

Utilisation des plans d'expériences pour la résolution du problème inverse : application à l'Exploration – Production pétrolière.

Bernard CORRE - Laurent CARRARO

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

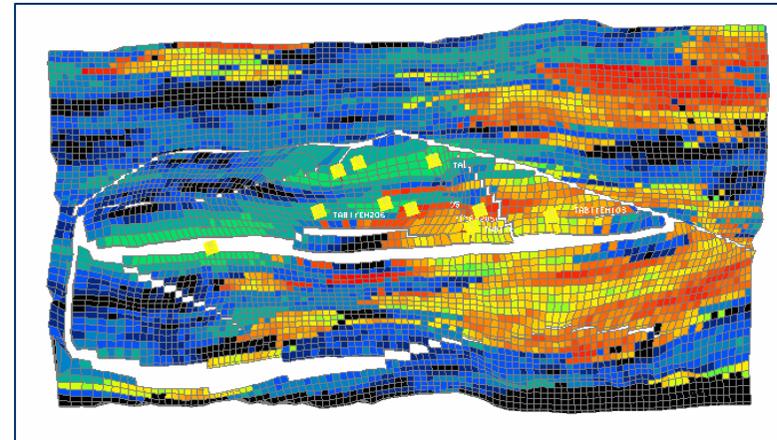
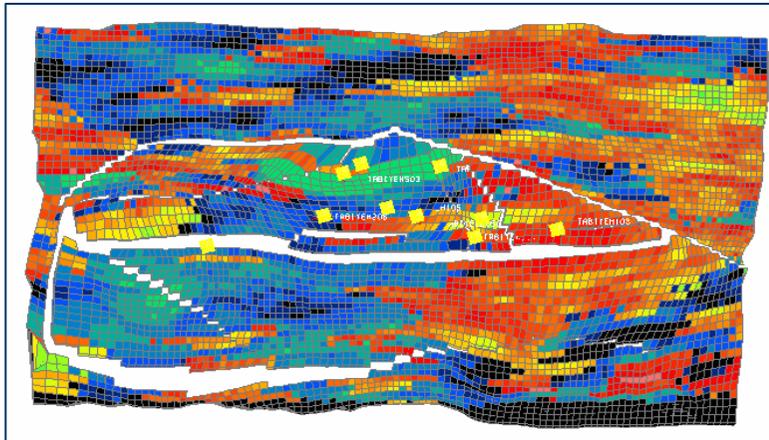
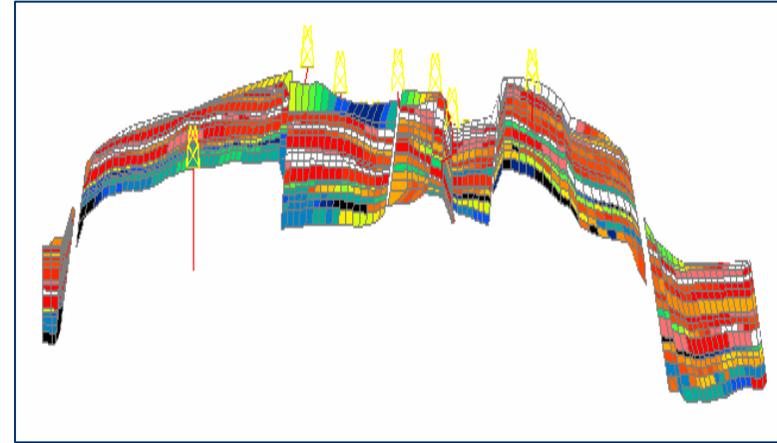
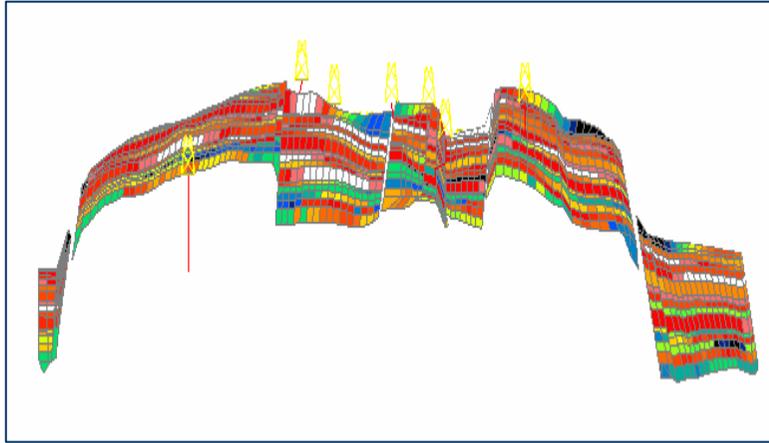
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Exploration Production pétrolière

