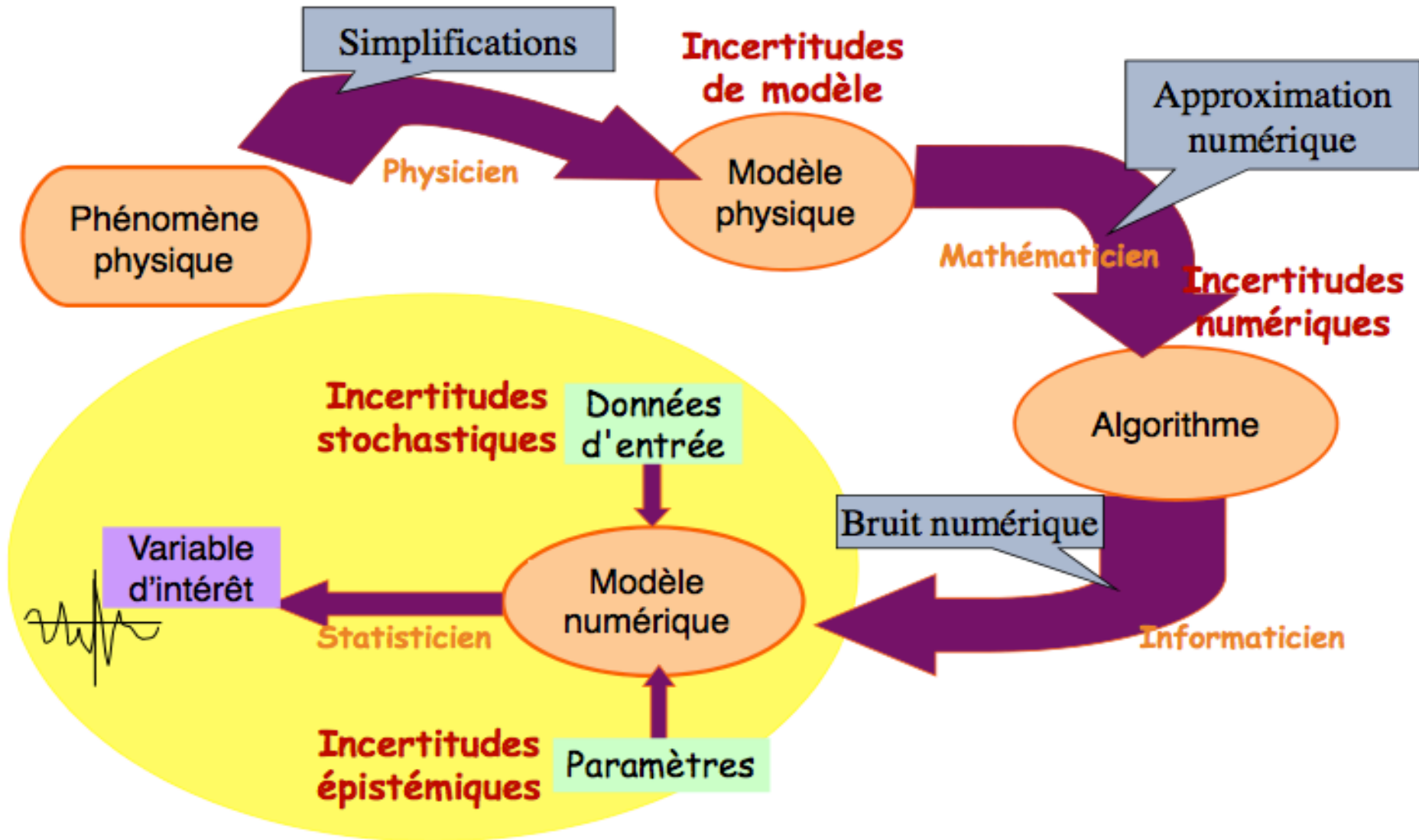
- Emulateurs
- Nouveaux indices
- Screening et sélection de variables
- Entrées / sorties fonctionnelles

→ Conclusions et perspectives

/01/

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

CONTEXTE



CONTEXTE

→ Enjeux

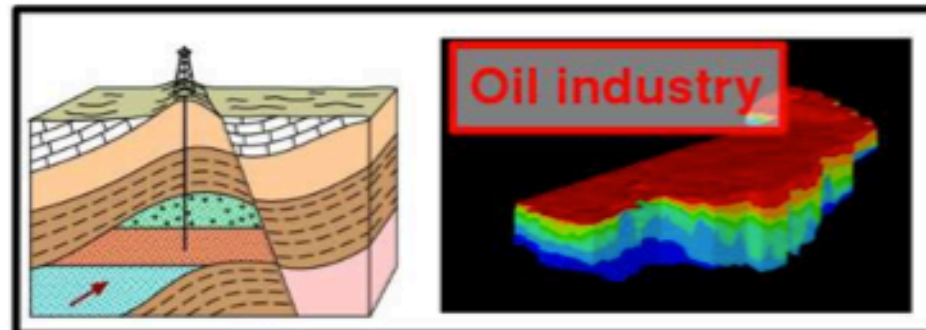
- Comprendre l'influence des incertitudes
 - *Orienter les choix de modélisation*
 - *Prioriser les efforts de R&D*
 - *Conduire des actions supplémentaires*

- Donner du crédit à un modèle
 - *Atteindre un niveau de qualité acceptable pour son utilisation*
 - *Calibrer les paramètres du modèle*
 - *Réduire l'incertitude des sorties du modèle pour améliorer la prédiction*

- Démontrer la conformité du système avec un critère explicite ou un seuil réglementaire

- ...

UNE PROBLÉMATIQUE MULTI-SECTORIELLE



CONTEXTE

→ La démarche “standard” de traitement des incertitudes

- Comment modéliser les incertitudes sur les paramètres d’entrée ?
 - *Expériences labo, avis d’experts, calibration, ...*
- Comment estimer la dispersion de la sortie d’un modèle en fonction de la dispersion des paramètres d’entrée ?
 - *MC, QMC, IS*
- Comment estimer la sensibilité de la sortie d’un code vis-à-vis d’un paramètre ou d’un groupe de paramètres d’entrée ?

CONTEXTE

→ La démarche “standard” de traitement des incertitudes

- Comment modéliser les incertitudes sur les paramètres d’entrée ?
 - *Expériences labo, avis d’experts, calibration, ...*
- Comment estimer la dispersion de la sortie d’un modèle en fonction de la dispersion des paramètres d’entrée ?
 - *MC, QMC, IS*
- Comment estimer la sensibilité de la sortie d’un code vis-à-vis d’un paramètre ou d’un groupe de paramètres d’entrée ?

