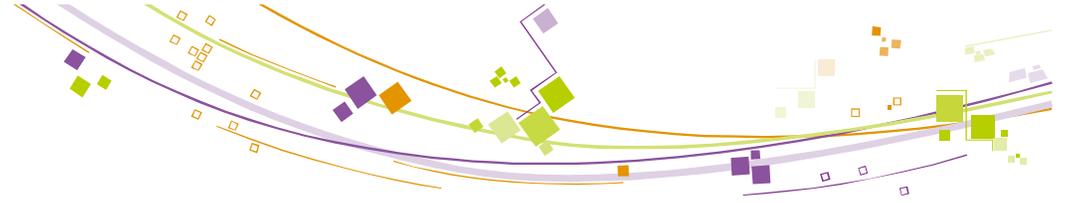


Analyse d'incertitudes et de sensibilité pour des données de grande dimension en ingénierie de réservoir

S. Da Veiga

IFPEN, Direction Ingénierie de réservoir



Plan

- Quelques notions d'ingénierie de réservoir
- Analyse d'incertitudes et de sensibilité
- Travaux pour les sorties fonctionnelles
- Pistes pour les sorties fonctionnelles

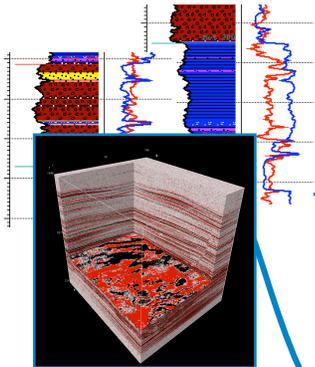


Quelques notions d'ingénierie de réservoir



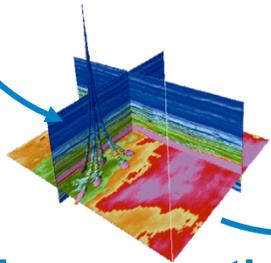
Pièce centrale : le modèle géologique, grille contenant

- le type de roche (sable, argile, ...)
- la porosité
- le tenseur des perméabilités



Well and seismic data

Mesures sur carottes
Campagne sismique

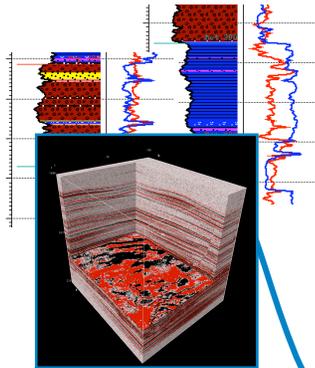
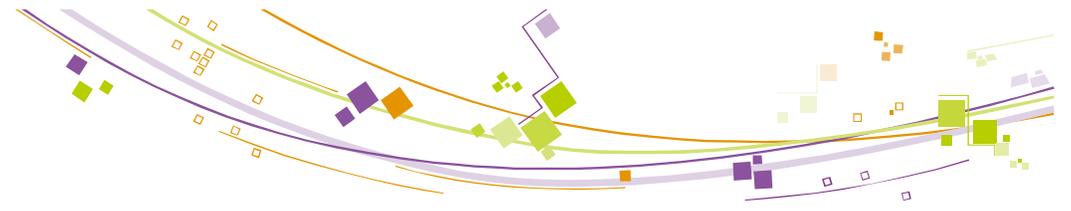


Facies proportions model



**Geological model :
Facies, porosity,
permeability**

Modélisation des proportions
(stationnaire ou non, contraintes externes, ...)



Well and seismic data

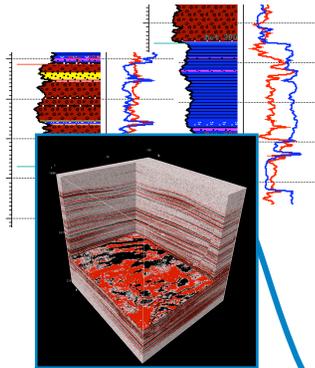
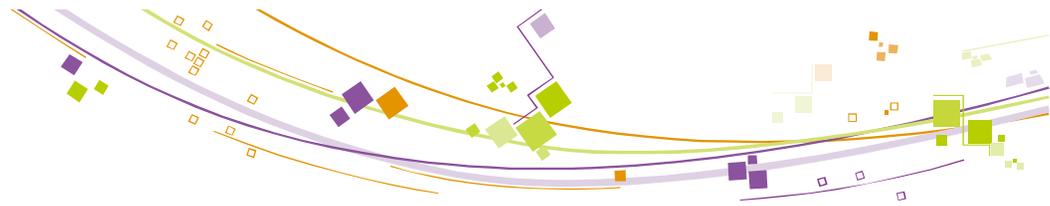
Structural model

Stratigraphic model

Horizons, failles
(sismiques, subsismiques)

Facies proportions model

**Geological model :
Facies, porosity,
permeability**



Well and seismic data

Structural model

Stratigraphic model

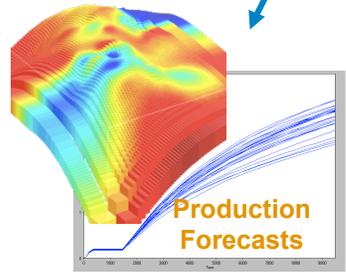
Reservoir grid

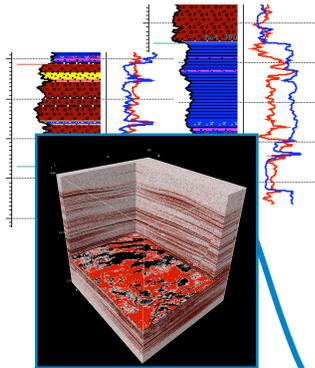
Upscaling

Facies model

- Partie "simulation" :
- Construction grille réservoir
 - Mise à l'échelle (temps de calcul)
 - Simulation d'écoulement des fluides
 - **Obtention des données de production**

Flow simulation





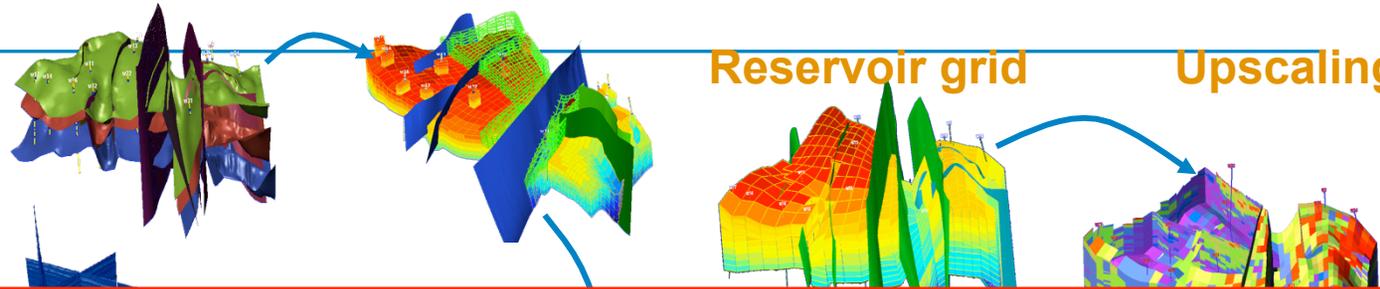
Well and seismic data

Structural model

Stratigraphic model

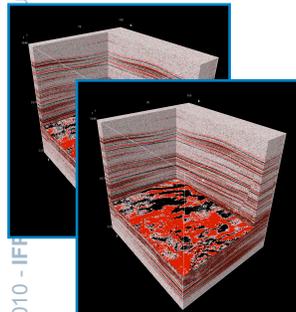
Reservoir grid

Upscaling

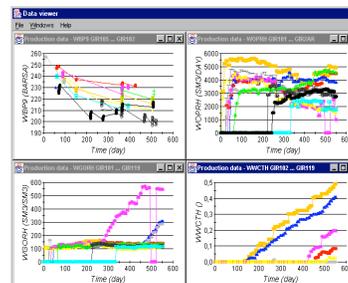


Intégration des données de production observées sur le champ
 Intégration des données sismiques lors de campagnes suivantes
 Objectif : mettre à jour le modèle géologique pour le rendre le plus proche possible de ce qui est mesuré sur champ

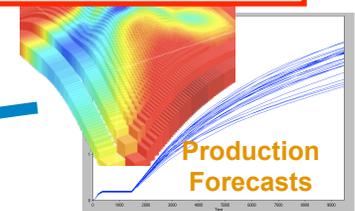
© 2010 - IFP - Malmaison, France

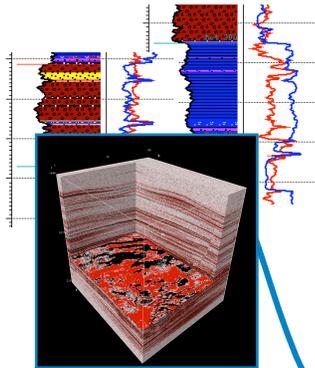


Integration of 4D seismic data



Integration of production data





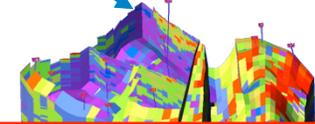
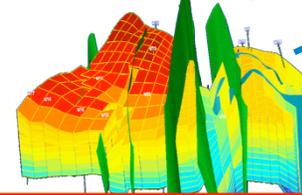
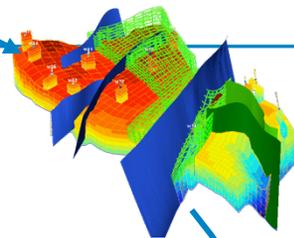
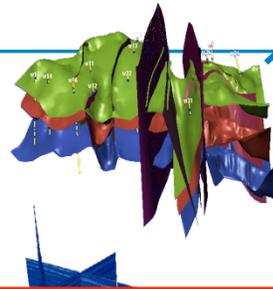
Well and seismic data

Structural model

Stratigraphic model

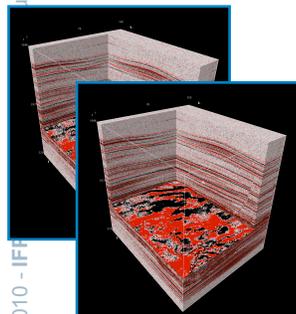
Reservoir grid

Upscaling



Intégration des données de production observées sur le champ
 Intégration des données sismiques lors de campagnes suivantes
 Objectif : mettre à jour le modèle géologique pour le rendre le plus proche possible de ce qui est mesuré sur champ

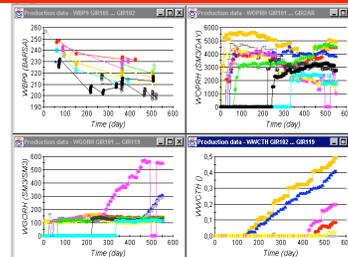
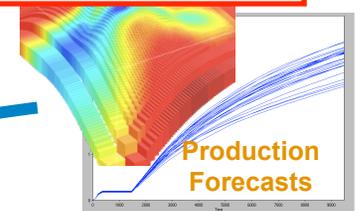
jeil-Malmaison, France



Integration of 4D seismic data

Problème inverse !

Integration of production data



© 2010 - IFP



Schéma du problème inverse

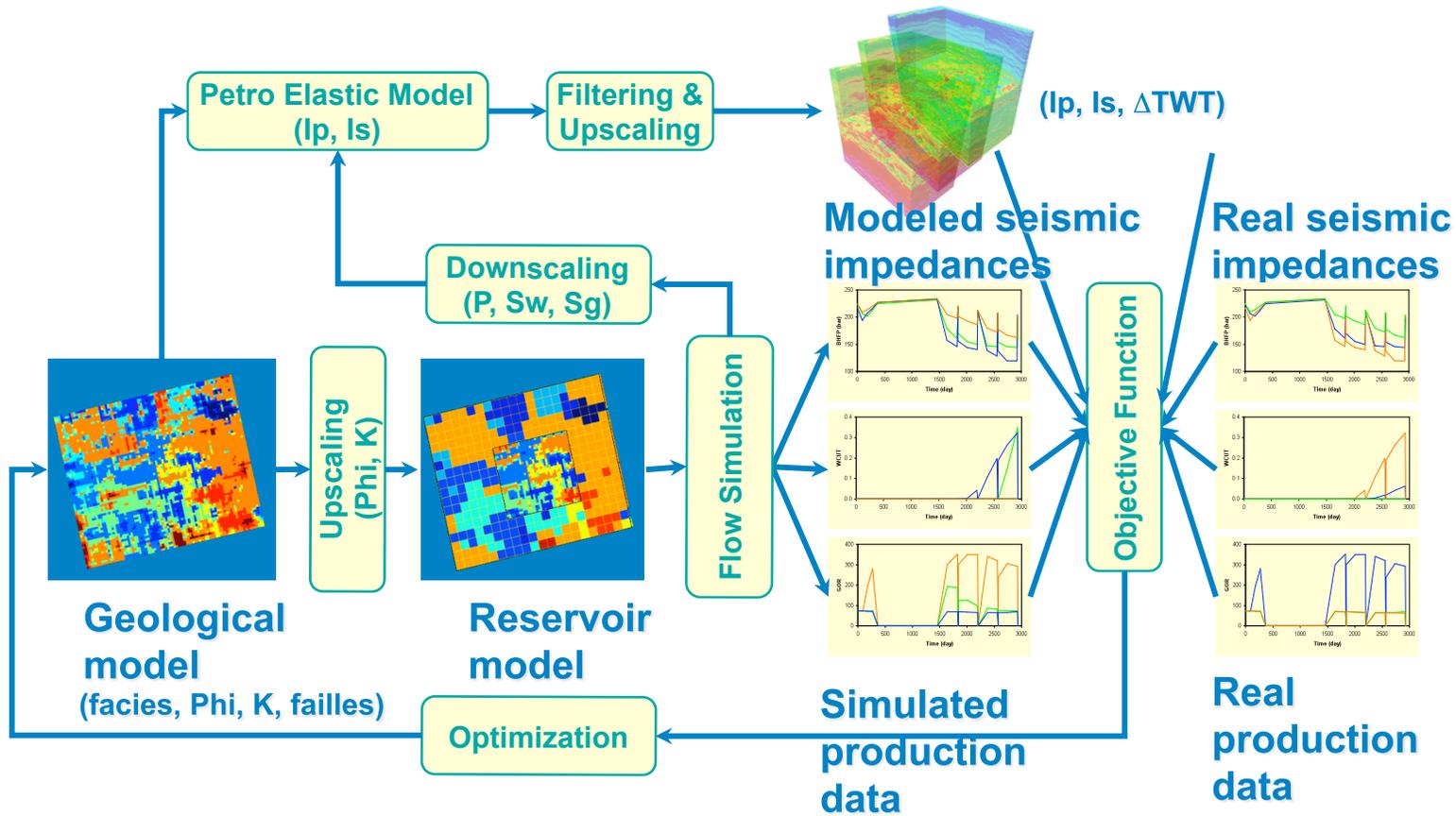
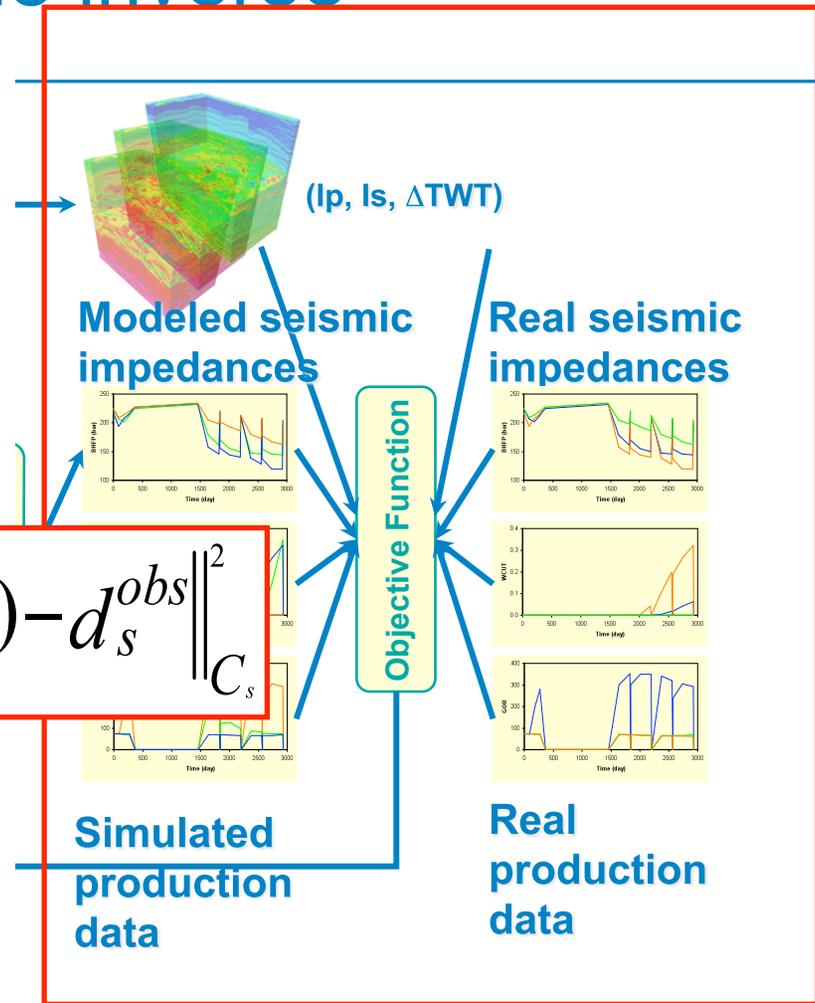