- ❑ découvrir, évaluer et produire des réservoirs pétroliers.
- ❑ objets complexes, difficilement accessibles, mal connus.
- ❑ nécessité d'investir des sommes colossales.
- ❑ risques énormes.

Dès le début des années 90, la nécessité de développer une méthode de gestion des incertitudes subsurface est apparue comme une évidence.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

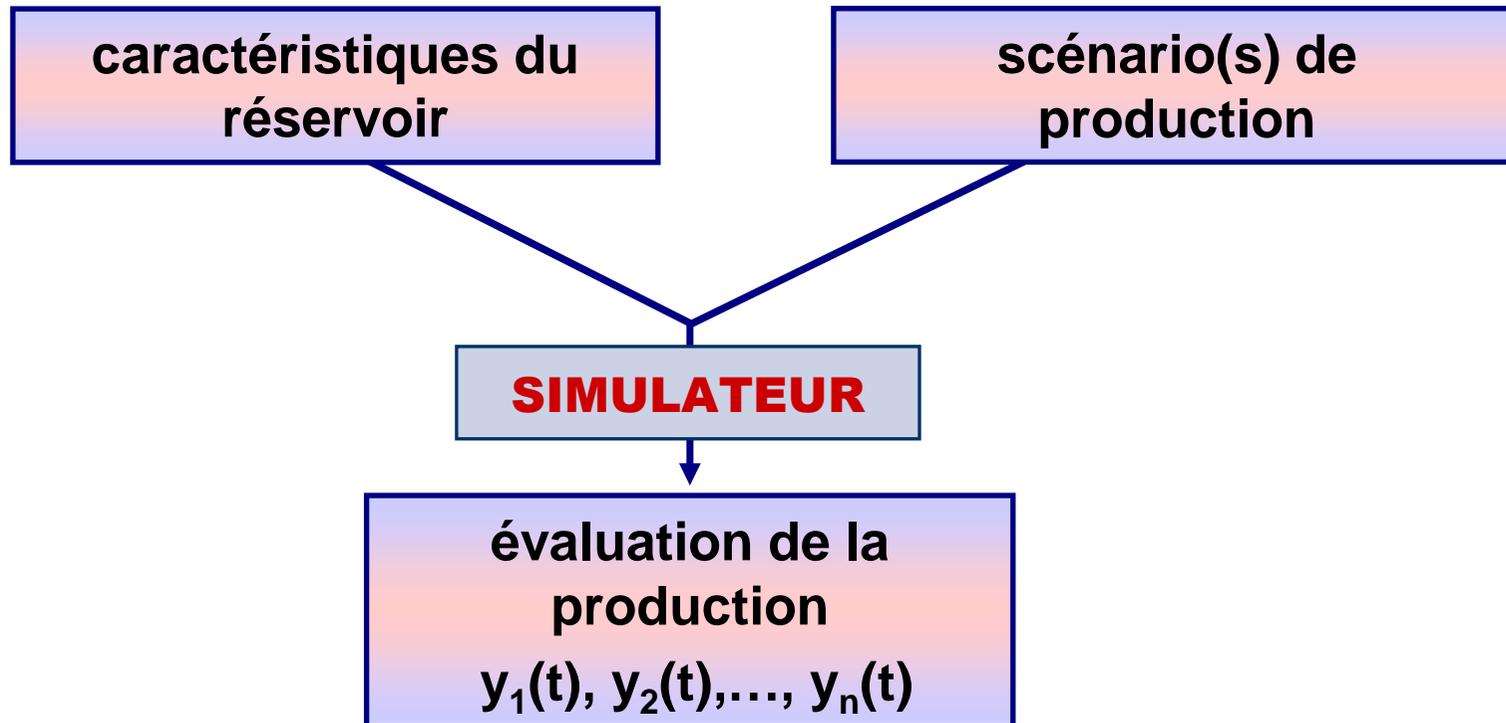
LES PROBLEMES A RESOUDRE

- Propagation des incertitudes
- Problème inverse (calage d'historique)
- Optimisation

LES ENJEUX ET OBJECTIFS

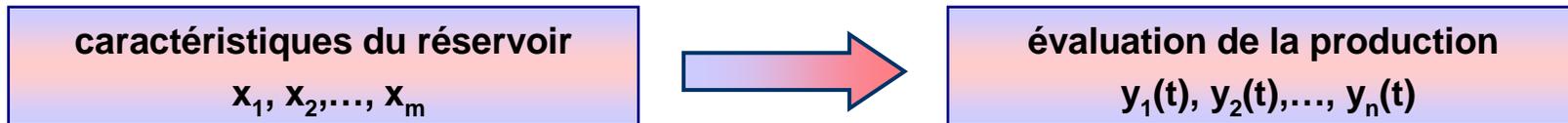
- Analyses de risques pour prise de décision
- Maximiser la rentabilité