CONTEXTE

→ Analyse de sensibilité

- Objectif : identifier et hiérarchiser, parmi les paramètres d'entrée, ceux qui influencent le plus la sortie
- Pourquoi ?
 - Réduire les incertitudes sur la réponse plus efficacement en tentant de réduire l'incertitude des plus gros contributeurs
 - Améliorer la compréhension des phénomènes, guider la R&D
 - Obtenir une meilleure connaissance dans les résultats
 - Améliorer la modélisation (simplifier le modèle par exemple)

▪ Notations

Modèle numérique

$$\text{Sortie } Y = \eta(X_1, \dots, X_d)$$

Paramètres d'entrée

CONTEXTE

→ Deux écoles

- Sensibilité locale : analyse le comportement de la réponse localement autour d'un point choisi (par exemple le point nominal)

$$S_i = \frac{\sigma_{X_i}^2}{\text{Var}(Y)} \left(\left. \frac{\partial \eta(X)}{\partial X_i} \right|_{X=X_0} \right)^2$$

- *Très simple à mettre en oeuvre (différence finies, différenciation automatique, . . .)*
 - *MAIS approche locale, passage au global seulement sous hypothèses de linéarité du modèle*
- Sensibilité globale : faire varier l'ensemble des paramètres d'entrées du modèle dans son domaine incertain et analyser les variations des sorties

Note : liens entre les 2 approches récemment étudiés par Lamboni et al. 2013 (inégalités)

CONTEXTE

→ Analyse de sensibilité globale : 2 grandes familles

- Méthodes de criblage (screening)
 - Plans d'expériences classiques
 - Criblage
 - Méthode de Morris

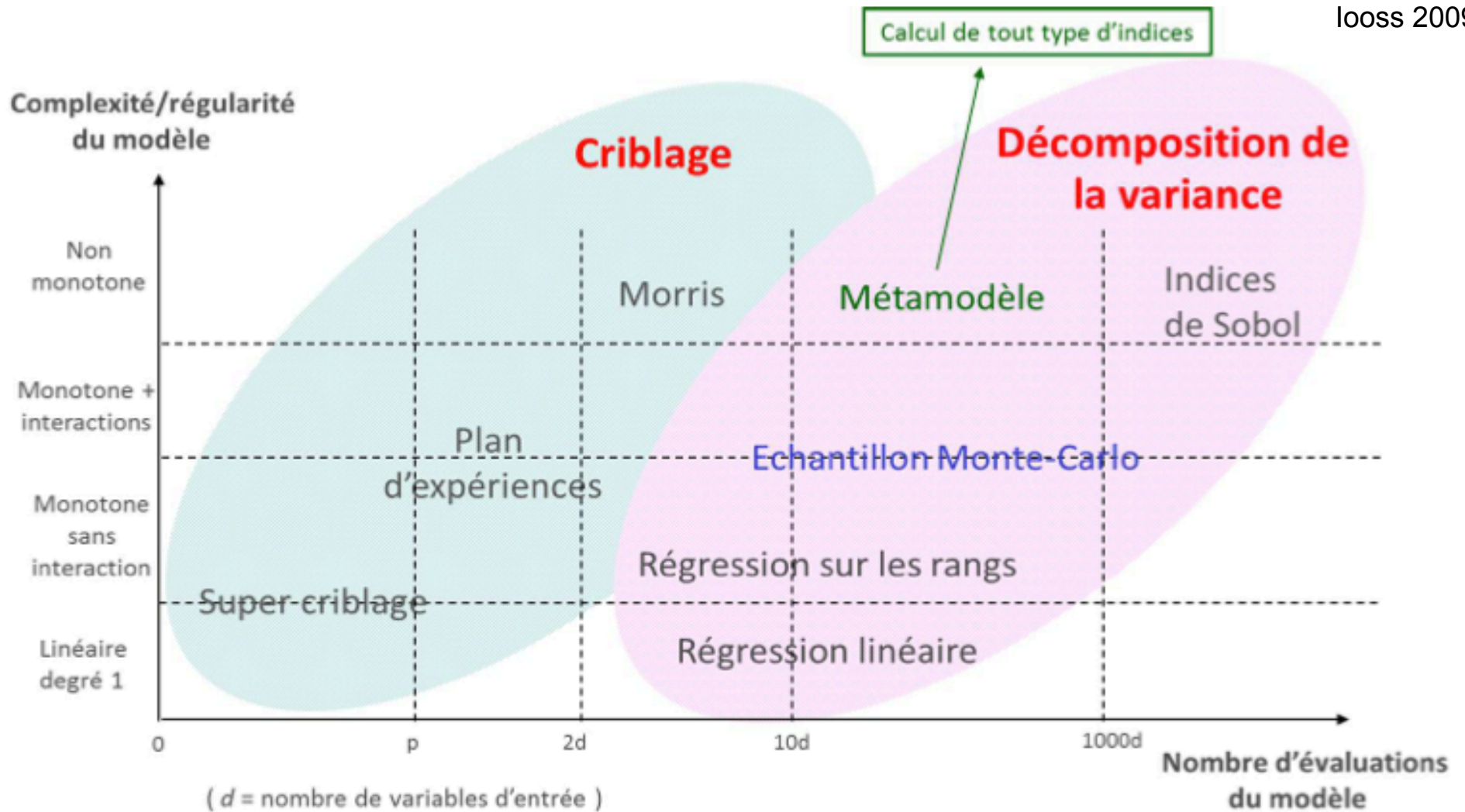
$$n \approx d/2 - 10d$$

- Méthodes quantitatives basées sur la décomposition de la variance
 - Techniques de régression linéaire (ou monotone sur rangs)
 - Indices de Sobol

$$n \approx 2d - 10^4 d$$

CONTEXTE

Iooss 2009



CONTEXTE

→ Décomposition de la variance

- Décomposition de Sobol-Hoeffding (paramètres indépendants)

$$\eta(X) = \eta_0 + \sum_{i=1}^d \eta_i(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq d} \eta_{i,j}(X_i, X_j) + \dots + \eta_{1,\dots,d}(X_1, \dots, X_d)$$

- Fonctions centrées et orthogonales
- Expression en fonction des espérances conditionnelles :

$$\eta_0 = \mathbb{E}(Y)$$

$$\eta_i(X_i) = \mathbb{E}(Y|X_i) - \mathbb{E}(Y)$$

$$\eta_{i,j}(X_i, X_j) = \mathbb{E}(Y|X_i, X_j) - \mathbb{E}(Y|X_i) - \mathbb{E}(Y|X_j) + \mathbb{E}(Y)$$

...

CONTEXTE

→ Décomposition de la variance

- Par orthogonalité

$$\text{Var}(\eta(X)) = \sum_{i=1}^d \text{Var}(\eta_i(X_i)) + \sum_{1 \leq i < j \leq d} \text{Var}(\eta_{i,j}(X_i, X_j)) + \dots + \text{Var}(\eta_{1,\dots,d}(X_1, \dots, X_d))$$

- Variance totale décomposée selon effets principaux, interactions, etc de chaque paramètre
- => Indice de sensibilité pour un groupe de paramètres

$$S_I(X_I) = \frac{\text{Var}(\eta_I(X_I))}{\text{Var}(\eta(X))}$$

$$S_i(X_i) = \frac{\text{Var}(\mathbb{E}(Y|X_i))}{\text{Var}(Y)} \quad \text{Effets 1er ordre}$$

$$S_i^T(X_i) = \sum_{I \supseteq i} S_I \quad \text{Effets totaux}$$

CONTEXTE

→ Estimation des indices de sensibilité

- Monte-Carlo
 - Saltelli 2002, ...
- Plans spéciaux
 - FAST (Cukier 1973), RBD-FAST (Mara 2009)
- Permutations (coût indépendant de la dimension)
 - Effets principaux (Mara & Joseph 2008), interactions ordre 2 (Tissot & Prieur 2014)
- Propriétés convergence, efficacité asymptotique
 - Janon et al. 2012, D. & Gamboa 2013

CONTEXTE

→ Résumé de la démarche pratique :

1. Screening pour limiter le nombre de paramètres
2. Analyse quantitative pour hiérarchiser finement ceux qui restent

→ Mais pour des problèmes industriels sérieux

- Coût calculatoire important du modèle numérique
 - Même les estimateurs state-of-the-art sont impossibles à utiliser
- La dimension du vecteur des entrées peut être très grande
 - Techniques de screening pas forcément robustes
- La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt
 - Autres indices de sensibilité ? (e.g. pour probabilité dépassement seuil réglementaire)
- Les entrées et les sorties ne sont pas forcément des scalaires
 - Courbes d'évolution, maillages 3D, ...