Schéma du problème inverse

Construction d'une fonction qui mesure la différence entre les données simulées et les données réelles

$$f(\theta) = \left\| d_p(\theta) - d_p^{obs} \right\|_{C_p}^2 + \left\| d_s(\theta) - d_s^{obs} \right\|_{C_s}^2$$



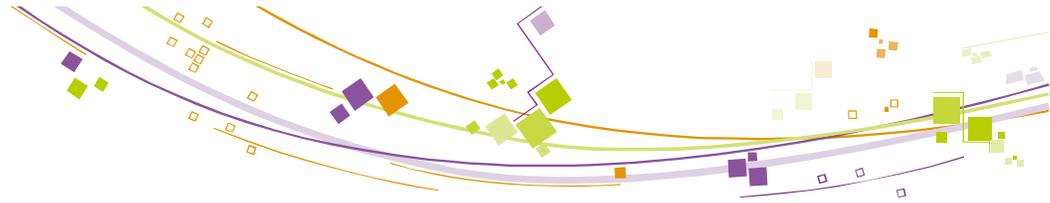
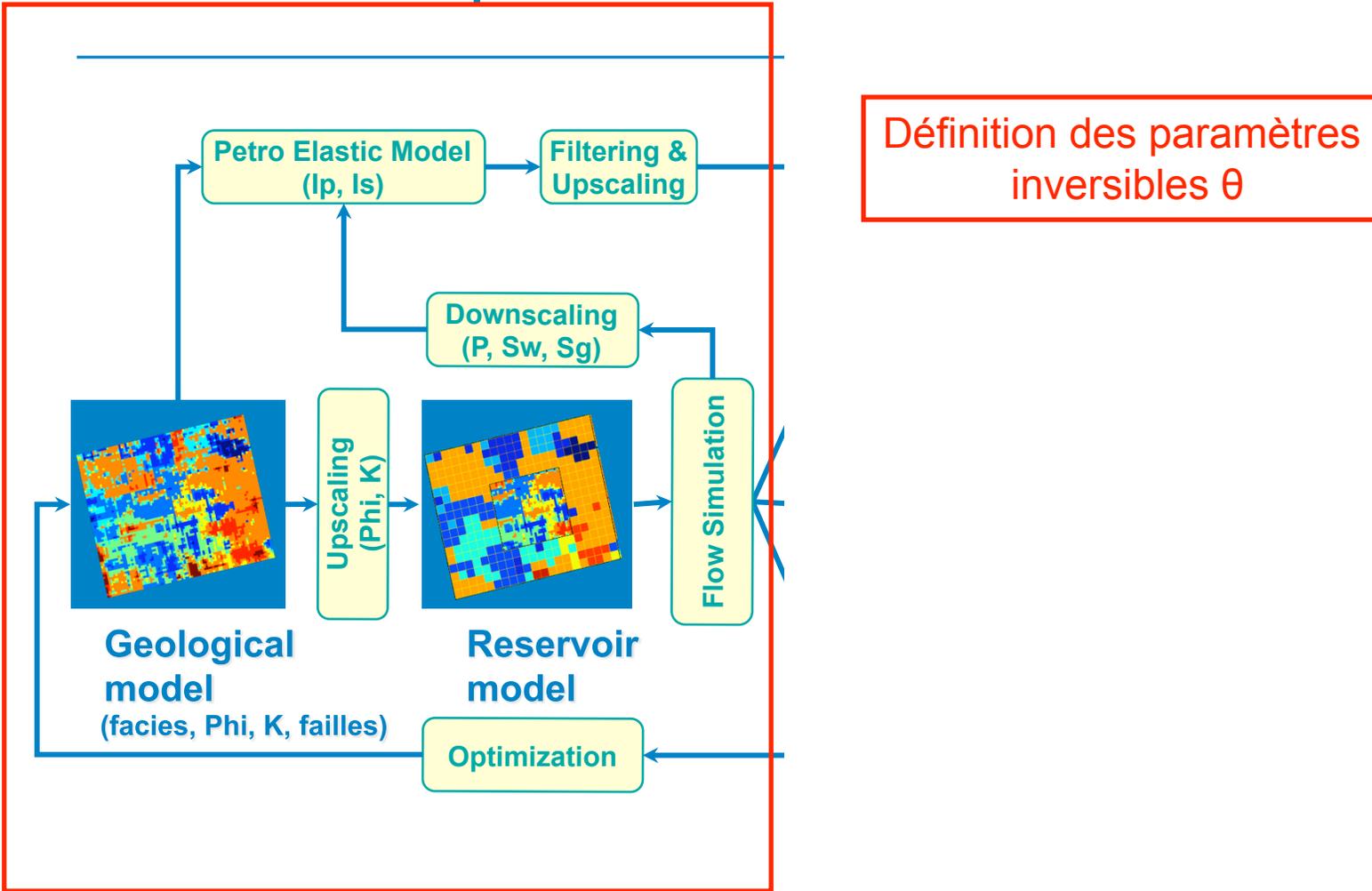


Schéma du problème inverse



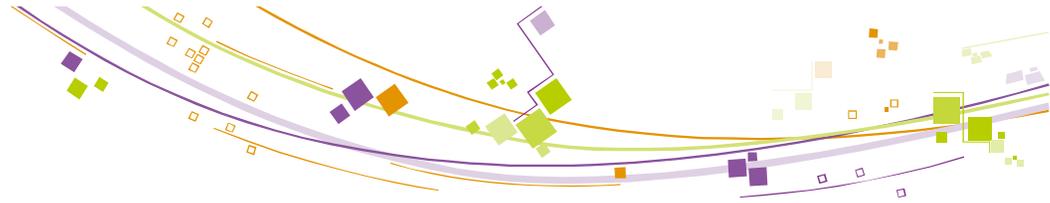
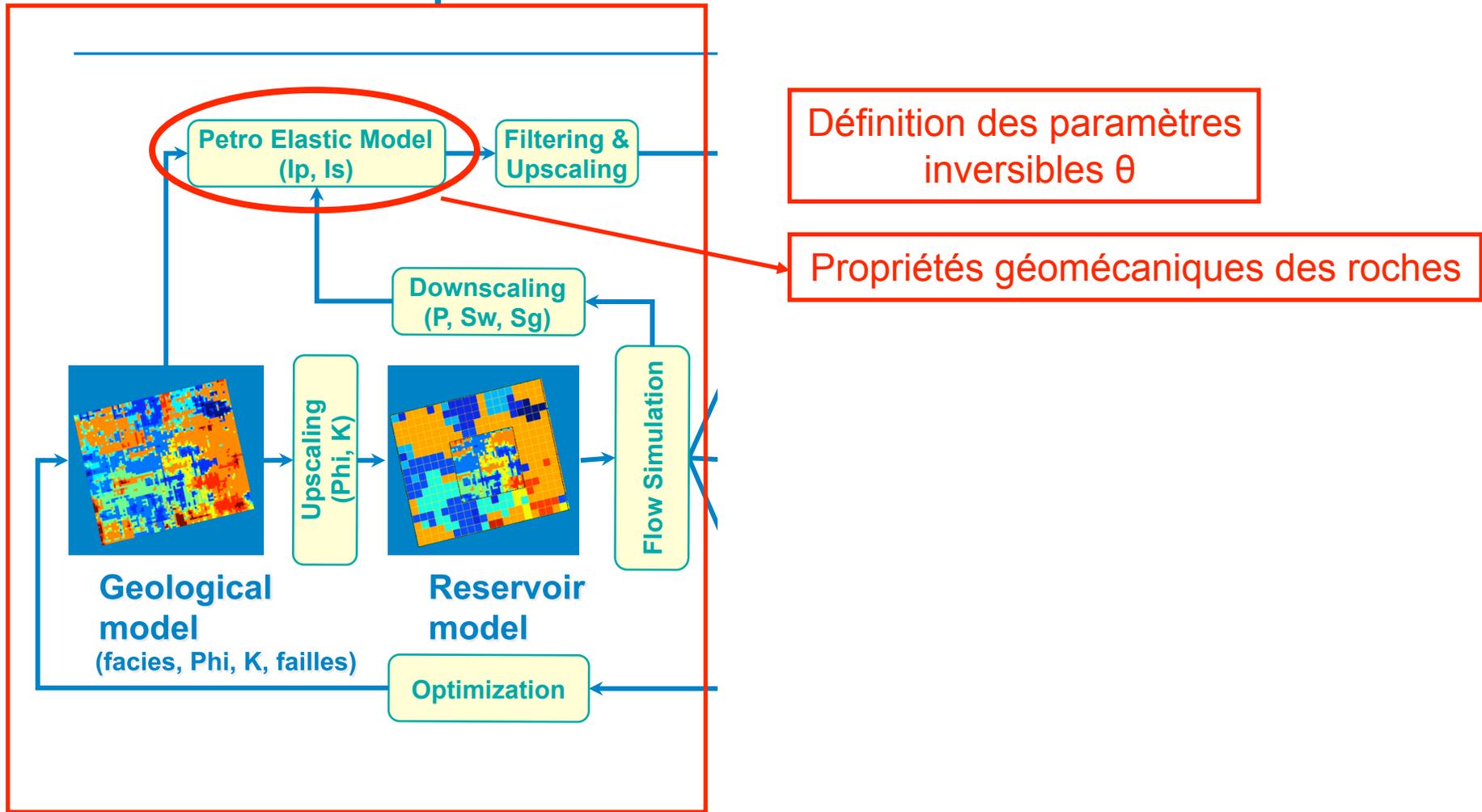


Schéma du problème inverse



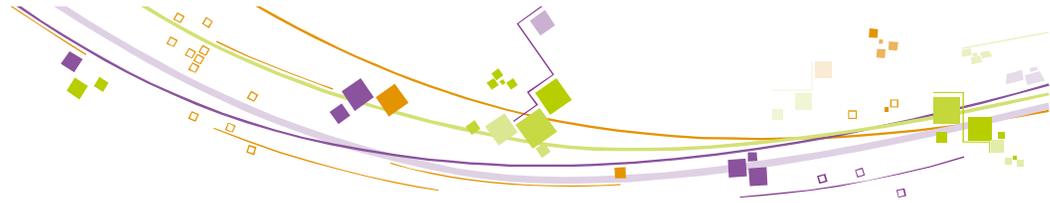
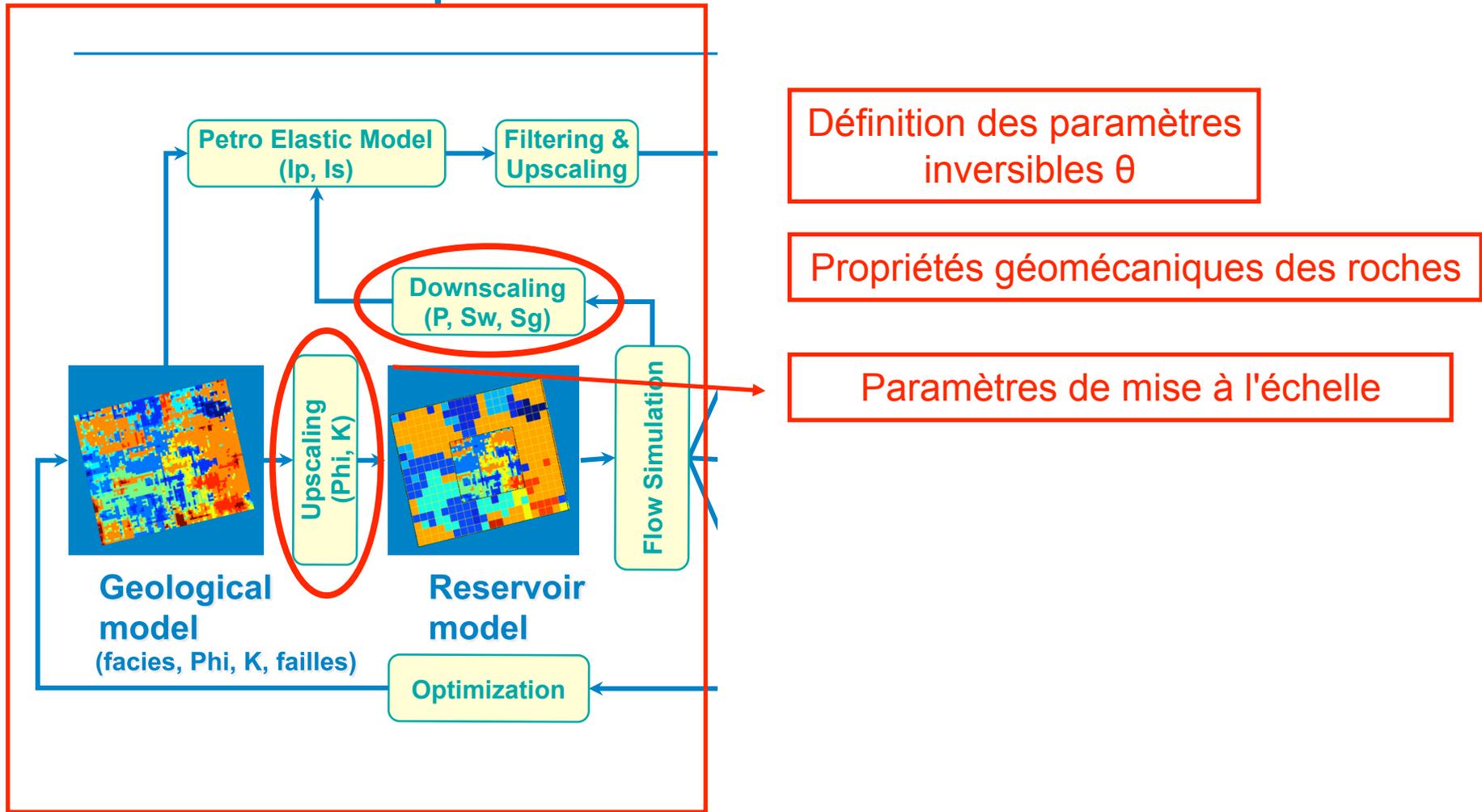