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Les problèmes à résoudre...



- **En phase d'appréciation / développement**

Quel impact les incertitudes sur les caractéristiques du réservoir peuvent avoir sur l'évaluation de la production et des réserves?

C'est le problème de la **propagation des incertitudes**.

- **En phase de production**

Comment la connaissance de la production passée, avec ses erreurs de mesures, peut aider à mieux connaître les caractéristiques du réservoir et à affiner les prédictions de production?

C'est le problème de **l'inversion**.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

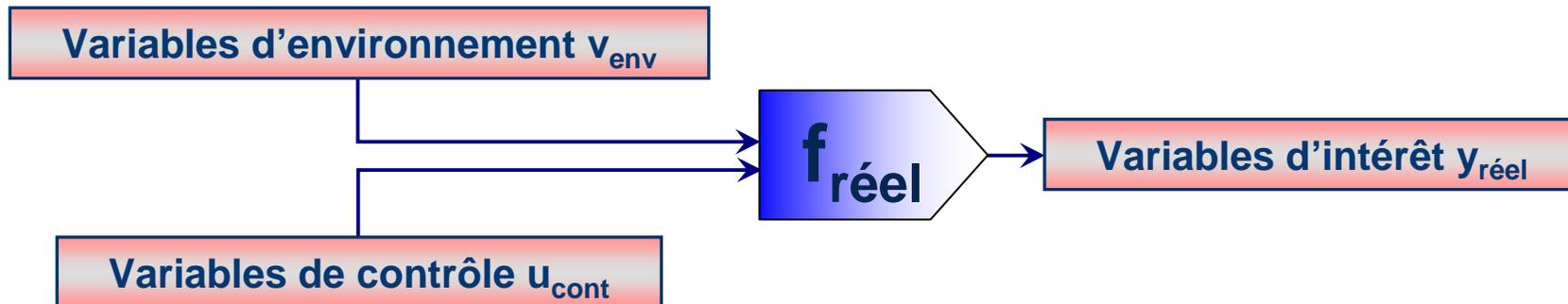
LE PHENOMENE REEL

Un phénomène peut se caractériser par :