CONTEXTE

→ Résumé de la démarche pratique :

1. Screening pour limiter le nombre de paramètres
2. Analyse quantitative pour hiérarchiser finement ceux qui restent

→ Mais pour des problèmes industriels sérieux

Emulateurs

- Coût calculatoire important du modèle numérique
 - Même les estimateurs state-of-the-art sont impossibles à utiliser
- La dimension du vecteur des entrées peut être très grande
 - Techniques de screening pas forcément robustes
- La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt
 - Autres indices de sensibilité ? (e.g. pour probabilité dépassement seuil réglementaire)
- Les entrées et les sorties ne sont pas forcément des scalaires
 - Courbes d'évolution, maillages 3D, ...

CONTEXTE

→ Résumé de la démarche pratique :

1. Screening pour limiter le nombre de paramètres
2. Analyse quantitative pour hiérarchiser finement ceux qui restent

→ Mais pour des problèmes industriels sérieux

- Coût calculatoire important du modèle numérique
 - Même les estimateurs state-of-the-art sont impossibles à utiliser
- La dimension du vecteur des entrées peut être très grande
 - Techniques de screening pas forcément robustes
- La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt
 - Autres indices de sensibilité ? (e.g. pour probabilité dépassement seuil réglementaire)
- Les entrées et les sorties ne sont pas forcément des scalaires
 - Courbes d'évolution, maillages 3D, ...

Emulateurs

Feature selection

CONTEXTE

→ Résumé de la démarche pratique :

1. Screening pour limiter le nombre de paramètres
2. Analyse quantitative pour hiérarchiser finement ceux qui restent

→ Mais pour des problèmes industriels sérieux

- Coût calculatoire important du modèle numérique
 - Même les estimateurs state-of-the-art sont impossibles à utiliser
- La dimension du vecteur des entrées peut être très grande
 - Techniques de screening pas forcément robustes
- La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt
 - Autres indices de sensibilité ? (e.g. pour probabilité dépassement seuil réglementaire)
- Les entrées et les sorties ne sont pas forcément des scalaires
 - Courbes d'évolution, maillages 3D, ...

Emulateurs

Feature selection

Nvx indices

CONTEXTE

→ Résumé de la démarche pratique :

1. Screening pour limiter le nombre de paramètres
2. Analyse quantitative pour hiérarchiser finement ceux qui restent

→ Mais pour des problèmes industriels sérieux

- Coût calculatoire important du modèle numérique
 - Même les estimateurs state-of-the-art sont impossibles à utiliser

Emulateurs
- La dimension du vecteur des entrées peut être très grande
 - Techniques de screening pas forcément robustes

Feature selection
- La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt
 - Autres indices de sensibilité ? (e.g. pour probabilité dépassement seuil réglementaire)

Nvx indices
- Les entrées et les sorties ne sont pas forcément des scalaires
 - Courbes d'évolution, maillages 3D, ...

Distances, décompositions

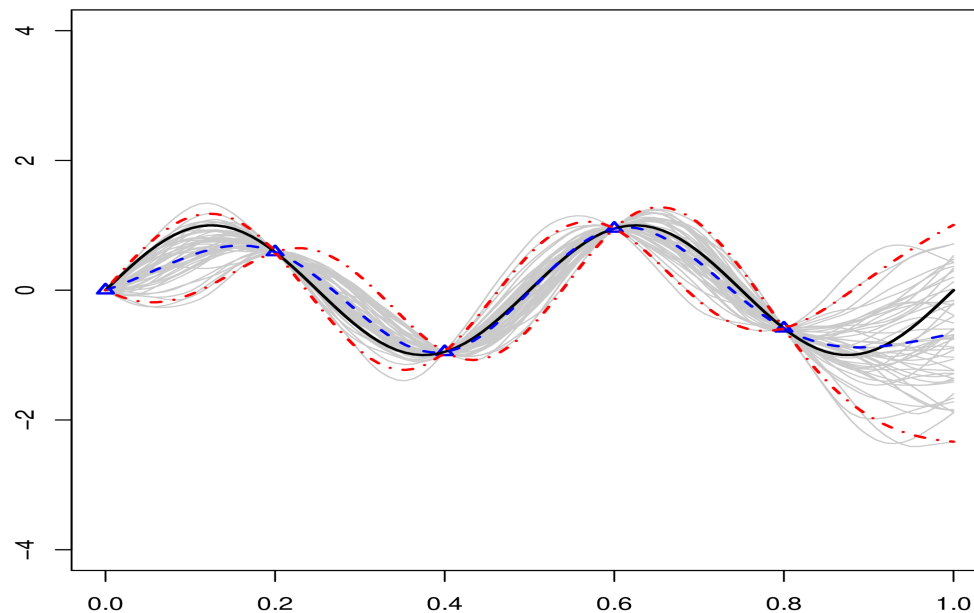
/02/

AVANCÉES RÉCENTES

EMULATEURS

→ Principe : remplacer le code de calcul coûteux par un modèle approché

- A partir de plusieurs évaluations du modèle numérique pour différentes valeurs des paramètres d'entrée
- Choix parmi les outils classiques de régression non-linéaire
 - Polynômes, Splines, Modèles additifs, GAM, Réseaux de neurones, Régression par processus Gaussiens, Forêts aléatoires, ...



EMULATEURS

- **Beaucoup d'exemples d'applications en contexte industriel, avec succès**
- **En pratique, le plan d'expériences est adaptatif**
- **L'interpolation est une propriété appréciée par les physiciens, ainsi que les estimations de l'erreur de prédiction**
 - D'où le succès de la régression par processus Gaussiens (« krigage »)
- **Utilisation intensive également pour l'optimisation**
 - Calibration de modèles numériques, optimisation points de fonctionnement, ...

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

→ Contraintes physiques dans le modèle approché

- Le phénomène physique a par essence certaines propriétés
 - Symétries
 - Contraintes de bornes (concentrations, ...)
 - Monotonie par rapport à certains paramètres
 - Solution d'EDP (Laplacien nul, divergence nulle, ...)