Schéma du problème inverse



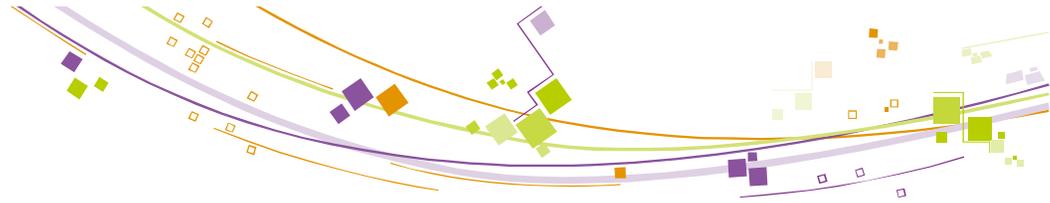


Schéma du problème inverse

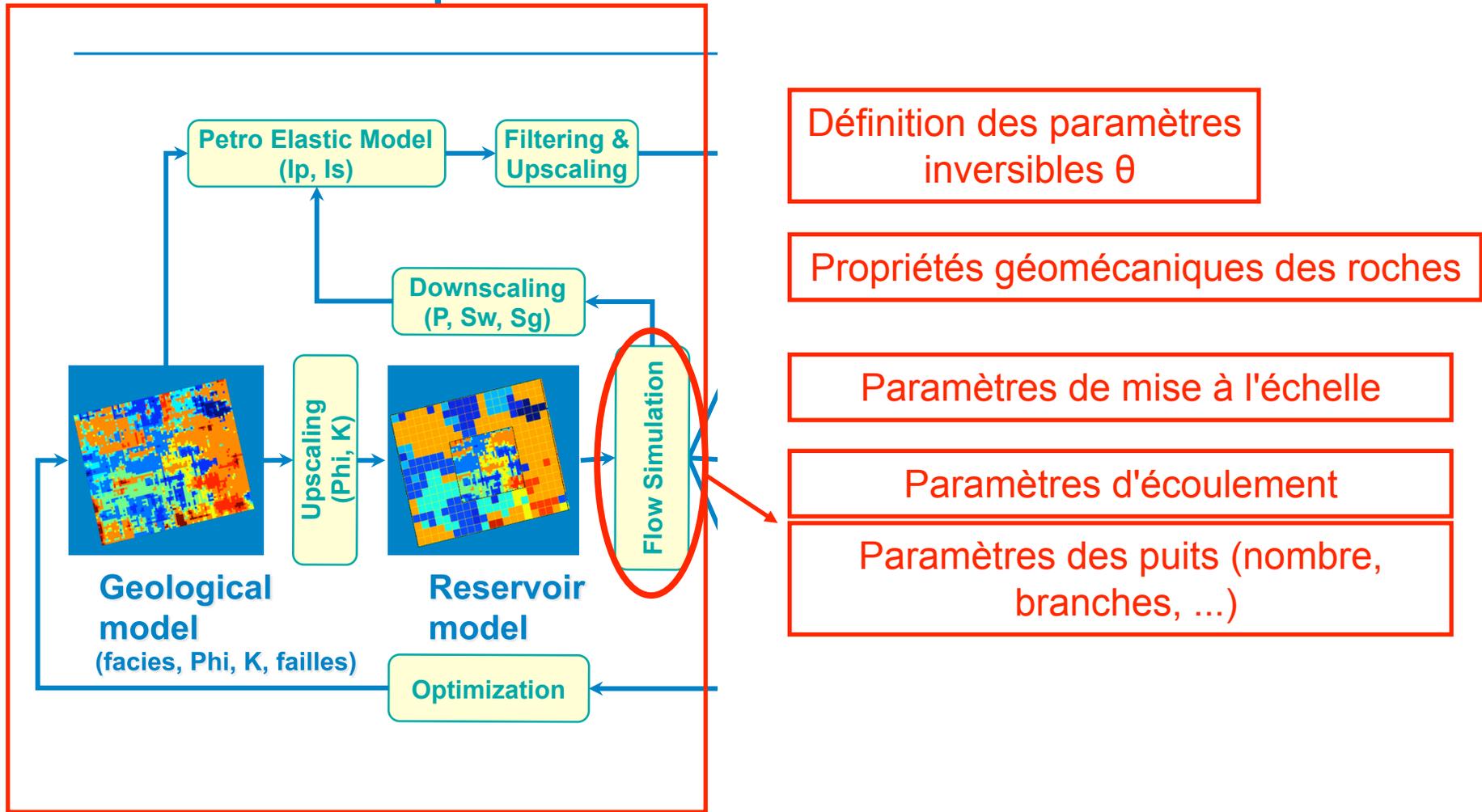
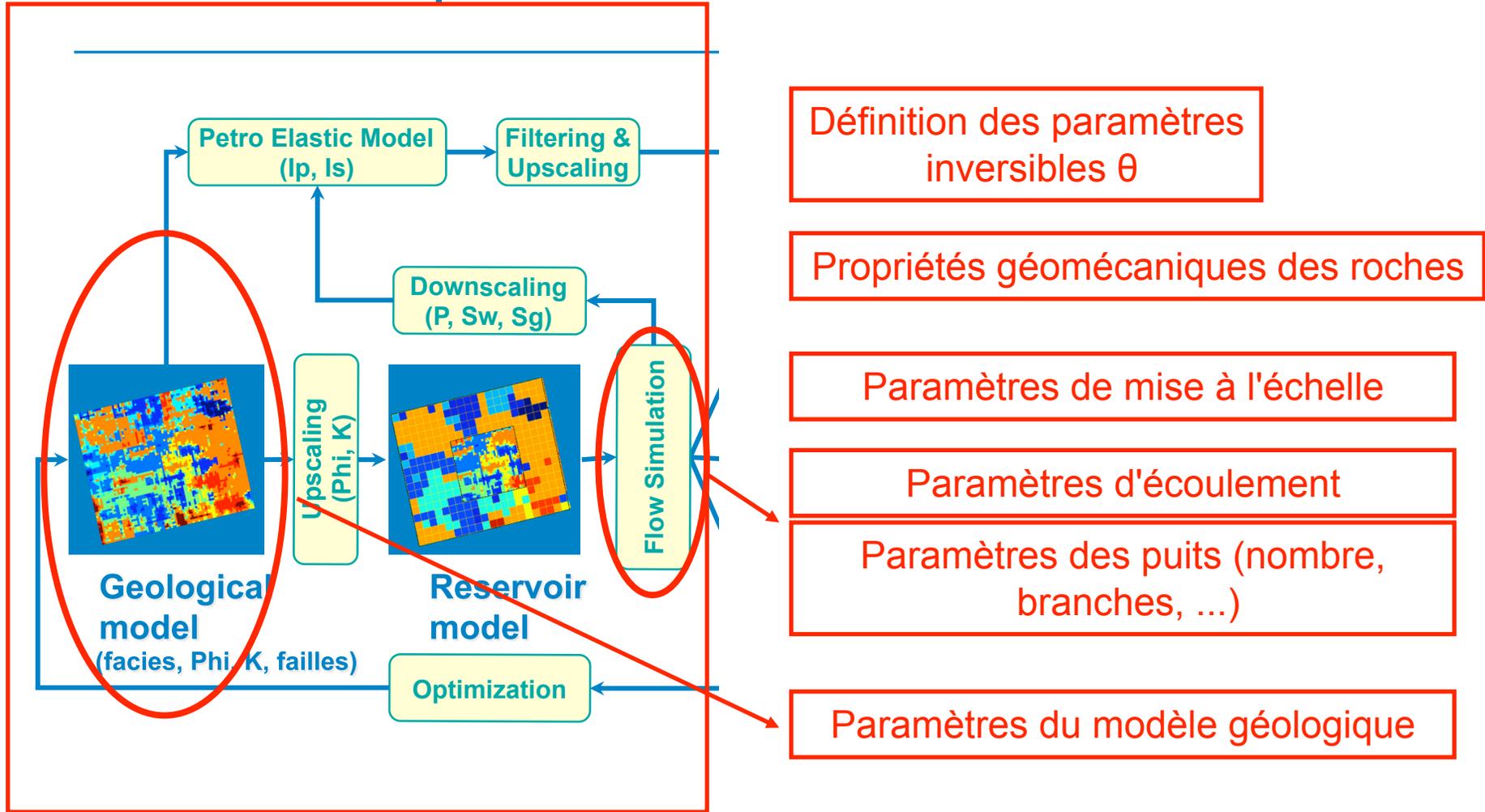




Schéma du problème inverse



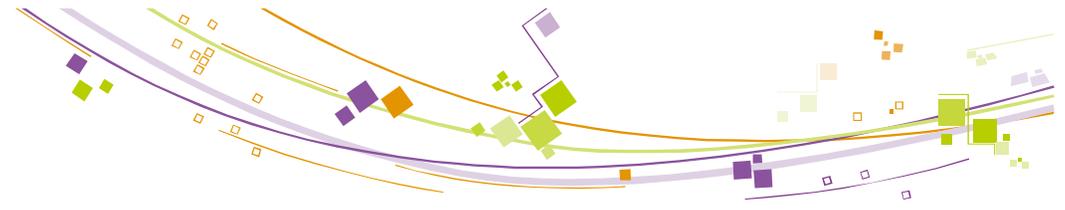
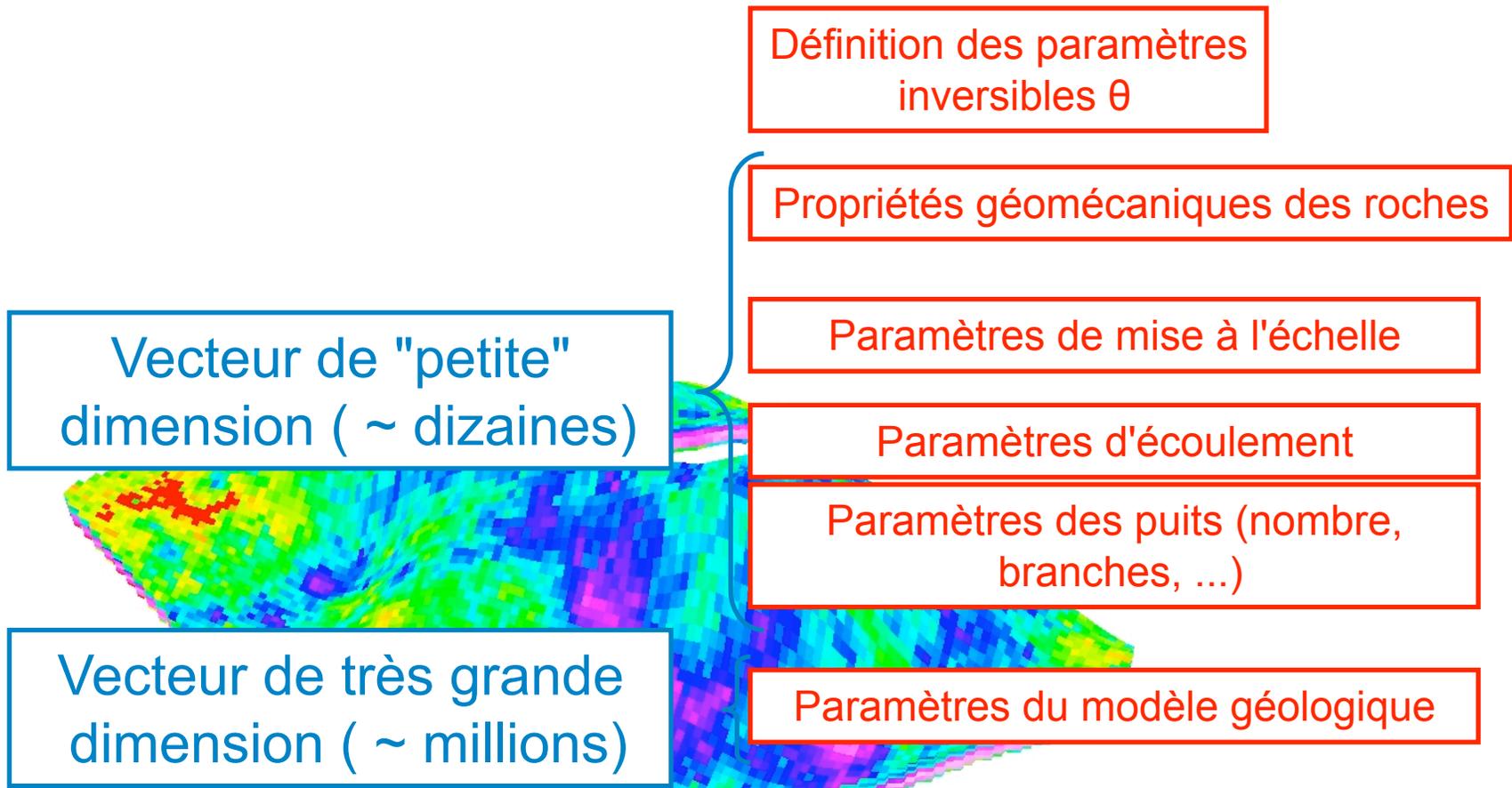
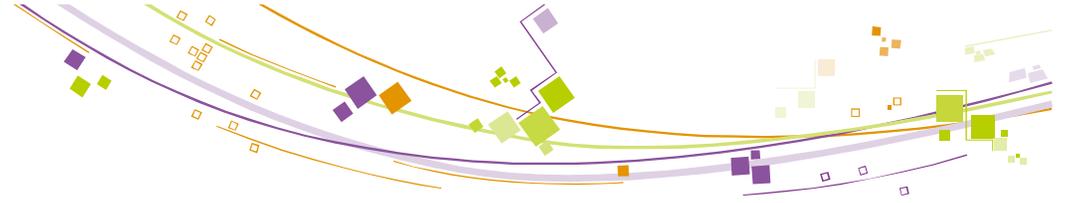


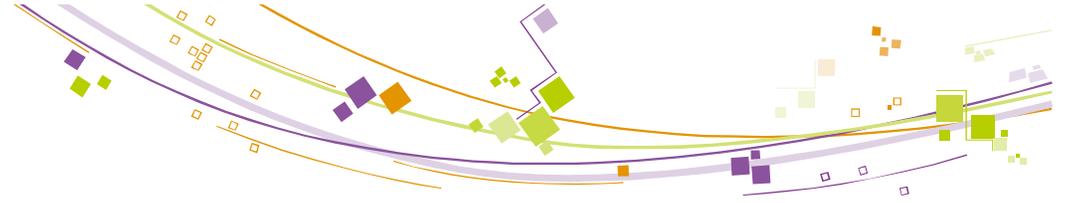
Schéma du problème inverse





Avant de résoudre le problème inverse ...

- Grand nombre de paramètres, peu de budget de simulations
- On cherche à évaluer le comportement de notre simulateur en prédiction
 - Analyse d'incertitudes
- Nécessité d'identifier les paramètres les plus influents
 - Analyse de sensibilité



Analyse de sensibilité

- **Méthodes locales**
 - Basées sur les dérivées
 - Extensions pour les probabilités de dépassement de seuil (FORM / SORM)

- **Méthodes globales**
 - Criblage (Morris)
 - Décomposition de la variance



Analyse de sensibilité

- Décomposition ANOVA fonctionnelle de la réponse (Hoeffding 1948, Antoniadis 1984, Sobol 1990)

$$\text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^p V_i(Z) + \sum_{i<j}^p V_{ij}(Z) + \dots + V_{12\dots p}(Z)$$

- Indices de sensibilité

$$S_i = \frac{\text{Var}_{X_i}[E(Z|X_i)]}{\text{Var}(Z)} \quad ; \quad S_{ij} \quad ; \quad \dots \quad ; \quad S_{Ti} = S_i + \sum_j S_{ij} + \sum_{j,k} S_{ijk} + \dots$$

1er ordre

2ème ordre

Indice total

- Mesures du poids des entrées sur la variance de la réponse



Analyse de sensibilité

$$S_i = \frac{\text{Var}_{X_i} [E(Z|X_i)]}{\text{Var}(Z)} \quad ; \quad S_{ij} \quad ; \quad \dots \quad ; \quad S_{Ti} = S_i + \sum_j S_{ij} + \sum_{j,k} S_{ijk} + \dots$$

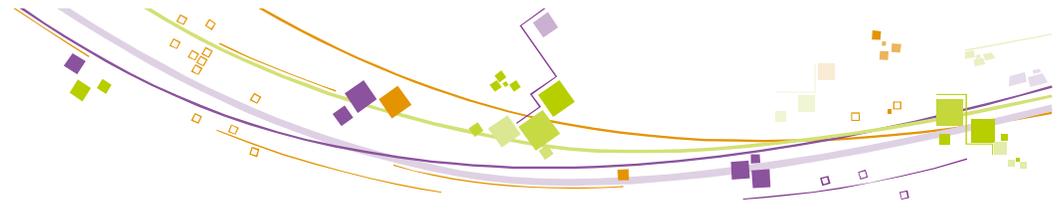
- **Se pose le problème de l'estimation des indices**
 - Echantillonnage Monte-Carlo Saltelli et al. 2000
 - Echantillonnage spécifique FAST, RBD-FAST Cukier et al. 1973, Mara 2009
 - Propriétés convergence, efficacité asymptotique
Janon et al. 2012, Tissot & Prieur 2012, Da Veiga & Gamboa 2012

- **Mais problème si la réponse est coûteuse**
 - modèles surrogate Oakley & O'Hagan 2004, Marrel et al. 2009, Da Veiga et al. 2009
 - krigeage Rasmussen & Williams 2006, Durrande et al. 2012, Gramacy 2009, ...



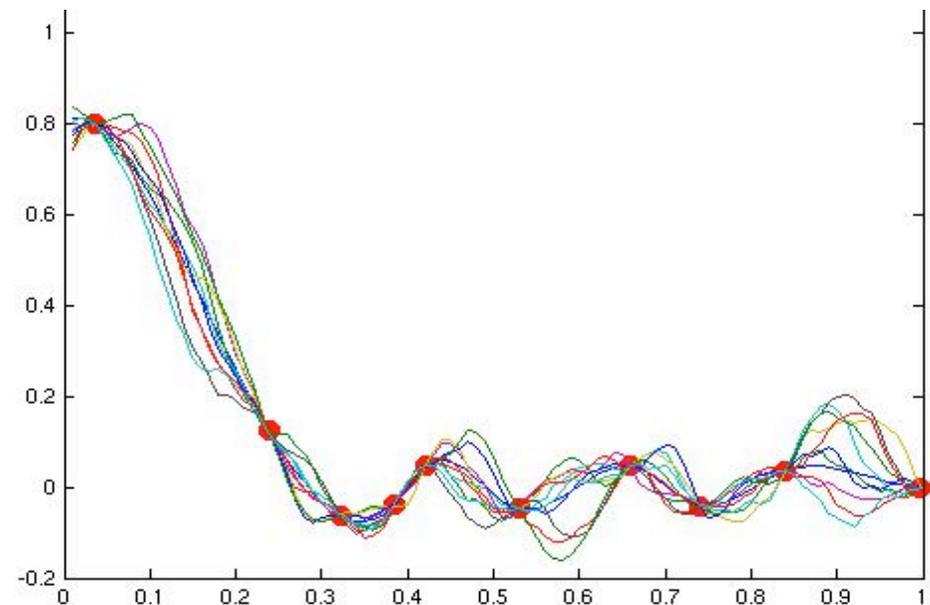
Analyse de sensibilité

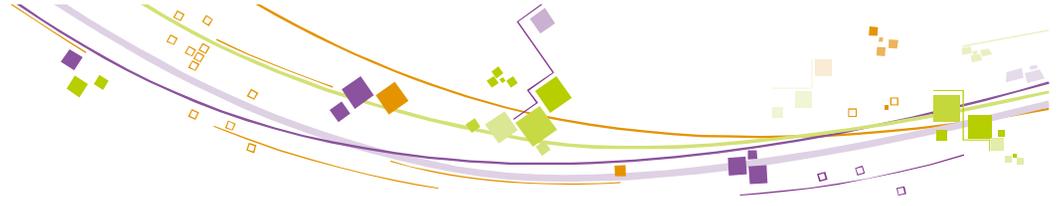
- **En pratique, pour les simulations coûteuses**
 - Plan exploratoire, avec de bonnes propriétés de projection (LHS, OA, ...)
 - Utilisation des simulations pour construire un modèle de la réponse en fonction des paramètres incertains
 - Souvent, choix d'un modèle interpolant
 - Un « classique » dans l'industrie : krigage (régression par processus Gaussiens)



Analyse de sensibilité

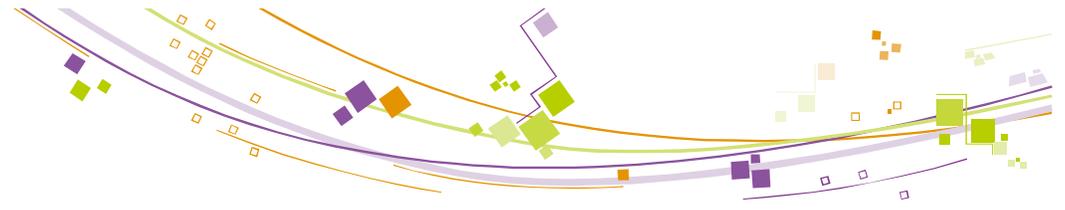
- A priori : la fonction est la réalisation d'un GP stationnaire
- Estimation des paramètres du GP sous-jacent
- La fonction approchée est la moyenne du GP conditionné à passer par les observations





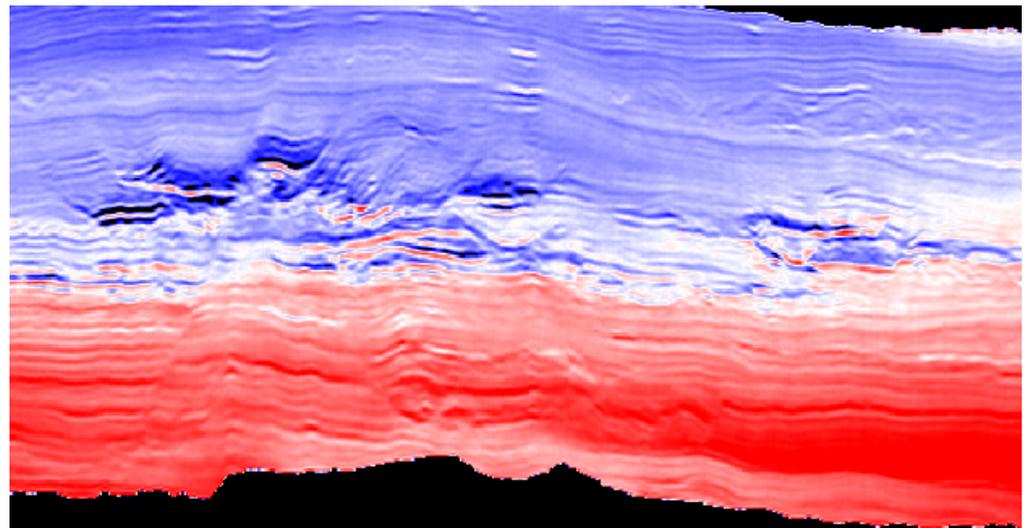
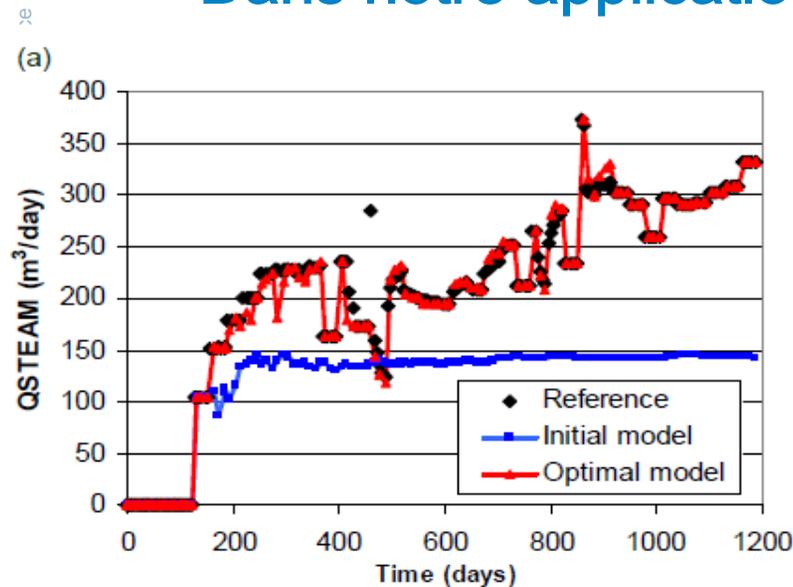
Analyse de sensibilité

- **En pratique, pour les simulations coûteuses**
 - Plan exploratoire, avec de bonnes propriétés de projection (LHS, OA, ...)
 - Utilisation des simulations pour construire un modèle de la réponse en fonction des paramètres incertains
 - Souvent, choix d'un modèle interpolant
 - Un « classique » dans l'industrie : krigeage (régression par processus Gaussiens)
 - Monte-Carlo intensif sur le modèle (proxy, surrogate, response surface, ...)



Analyse de sensibilité

- Une large majorité des méthodes récentes se concentre sur le cas d'une réponse monodimensionnelle
- Dans notre application, exemples de sorties :





Analyse de sensibilité

- Trop intensif de le faire pour chaque point d'une courbe ou d'un maillage 3D
- Pour les sorties de type « courbe »
 - Décomposition sur base adaptée
 - Modèle semi-paramétrique, si toutes les courbes se ressemblent Sergienko & Gamboa 2012
- Pour les sorties de type « grille »
 - Décomposition sur base orthogonale
 - Ondelettes Marrel et al. 2011, Karhunen-Loeve Ici !
- Le « Graal » : vrai cadre fonctionnel
 - Modèle linéaire fonctionnel pour les entrées Laurent & Fort 2012



GSA pour des sorties de type « grille »

■ Illustration

- Géologie et pétrophysique fixées, 3 facies (sand 1, sand 2, clay)
- Paramètres incertains dans le modèle pétro-élastique (12)

Bulk drained modulus

Shear drained modulus

Bulk undrained modulus

Grain density

© 2010 - IFP Energies nouvelles, Rue de la Fontaine, France

Gassmann

$$K(t) = K_M(t) + \frac{\left[1 - \frac{K_M(t)}{K_{Gr}}\right]^2}{\frac{\phi}{K_F(t)} + \frac{1-\phi}{K_{Gr}} - \frac{K_M(t)}{K_{Gr}^2}}$$

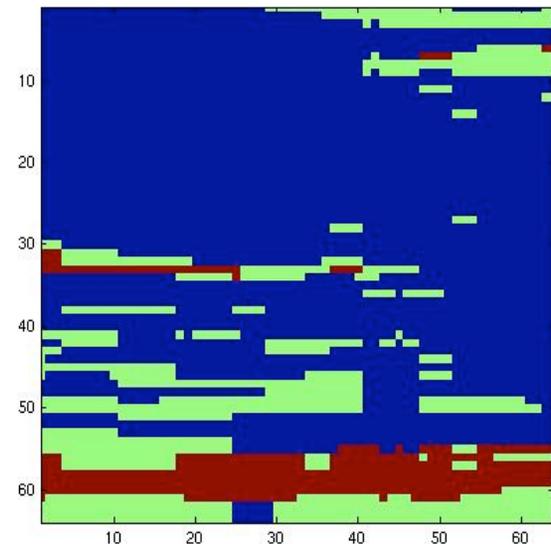
$$\mu(t) = \mu_M(t)$$

Density

$$\rho_B(t) = (1 - \phi)\rho_{Gr} + \phi\rho_F(t)$$

Velocity

$$V_P(t) = \sqrt{\frac{K(t) + \frac{4}{3}\mu(t)}{\rho_B(t)}}$$

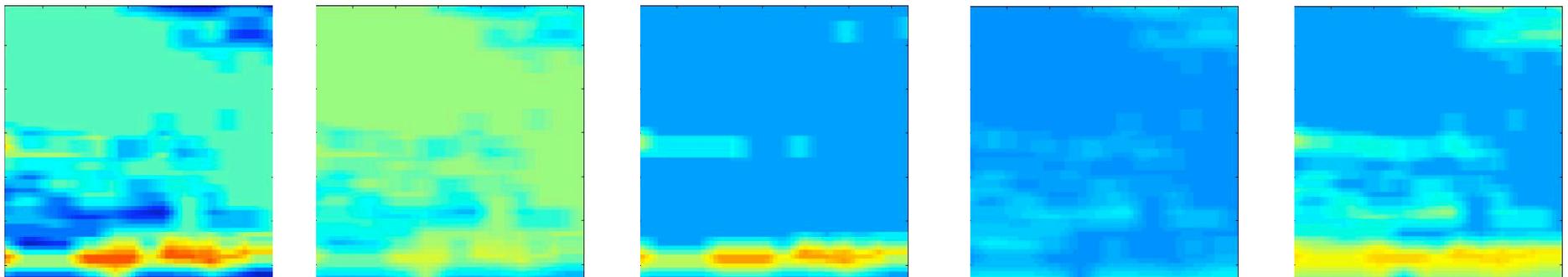




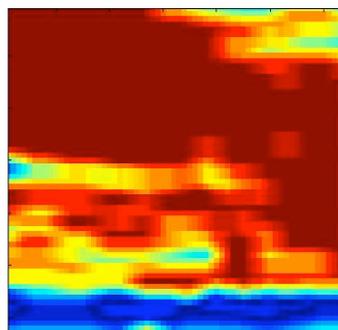
GSA pour des sorties de type « grille »

■ Etape 1 : ACP

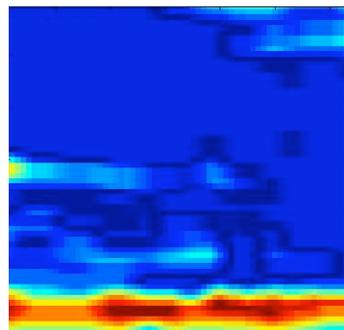
- Echantillonnage des paramètres incertains et simulation des cubes sismiques associés



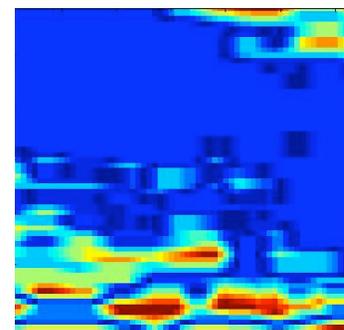
- ACP sur l'échantillon des cubes, sélection des composantes



63%



20%



15%

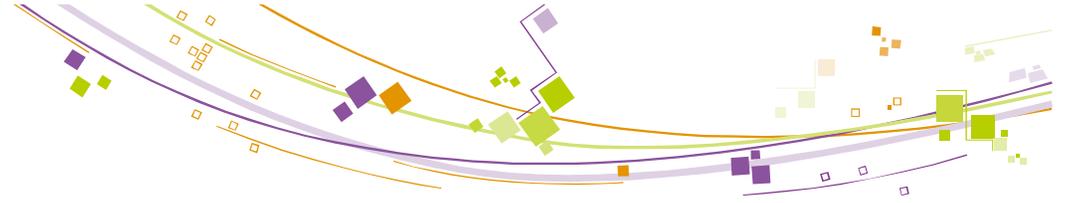
Total: 98%



GSA pour des sorties de type « grille »

- **Etape 2 : Modèle nonparamétrique de chaque coefficient**
 - Dans notre pratique, 10 – 20 composantes sont suffisantes pour expliquer 90 – 95 % de la variance totale
 - Réduction importante du temps de calcul

- **Etape 3 : GSA**
 - Ici, RBD-FAST



GSA pour des sorties de type « grille »

- Application : cas Hangingstone
 - cas synthétique mais très réaliste
 - inspiré d'un champ réel au Canada (utilisation des données réelles)
 - réservoir d'huile lourde produit par injection de vapeur



Le sable bitumineux d'Alberta (Canada) !