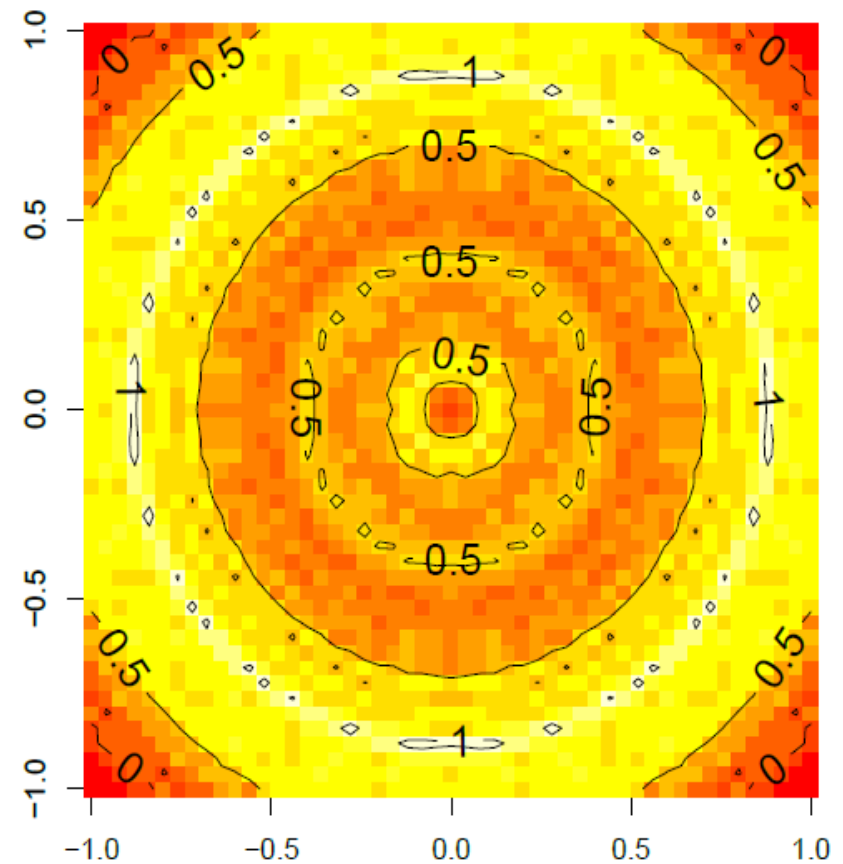
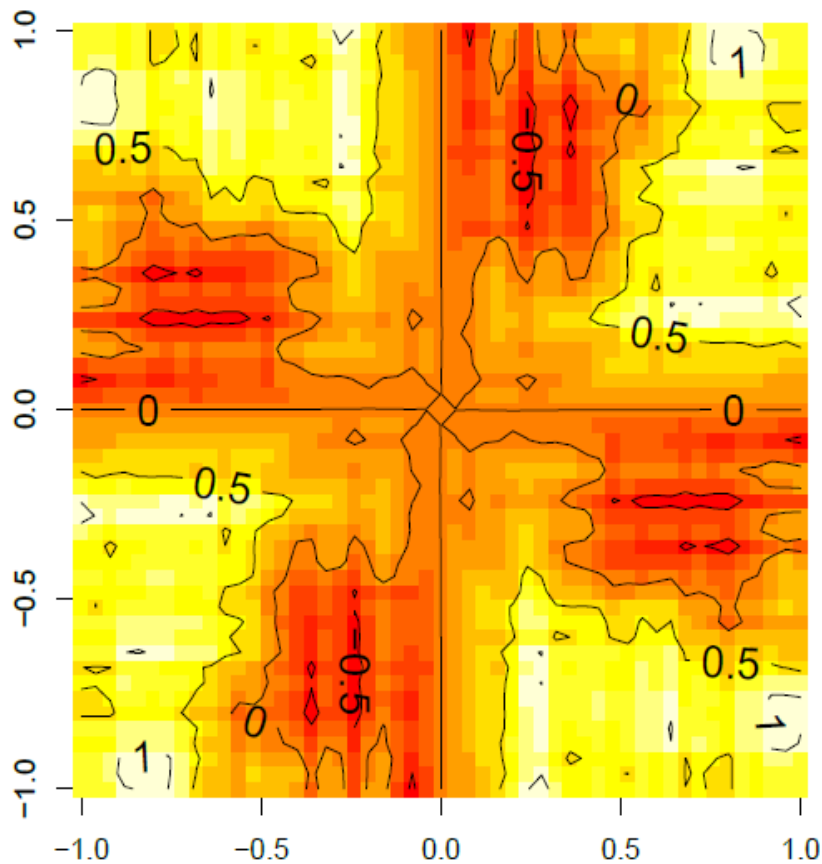
→ Incorporer ses informations dans le modèle a un grand intérêt

- La physique et le comportement espéré sont respectés
 - les ingénieurs aiment cela !
- Les prédictions et la robustesse devraient être améliorées

→ Quelques exemples, sans détail

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

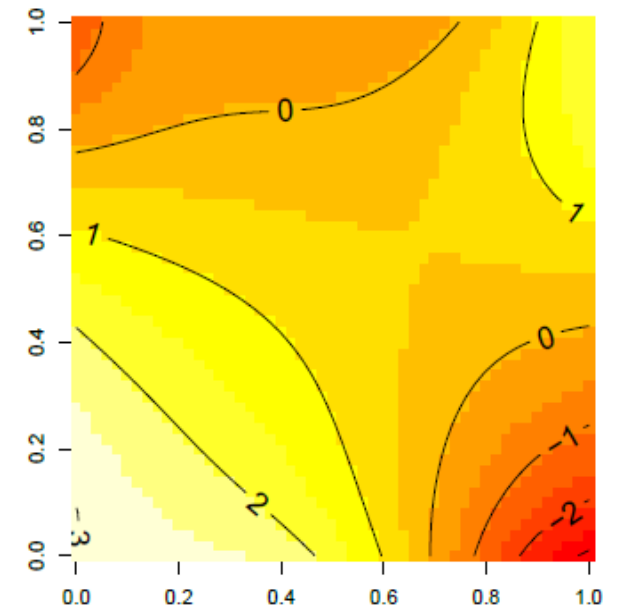
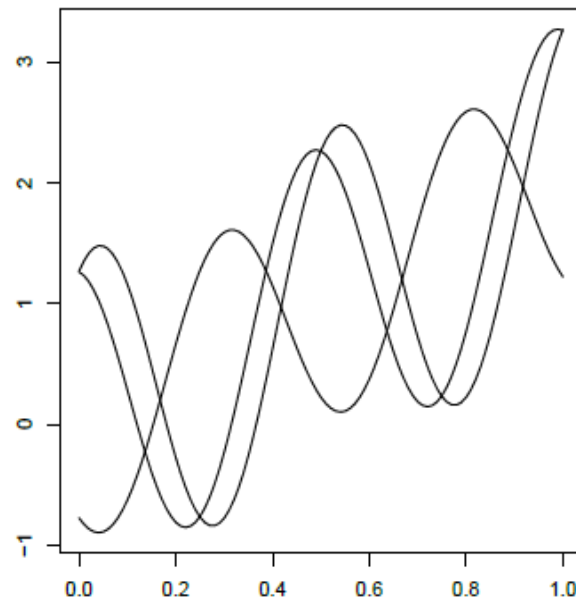
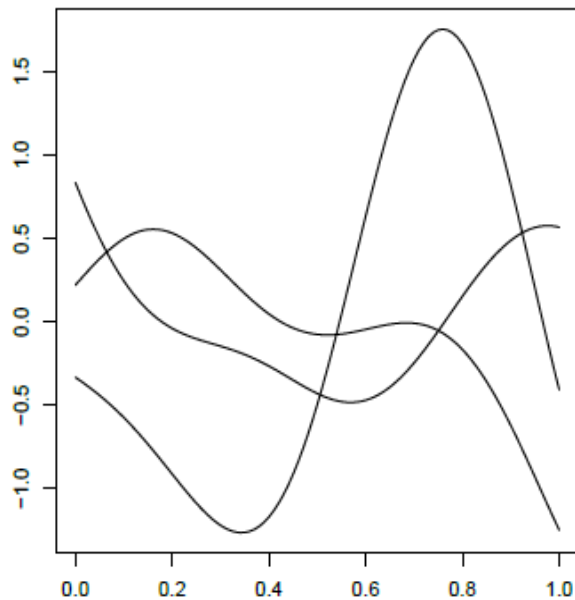
Régression par processus Gaussiens :
trajectoires d'un PG avec symétries spatiales