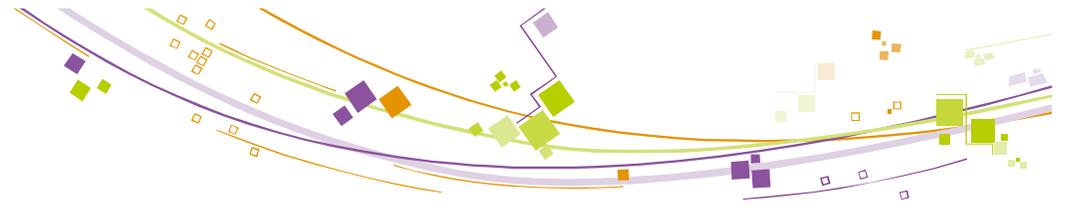
Hétérogénéités du sous-sol



Comment produire ce pétrole ?



Le pétrole ne s'écoule pas ...



Comment produire ce pétrole ?



Le pétrole ne s'écoule pas ...

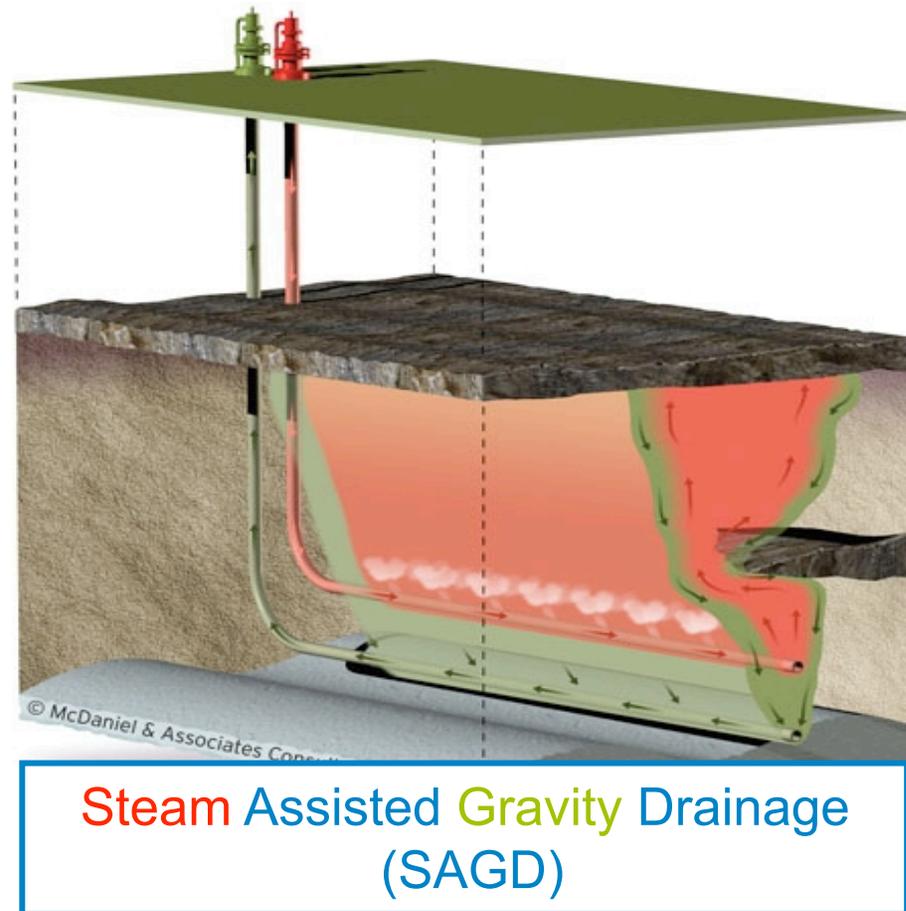
... mais en le chauffant oui !

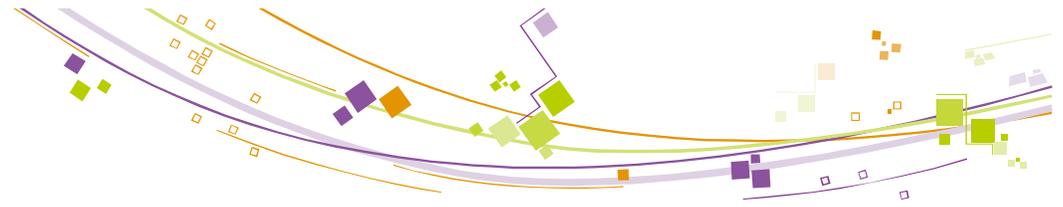


Comment produire ce pétrole ?



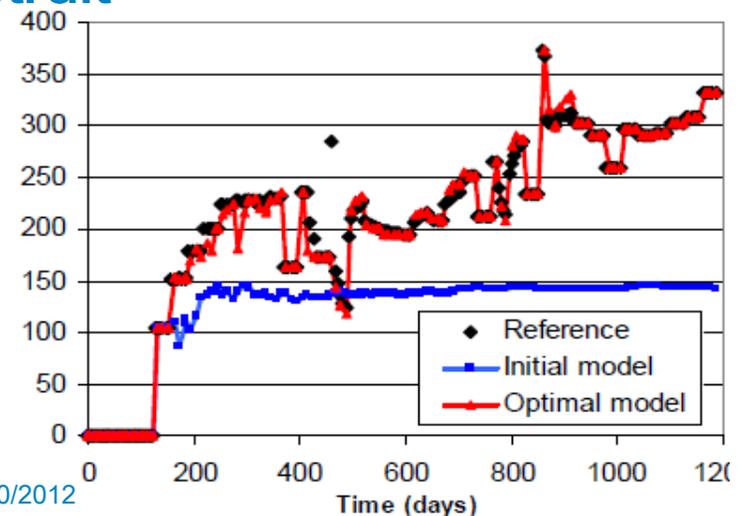
© 2010 - IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison, France





GSA pour des sorties de type « grille »

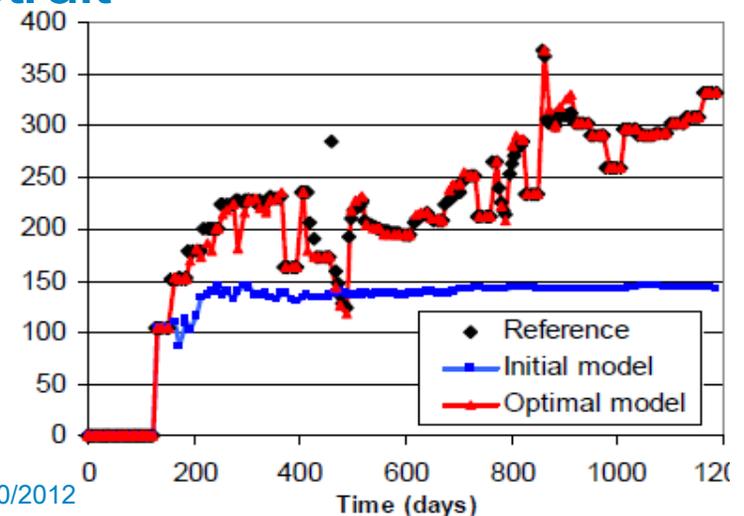
- Application : cas Hangingstone
 - cas synthétique mais très réaliste
 - inspiré d'un champ réel au Canada (utilisation des données réelles)
 - réservoir d'huile lourde produit par injection de vapeur
- Un modèle géologique a été construit
 - Il respecte la production mesurée aux puits ...





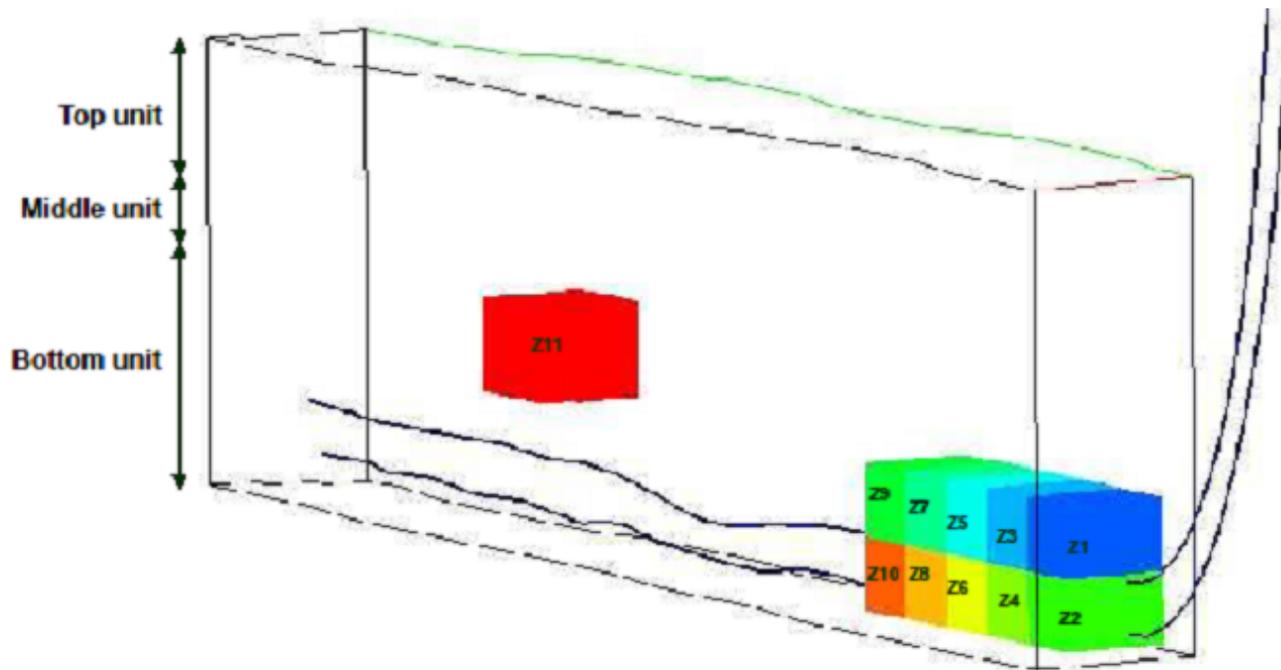
GSA pour des sorties de type « grille »

- **Application : cas Hangingstone**
 - cas synthétique mais très réaliste
 - inspiré d'un champ réel au Canada (utilisation des données réelles)
 - réservoir d'huile lourde produit par injection de vapeur
- **Un modèle géologique a été construit**
 - Il respecte la production mesurée aux puits ...
 - Mais pas les données de sismique répétée !





GSA pour des sorties de type « grille »



La position des hétérogénéités dans certaines zones est alors considérée comme incertaine : définition de 11 paramètres uniformes entre 0 et 1 pour faire varier les hétérogénéités



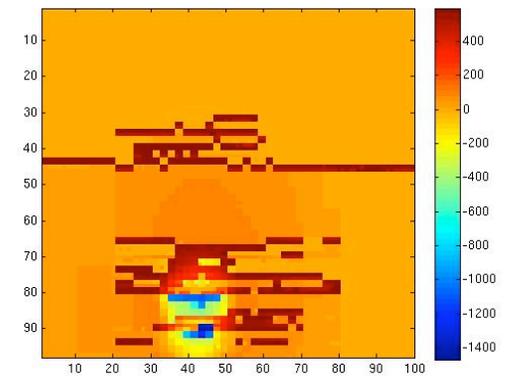
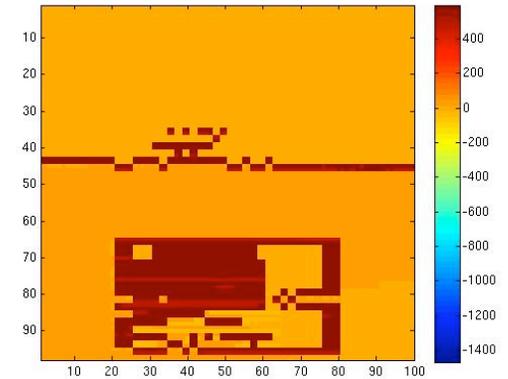
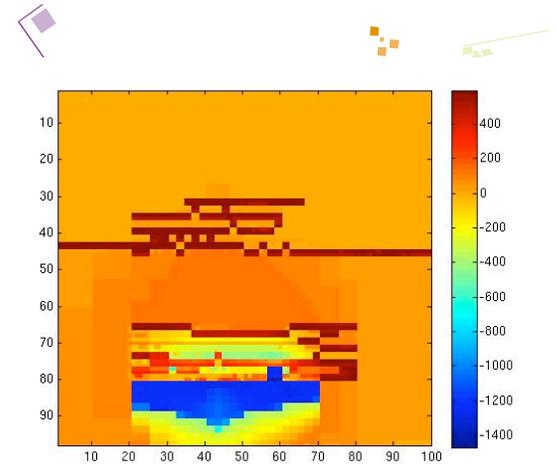
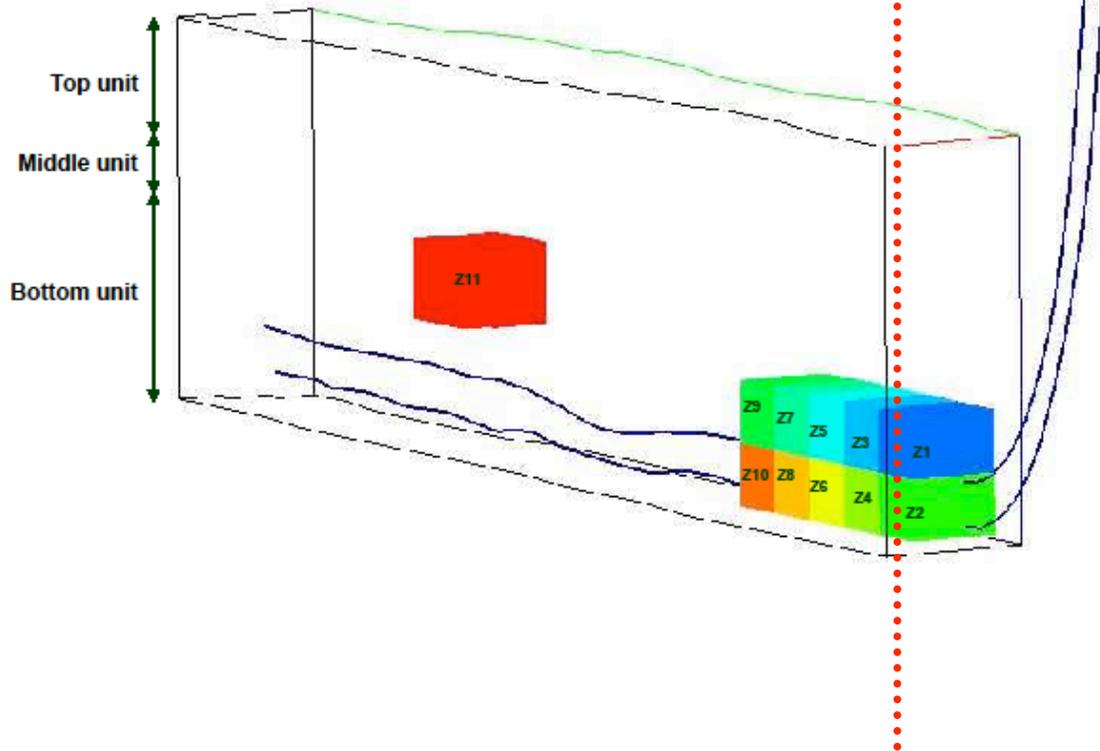
GSA pour des sorties de type « grille »

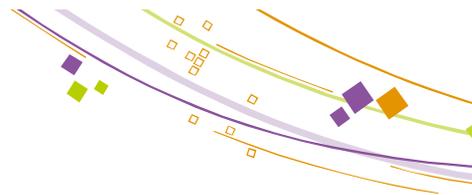
- Première étape : plan d'expériences
 - LHS maximin de taille 100
 - Explorons la variabilité obtenue sur la réponse sismique (variation d'impédances acoustiques entre l'état initial et 3 ans de production)



LHS

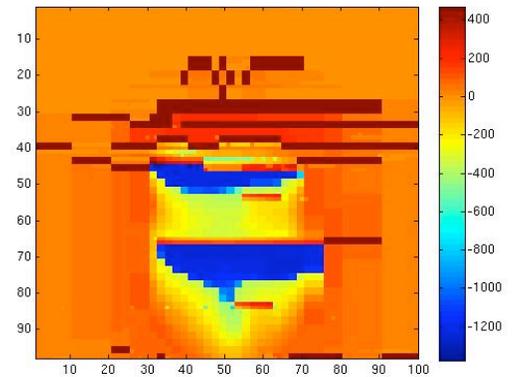
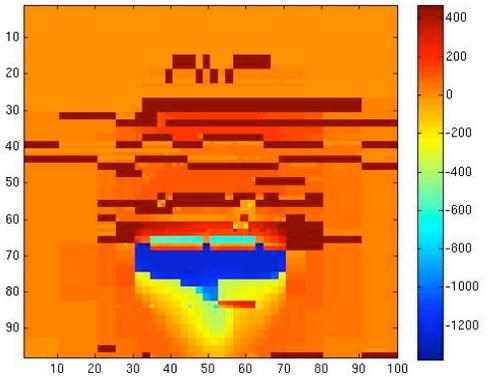
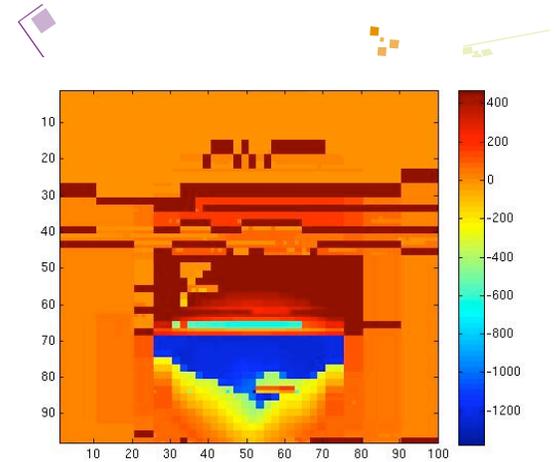
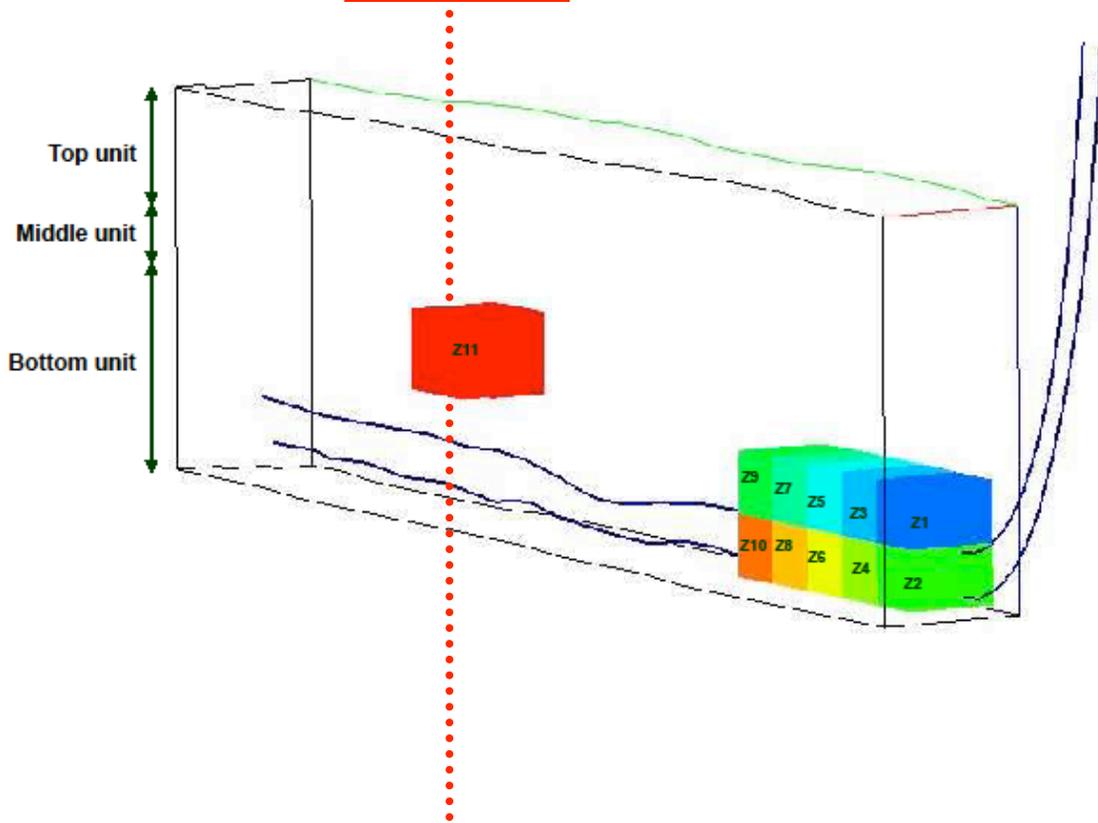
J = 2





LHS

J = 27

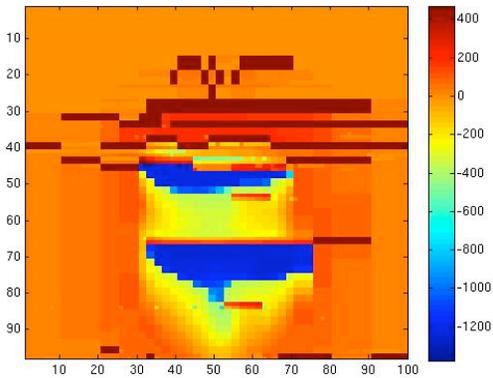
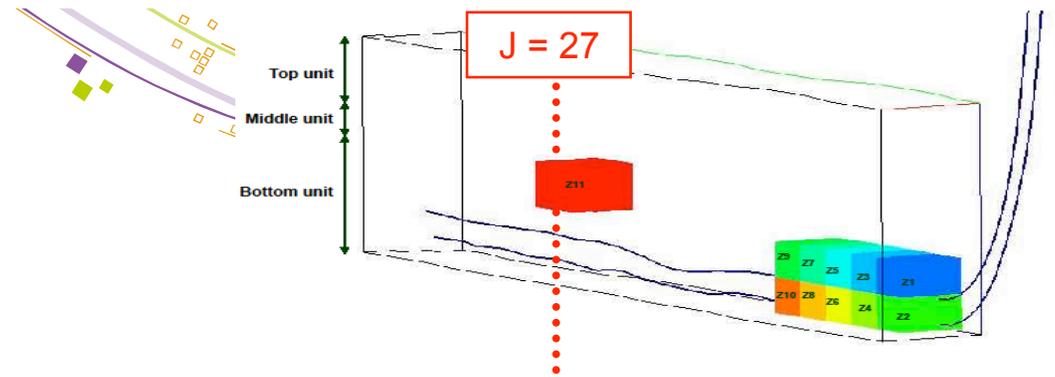




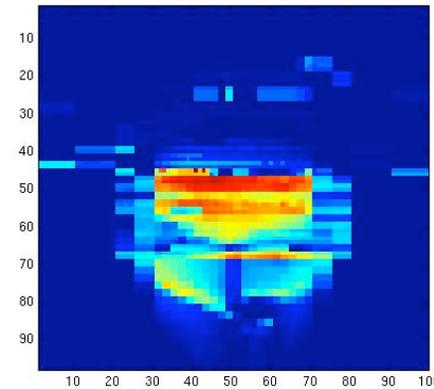
GSA pour des sorties de type « grille »

- Deuxième étape : ACP
 - Taille de la grille : 100 x 41 x 98
 - Algorithme NIPALS pour identifier les composantes principales de manière itérative
 - Les 40 première composantes sont retenues
 - Variance expliquée de 92%

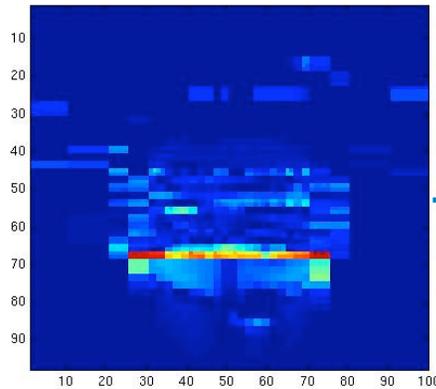
ACP



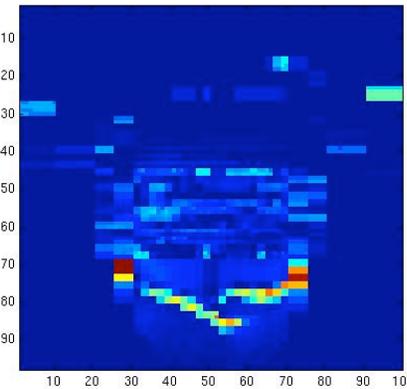
$$= m + f_1(\theta) \times$$



$$+ f_2(\theta) \times$$

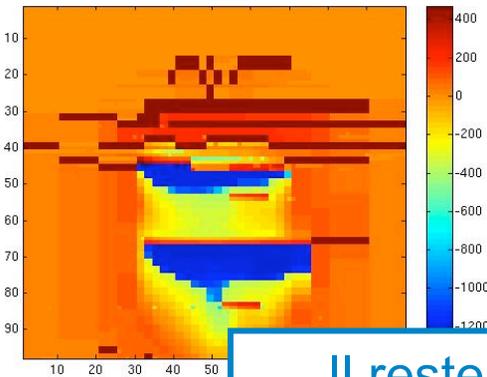
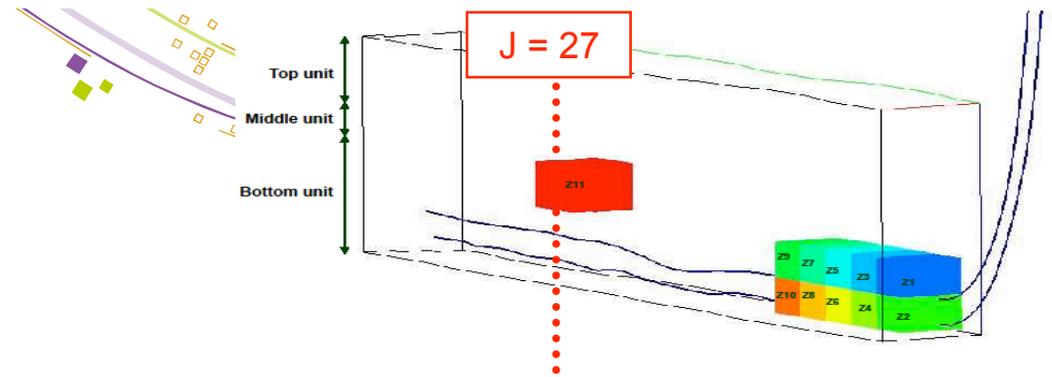


$$+ f_3(\theta) \times$$

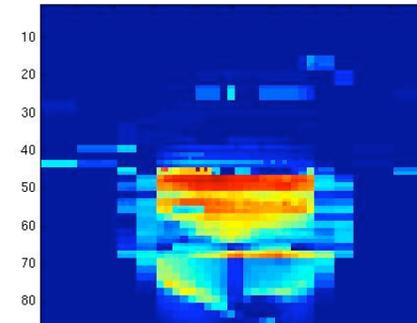


+ ...