Ginsbourger et al. 2013

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

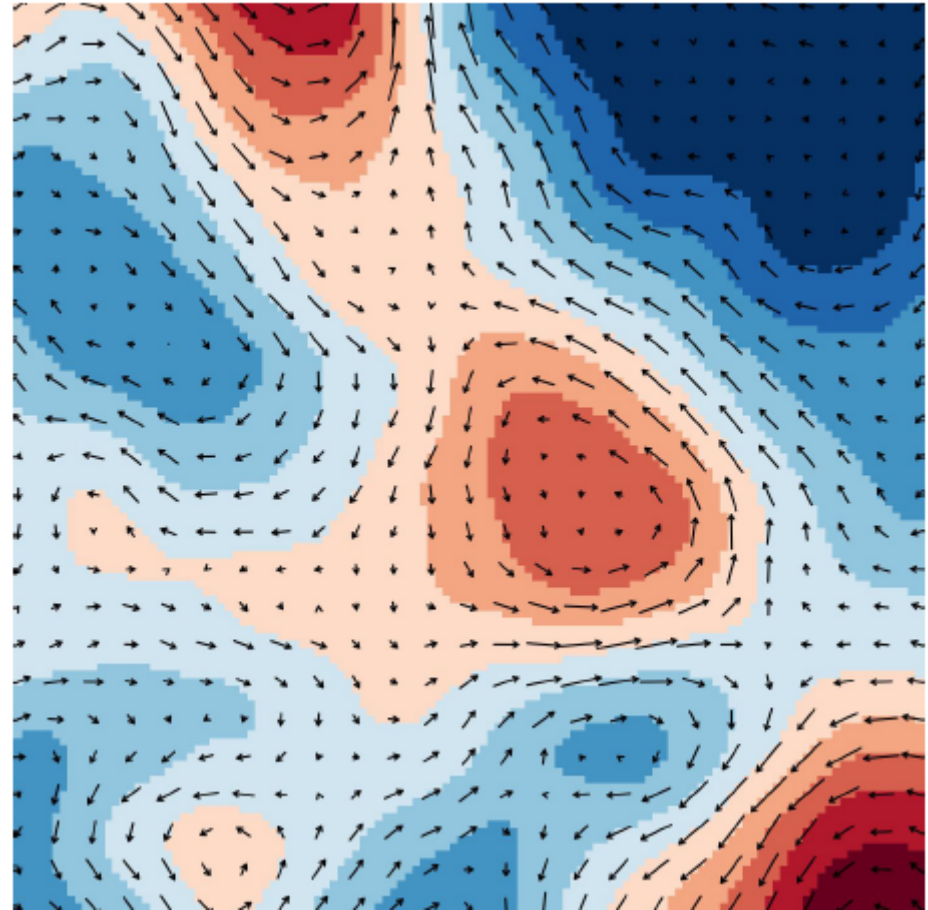
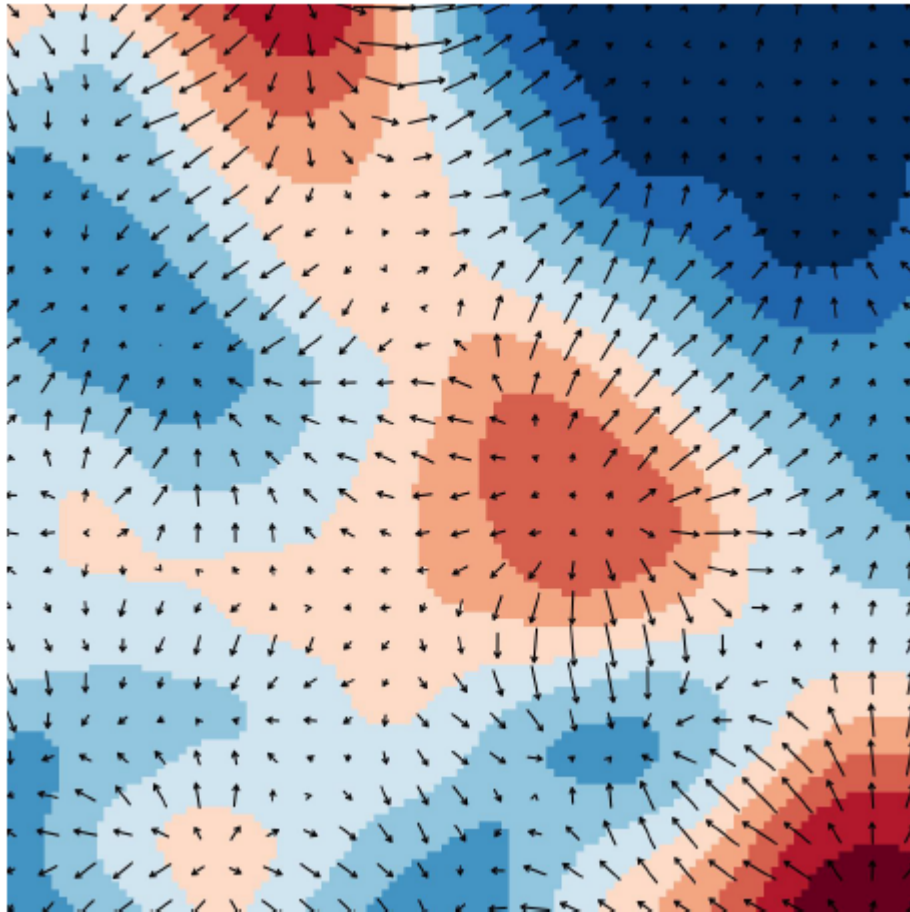
Régression par processus Gaussiens :
trajectoires d'un PG avec certaines contraintes
(intégrale nulle, solution ODE, Laplacien nul)



Ginsbourger et al. 2013

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

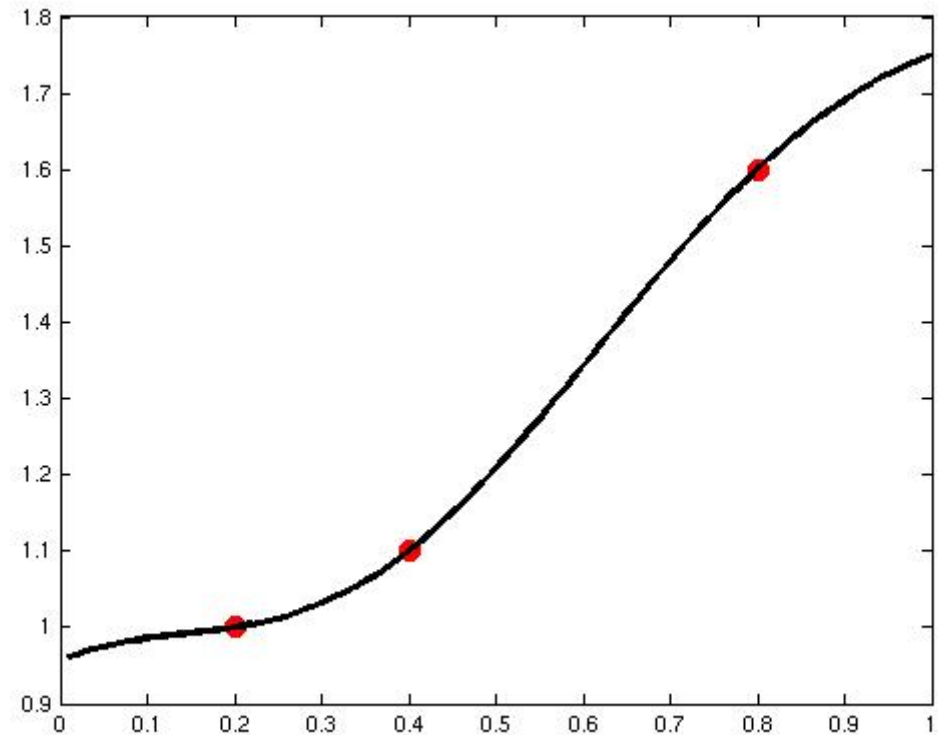
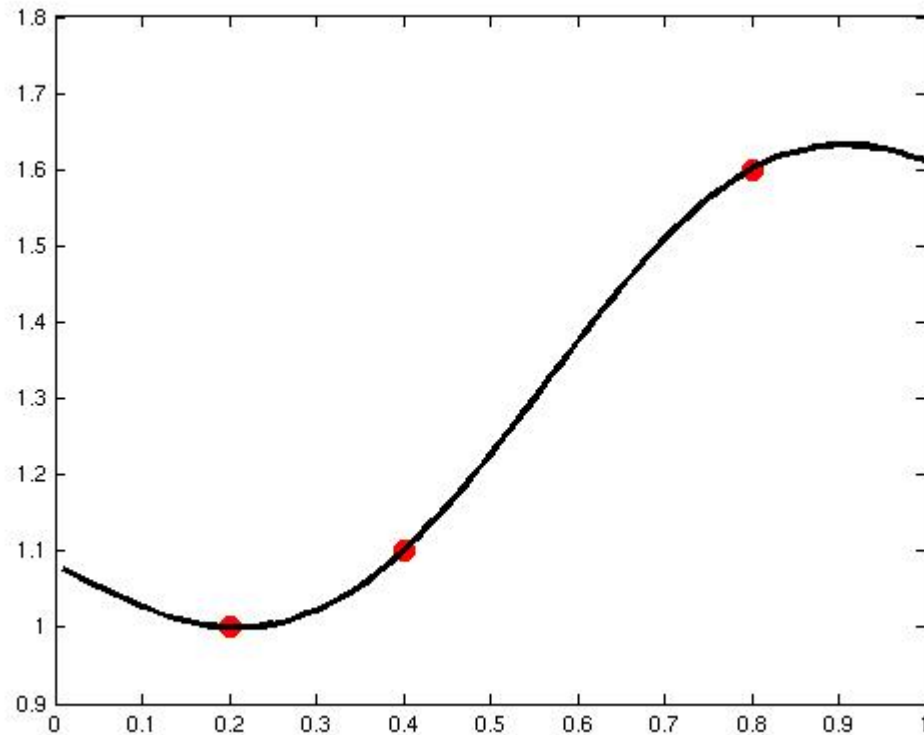
Trajectoires d'un PG 2D pour champs à rotationnel et divergence nuls