ACP

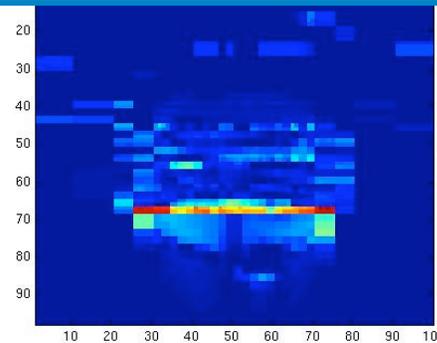


$$= m + f_1(\theta) \times$$

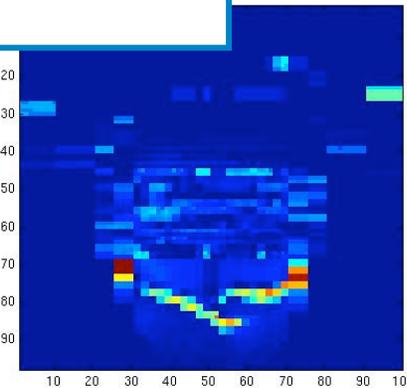


Il reste à construire les approximations des coefficients

$$+ f_2(\theta) \times$$



$$+ f_3(\theta) \times$$

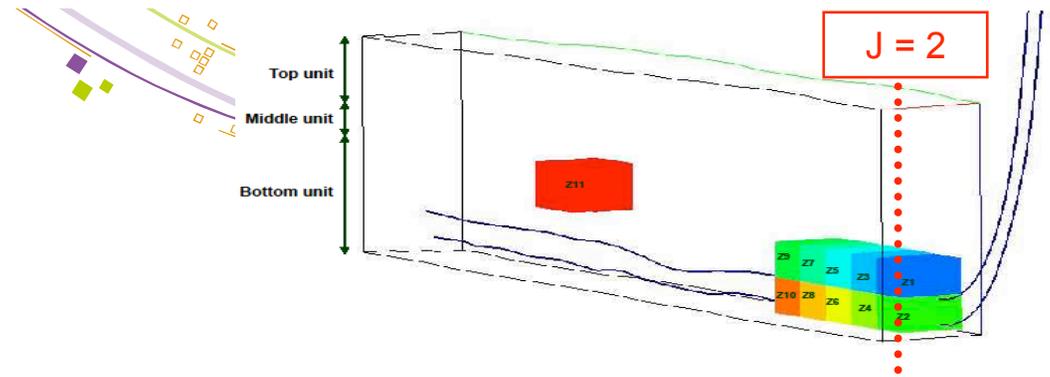


+ ...



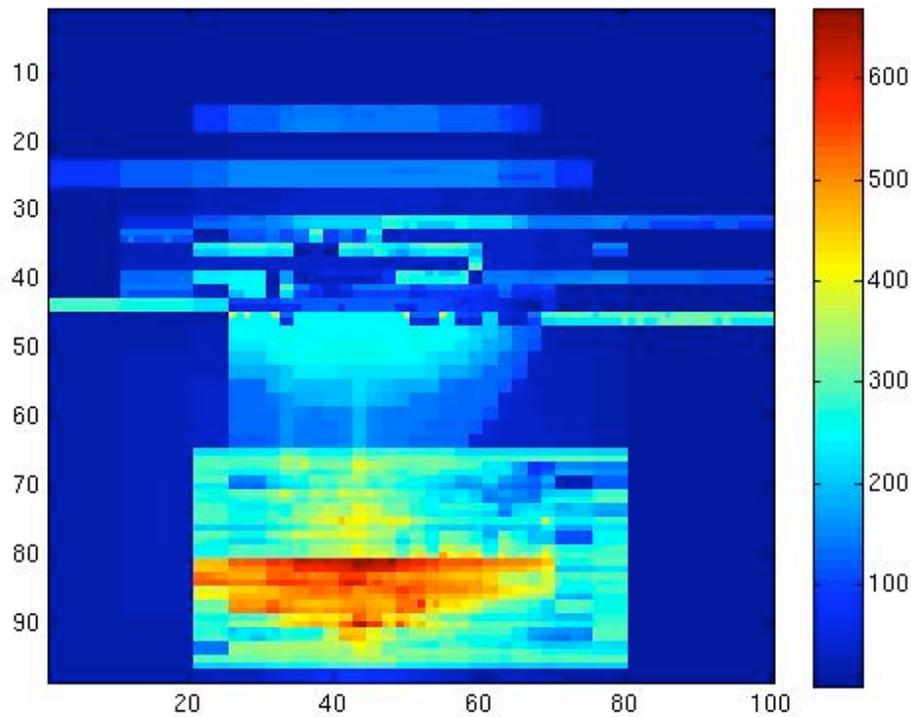
GSA pour des sorties de type « grille »

- Troisième étape : proxy pour les coefficients
 - Méthode : Gaussian Process modeling (GP)
 - Covariance Matérn 3/2
 - Moyenne constante
 - Identification des hyperparamètres par maximum de vraisemblance
 - Vérification qualité : Q2 par validation croisée

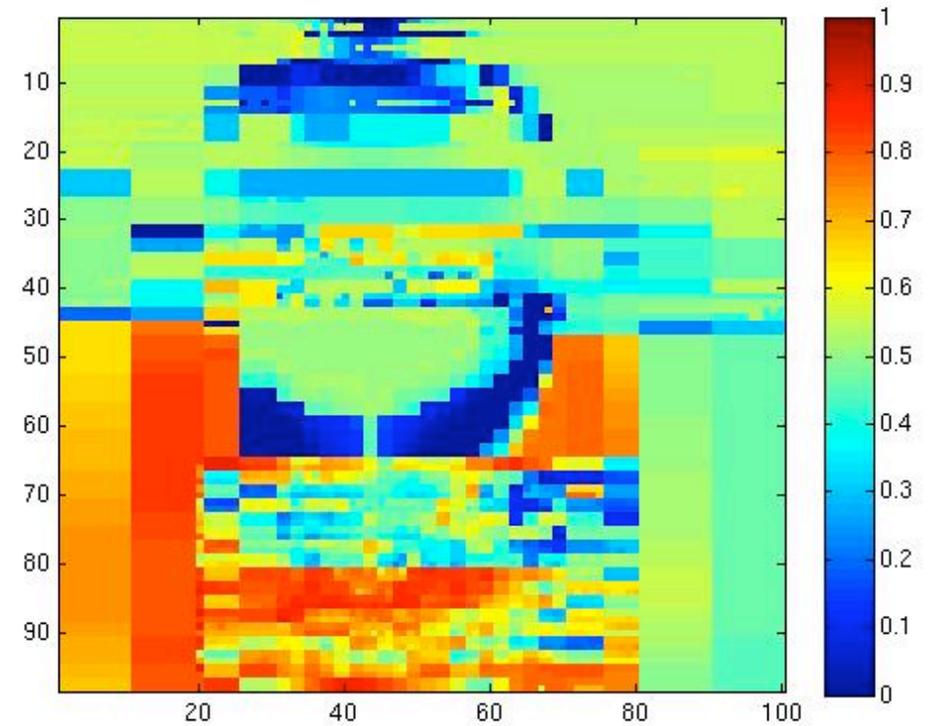


Validation

Ecart-type



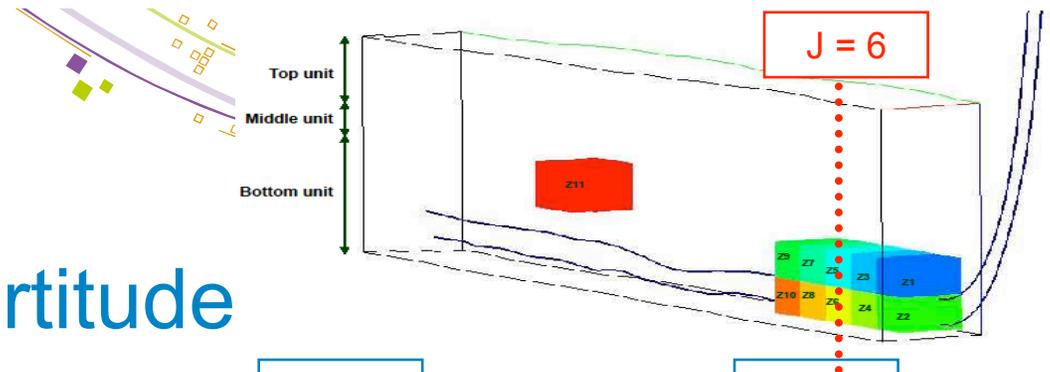
Q2 (validation croisée)



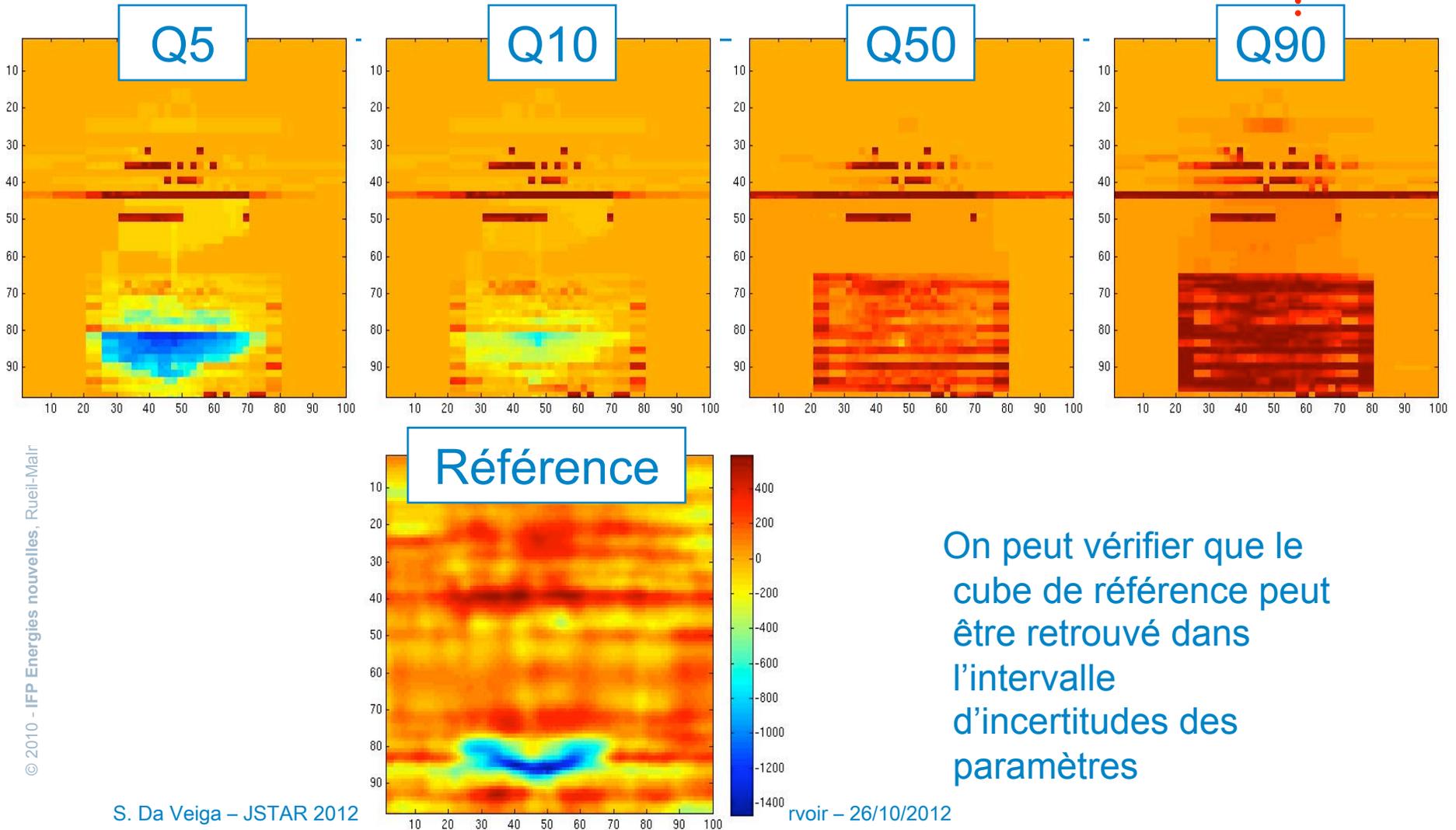


Propagation d'incertitudes

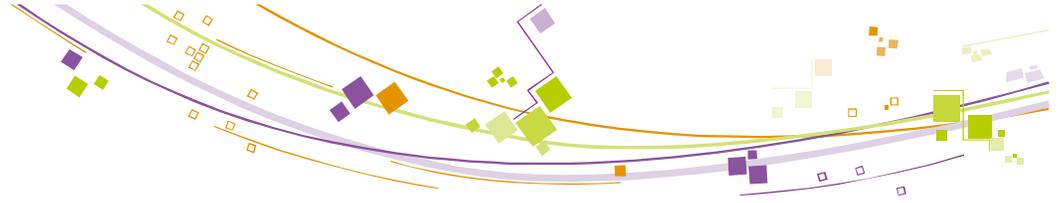
- Echantillonnage de la loi des paramètres
 - 1000 échantillons correspondant à des hétérogénéités différentes
- Calcul des coefficients prédits par GP pour chaque échantillon
- Reconstruction de la sortie à l'aide de la base ACP



Propagation d'incertitude

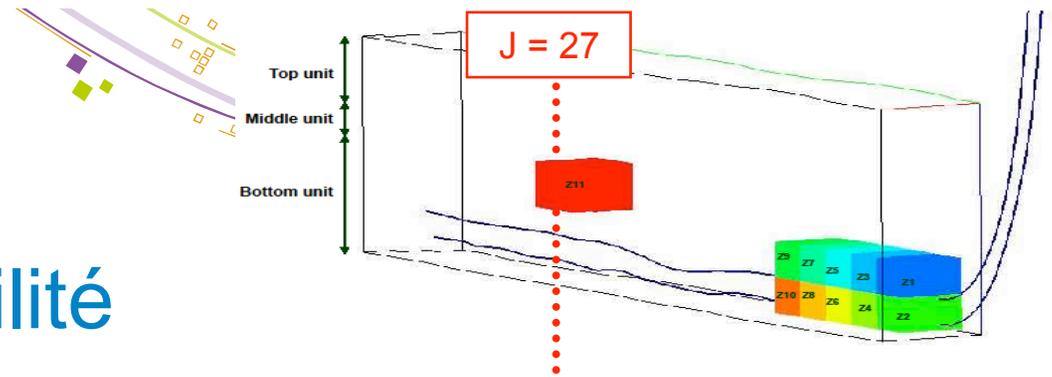


On peut vérifier que le cube de référence peut être retrouvé dans l'intervalle d'incertitudes des paramètres



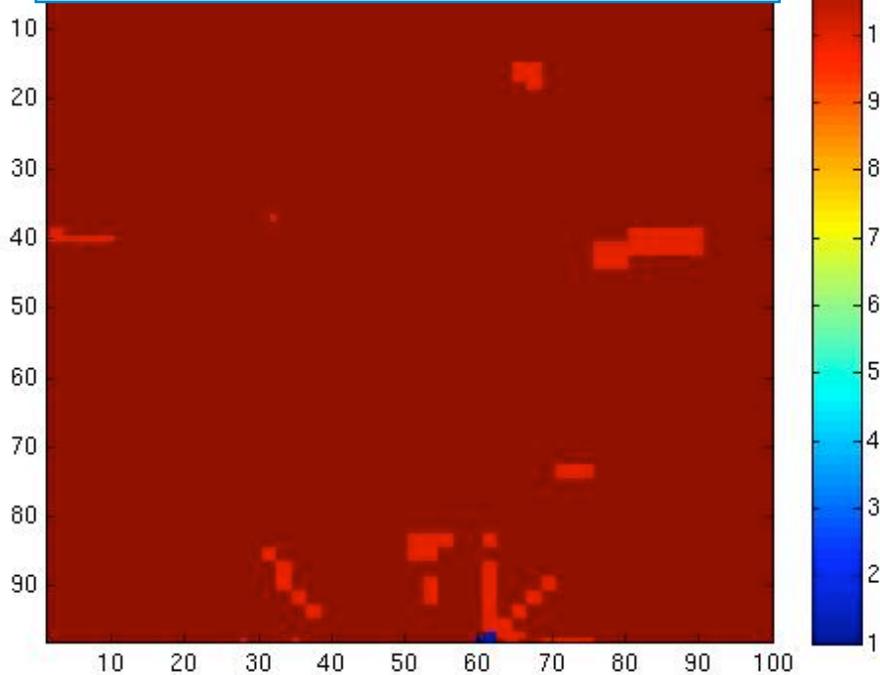
Analyse de sensibilité

- Calcul des indices de premier ordre et totaux
 - Méthode RBD-FAST
- Visualisation du paramètre le plus influent en chaque maille du modèle géologique

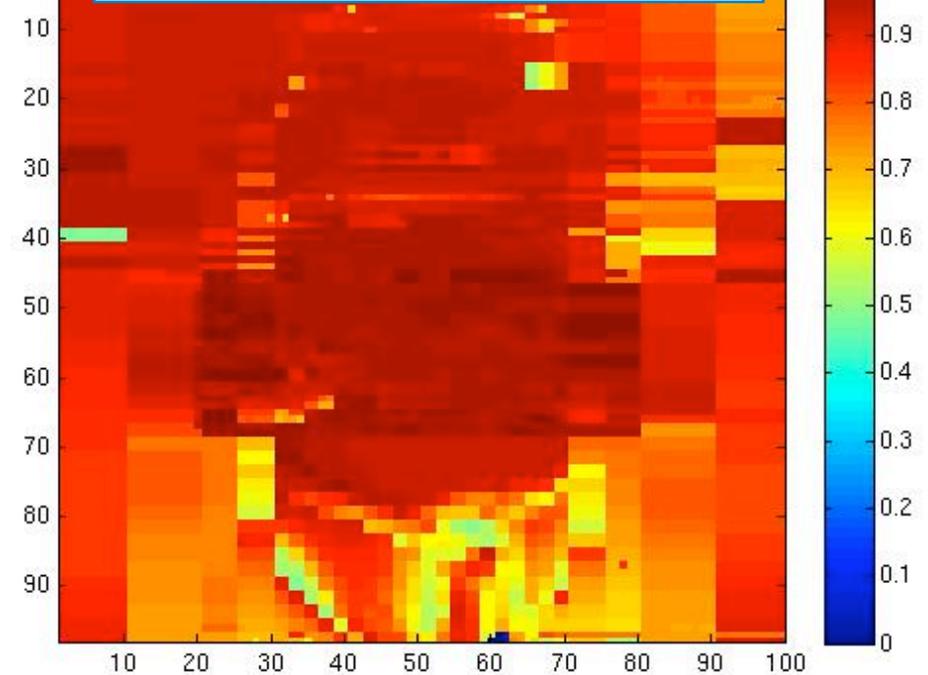


Analyse de sensibilité

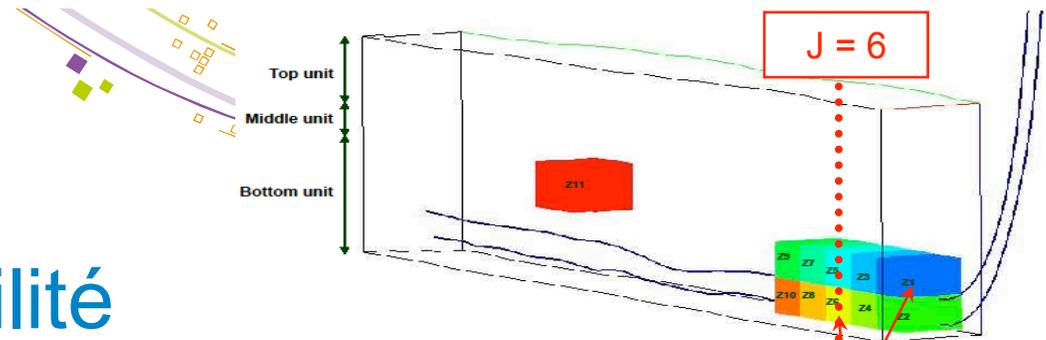
Indice total le plus grand



Valeur de l'indice total

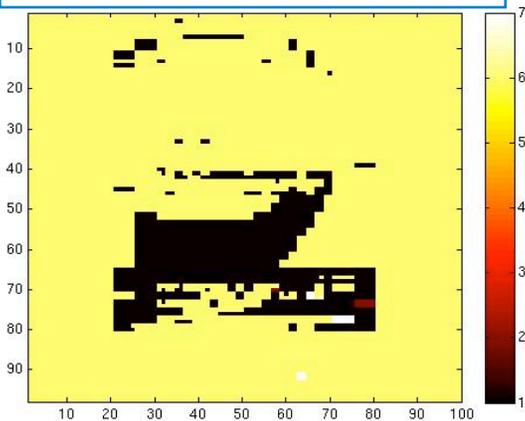


Dans cette zone, seul le paramètre 11 est influent

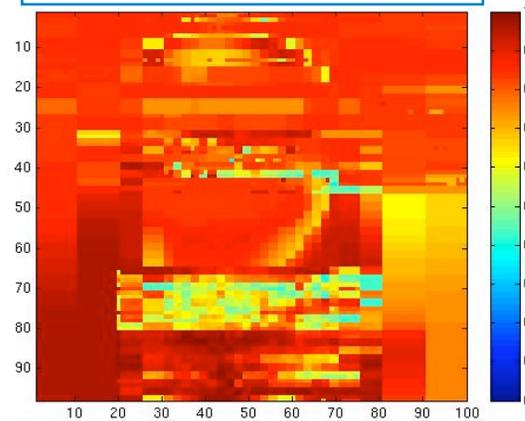


Analyse de sensibilité

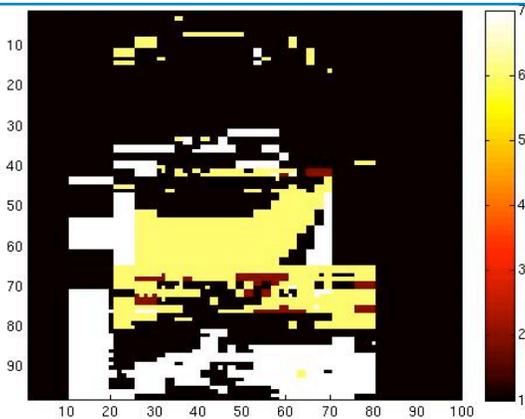
Indice total le plus grand



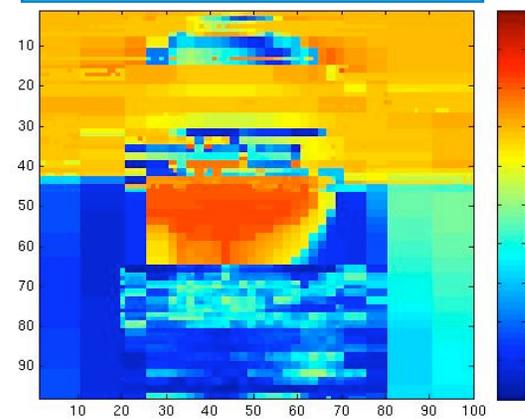
Valeur de l'indice total



2^{ème} indice total le plus grand



Valeur de l'indice total



Dans cette zone, le paramètre le plus influent est P1, puis P6



GSA pour des sorties de type « grille »

- Autre application sur dispersion de polluants (A. Marrel, CEA)

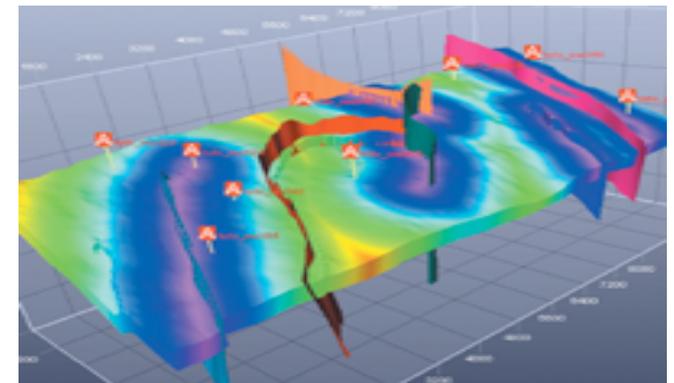
- Prochaine étape
 - Application sur des cubes de sismique répétée à plusieurs temps (sortie spatio-temporelle)
 - ACP non linéaire
 - ACP robuste Gervini 2008, ...



Pistes pour les entrées fonctionnelles

- En ingénierie de réservoir, beaucoup de travaux pour la paramétrisation du modèle géologique
 - ACP
 - Déformation graduelle, co-simulation
 - Points pilotes, blocs pilotes, proportions de faciès
 - ...

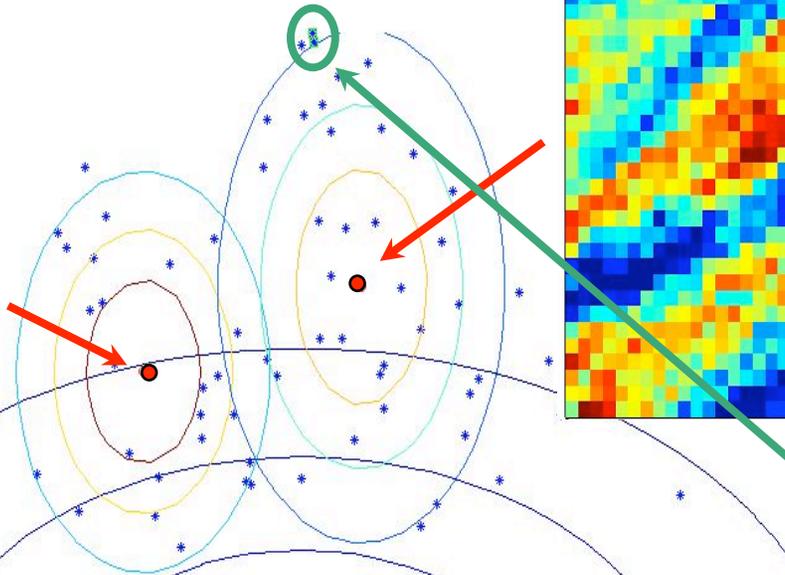
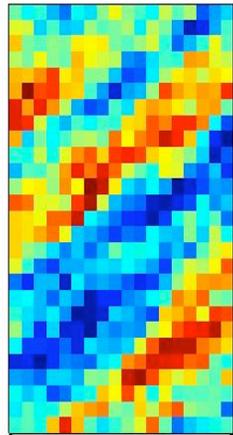
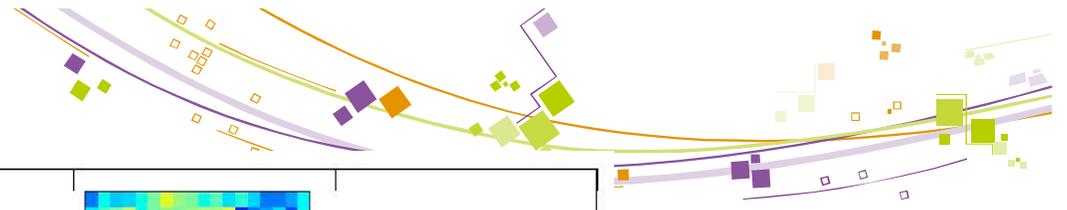
- Intérêt récent pour des méthodes prenant en compte directement le modèle
 - Echantillonnage (incertitudes)
 - Analyse de sensibilité



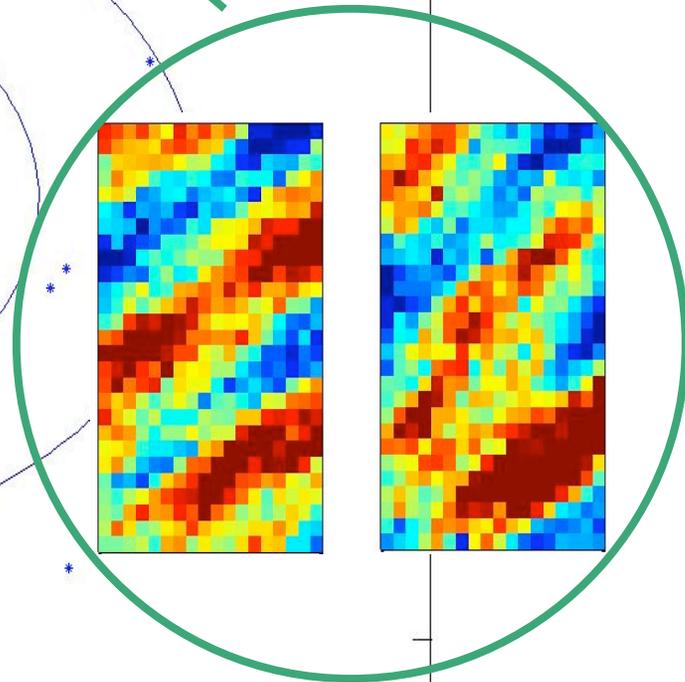
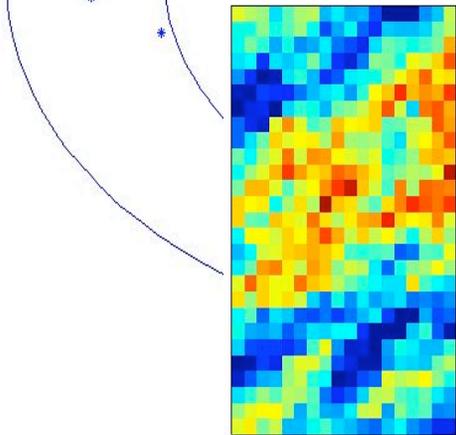


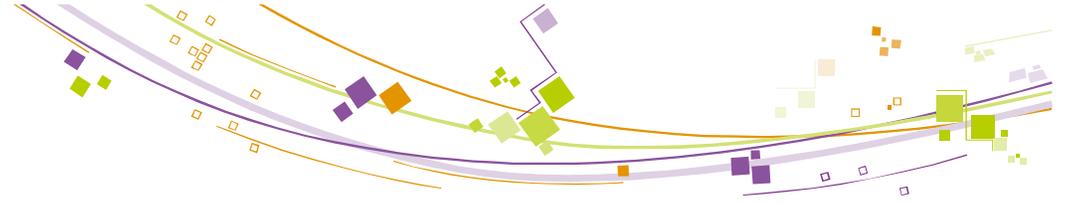
Pistes pour les entrées fonctionnelles

- Dans tous les cas, il est important de construire une distance entre les cartes ou les cubes pertinente
 - Normes L2 catastrophiques en pratique
 - Prise en compte de la « physique »
 - Distances basées sur les connectivités, sur les proximités entre objets géologiques identifiés dans les cubes Tillier et al. 2012
 - Distances déduites de simulations peu coûteuses
- Une fois la distance pertinente choisie
 - Echantillonnage : réduction de dimension par MDS Scheidt & Caers 2008
 - Régression par noyaux incluant la distance Ginsbourger et al. 2012



Classification +
Dissimilarités locales +
Multidimensional Scaling +
Identification mélange
Gaussiennes EM





Un point commun : la visualisation

- Les utilisateurs veulent visualiser de manière simple les résultats d'analyse d'incertitudes et de sensibilité
- **Développements en cours**
 - **Quantiles géométriques** Cardot et al. 2011, Chaouch et al. 2009, ...
 - **Visualisations (rainbow plots, bagplots)**



Conclusion

- **Merci de votre attention !**
 - Remarques, commentaires, critiques, ...

- **Ces travaux sont menés par plusieurs équipes, résultats bien centralisés en France et en Europe**
 - GDR Mascot-Num
 - ANR Costa Brava