Scheuerer and Schlather 2012

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

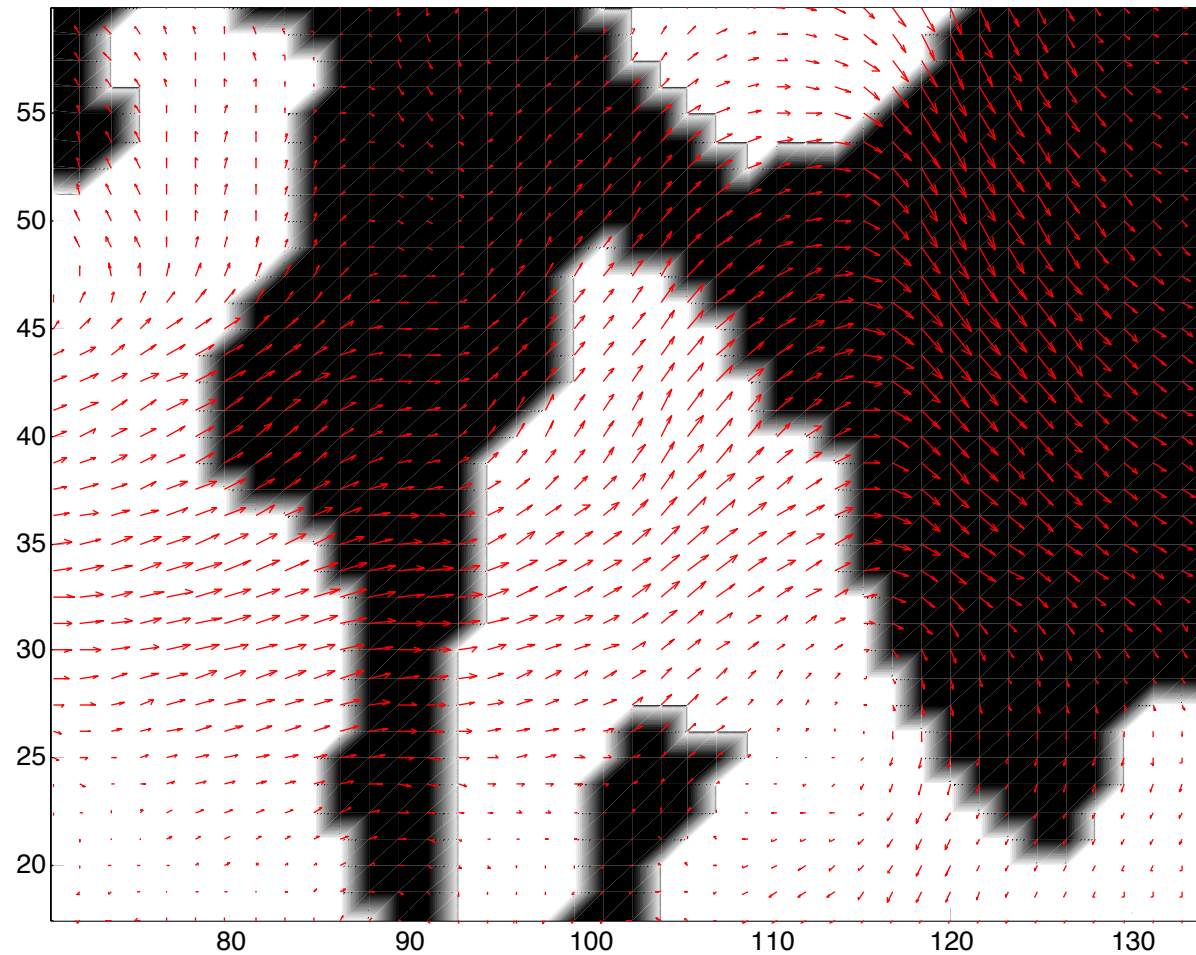
Régression par processus Gaussiens :
contraintes de monotonie



*D. & Marrel 2012
(toute contrainte linéaire)*

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 1/2

Trajectoires d'un PG 2D pour champ avec
contrainte de signe de la divergence



D. & Marrel 2014

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 2/2

→ Pour simuler un phénomène physique, il est fréquent que le physicien dispose de plusieurs modèles numériques

- Modèles analytiques, Simplifications 1D, Choix taille maillage et discrétisation temporelle, ...
- Le temps d'exécution de certains de ces modèles est beaucoup moins important que le code coûteux, au prix d'une erreur plus grande

→ Question : est-il possible de mettre à profit ces codes de différente complexité pour construire un meilleur émulateur ?

- Au lieu d'appeler le code coûteux 100 fois, peut-on économiser du temps de calcul en l'appelant seulement 50 fois et 500 fois un code analytique moins précis mais instantané ?

EMULATEURS : TRAVAUX RÉCENTS 2/2

→ Travaux récents pour la régression par processus Gaussiens

- Conditionnement de vecteur Gaussiens (Le Gratiet & Garnier 2013)

→ Pistes sérieuses et potentiellement puissantes grâce à des outils d'agrégation de modèles

- Agrégation convexe/linéaire d'experts (e.g. Stoltz 2012)
- Agrégation non-linéaire (COBRA : Biau et al. 2013, Guedj et al. 2013)

→ Problème encore ouvert

- Pas d'applications industrielles "grandeur nature"
- Plan adaptatif avec choix du code à appeler selon budget/précision

NOUVEAUX INDICES 1/2

→ La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt

- Très fréquemment, on est intéressé par la probabilité que la sortie dépasse un seuil (e.g. réglementaire)
- On souhaite alors identifier les paramètres d'entrée qui influencent le plus cette probabilité
 - L'analyse de sensibilité standard (à base d'indices de Sobol) ne permet pas de répondre à la question

NOUVEAUX INDICES 1/2

→ La variance de la sortie n'est pas forcément la quantité d'intérêt

- Très fréquemment, on est intéressé par la probabilité que la sortie dépasse un seuil (e.g. réglementaire)
- On souhaite alors identifier les paramètres d'entrée qui influencent le plus cette probabilité
 - L'analyse de sensibilité standard (à base d'indices de Sobol) ne permet pas de répondre à la question

→ Nécessité de définir de nouveaux indices

- Perturbation loi des entrées (Sergienko et al. 2013)
- Indices basés sur fonction de contraste (Fort et al. 2014)

$$S_i^\psi = \mathbb{E}\psi(Y; \theta^*) - \mathbb{E}_{(X_i, Y)}\psi(Y; \theta_i(X_i))$$

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \mathbb{E}\psi(Y; \theta)$$

$$\theta_i(x) = \arg \min_{\theta} \mathbb{E}(\psi(Y; \theta) | X_i = x)$$

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ **La variance de la sortie n'est qu'un résumé de la dispersion de la sortie**

- Question : est-il possible de définir un indice qui quantifie l'impact d'un paramètre d'entrée sur la loi de la sortie ?

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ La variance de la sortie n'est qu'un résumé de la dispersion de la sortie

- Question : est-il possible de définir un indice qui quantifie l'impact d'un paramètre d'entrée sur la loi de la sortie ?
- Indices « distributionnels »

$$S_i^{TV} = \int |p_Y(y) - p_{Y|X_i=x}(y)| p_{X_i}(x) dx dy$$

Borgonovo 2007

$$S_i^{KL} = \int p_{Y|X_i=x}(y) \ln \left(\frac{p_{Y|X_i=x}(y)}{p_{X_i}(x)} \right) p_{X_i}(x) dx dy$$

Kraskov et al. 2001

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ La variance de la sortie n'est qu'un résumé de la dispersion de la sortie

- Question : est-il possible de définir un indice qui quantifie l'impact d'un paramètre d'entrée sur la loi de la sortie ?
- Indices « distributionnels »

$$S_i^{TV} = \int |p_Y(y) - p_{Y|X_i=x}(y)| p_{X_i}(x) dx dy$$

Borgonovo 2007

$$S_i^{KL} = \int p_{Y|X_i=x}(y) \ln \left(\frac{p_{Y|X_i=x}(y)}{p_{X_i}(x)} \right) p_{X_i}(x) dx dy$$

Kraskov et al. 2001

- On reconnaît facilement le distance TV et l'information mutuelle

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Cadre général pour les indices distributionnels

- En toute généralité, l'impact d'un paramètre d'entrée peut être défini par l'intermédiaire d'une mesure de dissimilarité entre lois de probabilité

$$S_i = \mathbb{E}_{X_i} \left(d(P_Y, P_{Y|X_i}) \right)$$

Baucells and Borgonovo 2013
D. 2014

- Si la loi de la sortie et la loi conditionnelle sont « proches », le paramètre n'a pas d'influence

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Cadre général pour les indices distributionnels

- En toute généralité, l'impact d'un paramètre d'entrée peut être défini par l'intermédiaire d'une mesure de dissimilarité entre lois de probabilité

$$S_i = \mathbb{E}_{X_i} (d(P_Y, P_{Y|X_i}))$$

Baucells and Borgonovo 2013
D. 2014

- Si la loi de la sortie et la loi conditionnelle sont « proches », le paramètre n'a pas d'influence
- Cas particulier

$$d(P_Y, P_{Y|X_i}) = (\mathbb{E}(Y) - \mathbb{E}(Y|X_i))^2 \quad \rightarrow \text{Sobol !}$$

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Cadre général pour les indices distributionnels

- Famille d'indices intéressante obtenue avec les f-divergences

$$d_f(P_Y || P_{Y|X_i}) = \int f \left(\frac{p_Y(y)}{p_{Y|X_i}(y)} \right) p_{Y|X_i}(y) dy$$

D. 2014

$$S_i^f = \int f \left(\frac{p_Y(y)p_{X_i}(x)}{p_{X_i,Y}(x,y)} \right) p_{X_i,Y}(x,y) dx dy$$

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Cadre général pour les indices distributionnels

- Famille d'indices intéressante obtenue avec les f-divergences

$$d_f(P_Y || P_{Y|X_i}) = \int f\left(\frac{p_Y(y)}{p_{Y|X_i}(y)}\right) p_{Y|X_i}(y) dy$$

D. 2014

$$S_i^f = \int f\left(\frac{p_Y(y)p_{X_i}(x)}{p_{X_i,Y}(x,y)}\right) p_{X_i,Y}(x,y) dx dy$$

- Inclut comme cas particuliers d'indices de sensibilité la distance TV et l'information mutuelle

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Travaux en cours

- Liens avec d'autres mesures de distances entre lois
 - Distance correlation (Székely et al. 2007), Hilbert-Schmidt Independence Criterion (Gretton et al. 2005)
 - Récente utilisation dans le cadre de l'analyse de sensibilité, très bonnes propriétés de screening et faible coût en nombre de simulations (D. 2014)
- Décomposition de type "ANOVA" pour indices distributionnels
 - Permet de séparer les interactions des effets principaux, essentiel en pratique
 - [Une telle décomposition existe, inclut comme cas particulier Sobol !]

NOUVEAUX INDICES 2/2

→ Travaux en cours

- Liens avec d'autres mesures de distances entre lois
 - Distance correlation (Székely et al. 2007), Hilbert-Schmidt Independence criterion (Gretton et al. 2005)
 - Récente utilisation dans le cadre de l'analyse de sensibilité, très bonnes propriétés de screening et faible coût en nombre de simulations (D. 2014)

- Décomposition de type "ANOVA" pour indices distributionnels
 - Permet de séparer les interactions des effets principaux, essentiel en pratique
 - [Une telle décomposition existe, inclut comme cas particulier Sobol !]



Une piste pour remplacer les méthodes de criblage ?

CRIBLAGE & FEATURE SELECTION

- **Les méthodes de screening utilisées en analyse de sensibilité sont plutôt « old-school »**
 - Soit hypothèses très fortes sur le modèle numérique, soit beaucoup d'évaluations du modèle, méthodes qualitatives

CRIBLAGE & FEATURE SELECTION

→ Les méthodes de screening utilisées en analyse de sensibilité sont plutôt « old-school »

- Soit hypothèses très fortes sur le modèle numérique, soit beaucoup d'évaluations du modèle, méthodes qualitatives

→ Alors que la littérature sur la sélection de variables en grande dimension est abondante

- Peu d'interactions entre communautés
- Plusieurs méthodes clés en main
 - Max-Dependency, Max-Relevance (MI, Peng et al. 2005), extensions dCor (Li et al. 2012) et HSIC (Balasubramanian 2013)

$$\max_{\{i_1, \dots, i_m\} \subset \{1, \dots, d\}} \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m D(X_{i_k}, Y)$$

- Extensions pour paramètres corrélés (Min-Redundancy Peng et al. 2005, HSIC Lasso Yamada et al. 2013)

- Exemples pour GSA (D. 2014)

$$\max_{\{i_1, \dots, i_m\} \subset \{1, \dots, p\}} \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m D(X_{i_k}, Y) - \frac{1}{m^2} \sum_{k, l=1}^m D(X_{i_k}, X_{i_l})$$

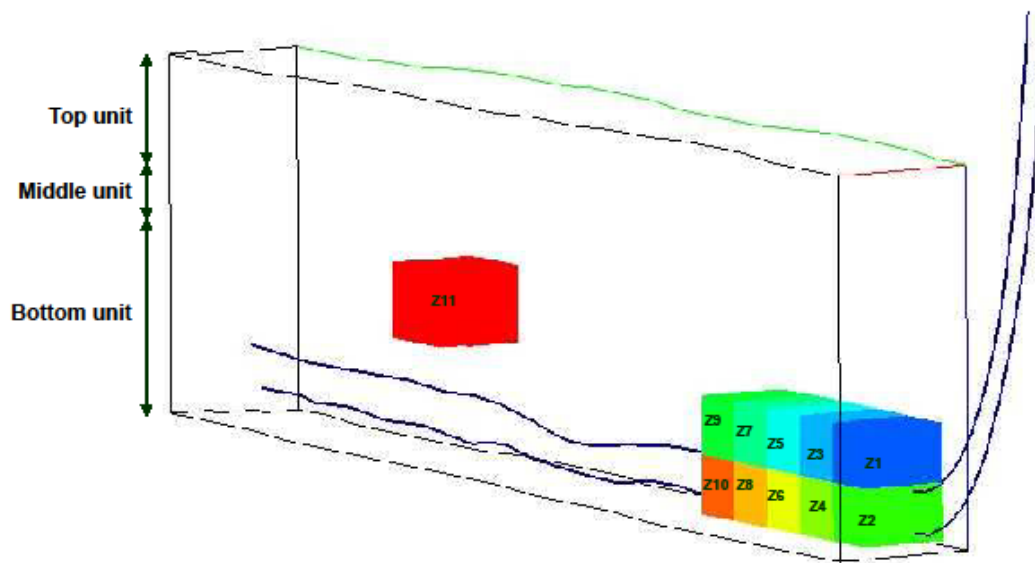
ENTRÉES / SORTIES FONCTIONNELLES

- **Souvent, certaines entrées et sorties du modèle numérique sont des courbes, des cartes 2D ou des cubes 3D de propriétés physiques**

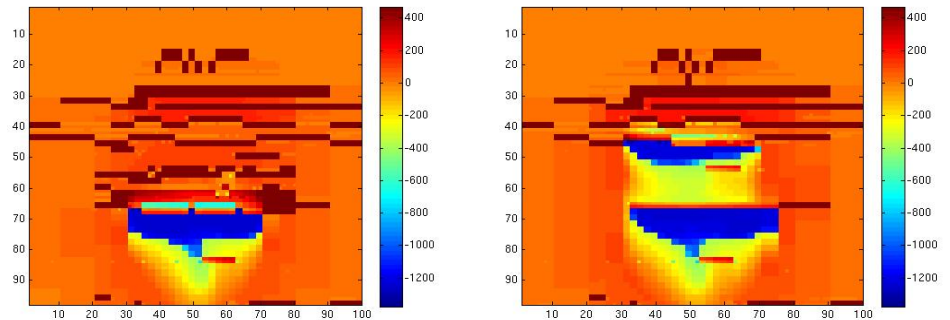
ENTRÉES / SORTIES FONCTIONNELLES

→ Souvent, certaines entrées et sorties du modèle numérique sont des courbes, des cartes 2D ou des cubes 3D de propriétés physiques

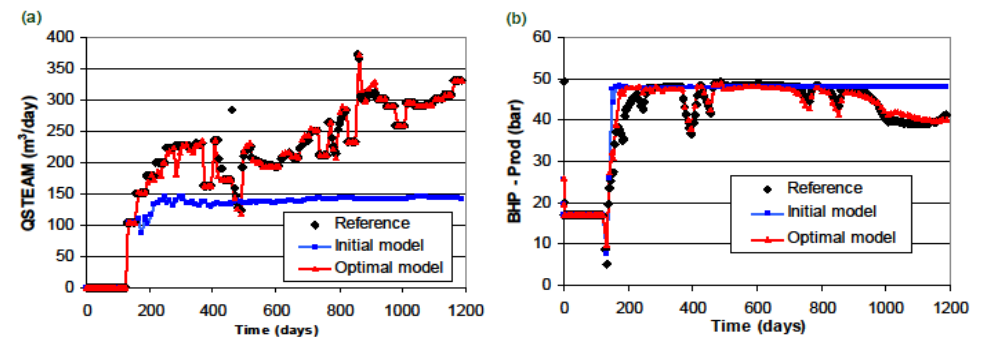
Réservoir de pétrole produit par injection de vapeur



Entrées : proportions d'argile dans certaines zone



Sortie : cube 3D de propagation de la chambre de vapeur dans le réservoir



Sortie : évolution temporelle du débit de vapeur et de la pression au puits producteur

ENTRÉES / SORTIES FONCTIONNELLES

- **Souvent, certaines entrées et sorties du modèle numérique sont des courbes, des cartes 2D ou des cubes 3D de propriétés physiques**

- **Travaux pour construction d'indices globaux et utilisation d'émulateurs dédiés**
 - Décompositions fonctionnelles de la sortie (ACP, Ondelettes, ...) puis émulateurs sur les coefficients de la décomposition
 - Contamination sol (Marrel et al. 2011), réacteur thermo-hydraulique (Auder et al. 2011), agronomie (Lamboni et al. 2011)
 - Indices à différentes échelles pour des cartes 2D (Saint-Geours et al. 2014)
 - Analyse de sensibilité avec critère HSIC et noyaux dédiés (D. 2014)

ENTRÉES / SORTIES FONCTIONNELLES

- **Souvent, certaines entrées et sorties du modèle numérique sont des courbes, des cartes 2D ou des cubes 3D de propriétés physiques**

- **Travaux pour construction d'indices globaux et utilisation d'émulateurs dédiés**
 - Décompositions fonctionnelles de la sortie (ACP, Ondelettes, ...) puis émulateurs sur les coefficients de la décomposition
 - Contamination sol (Marrel et al. 2011), réacteur thermo-hydraulique (Auder et al. 2011), agronomie (Lamboni et al. 2011)
 - Indices à différentes échelles pour des cartes 2D (Saint-Geours et al. 2014)
 - Analyse de sensibilité avec critère HSIC et noyaux dédiés (D. 2014)

- **Problèmes ouverts**
 - Choix de distances / décompositions selon les caractéristiques du problème
 - Expertise, études systématiques

/03/

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

CONCLUSION

→ Expériences numériques en contexte industriel

- Forte expansion ces dernières années, problématique multi-sectorielle, très large intersection entre les attentes des industriels
- La thématique fait appel à de nombreuses disciplines
 - Plans d'expériences, émulateurs, sélection de variables, optimisation, ...

→ Travaux récents ou en cours en lien avec le machine learning

- Émulateurs, Mesures de distance entre lois, optimisation stochastique
- Ex : projet ANR Chorus (EDF, Airbus, ENPC, ...)

→ Les sujets d'intérêt à l'heure actuelle :

- Entrées / Sorties fonctionnelles
- Screening en grande dimension
- Combinaison de modèles numériques de différente complexité
- Liens avec l'optimisation (optimisation sous incertitudes, optimisation robuste)

CONCLUSION

→ Communauté française : GDR Mascot-Num

- Ateliers, conférence annuelle
- News, bibliographie, formations



→ Logiciels

- Emulateurs PG : package dicekriging
- Analyse de sensibilité : package sensitivity

Merci de votre attention