- ❑ des **variables d'intérêt** regroupées dans un vecteur $y_{\text{réel}}$ qui, par analogie avec un contexte de régression, sera appelée *réponse*.
- ❑ des **variables d'environnement**, le plus souvent mal connues, regroupées dans une quantité v_{env} . La variable v_{env} est en général de grande dimension, voire de dimension infinie (champs définis dans un volume...).
- ❑ des **variables de contrôle** qui peuvent être fixées par l'utilisateur pour atteindre divers objectifs ; elles sont regroupées dans la quantité u_{cont} de dimension finie.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Ces variables sont liées selon le schéma suivant :



dont la traduction fonctionnelle est la suivante :

$$y_{réel} = f_{réel}(v_{env}, u_{cont})$$

Toutes les variables considérées à ce stade peuvent être discrètes ou continues, voire de type mixte.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR**
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

LE SIMULATEUR

La fonction $f_{\text{réel}}$ est approchée par un simulateur.

Une nouvelle classe de variables, les variables de simulation, apparaît pour :

- paramétrer le simulateur et/ou
- l'ajuster (« *tuning parameters* »).

Ainsi :

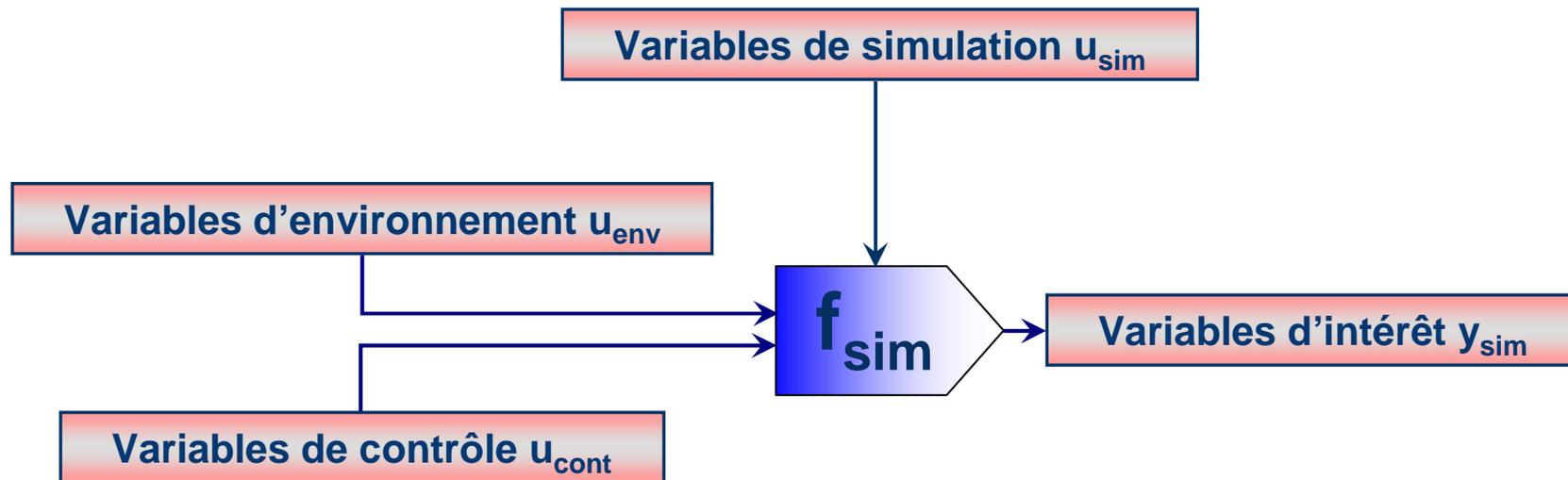
- y_{sim} est la **réponse** estimée par le simulateur.
- u_{env} est une **approximation des variables d'environnement** de v_{env} .

$$u_{\text{env}} = \varphi(v_{\text{env}})$$

- u_{cont} représente les **variables de contrôle**.
- u_{sim} est le vecteur des **variables de simulation**.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Le schéma de dépendance devient alors :

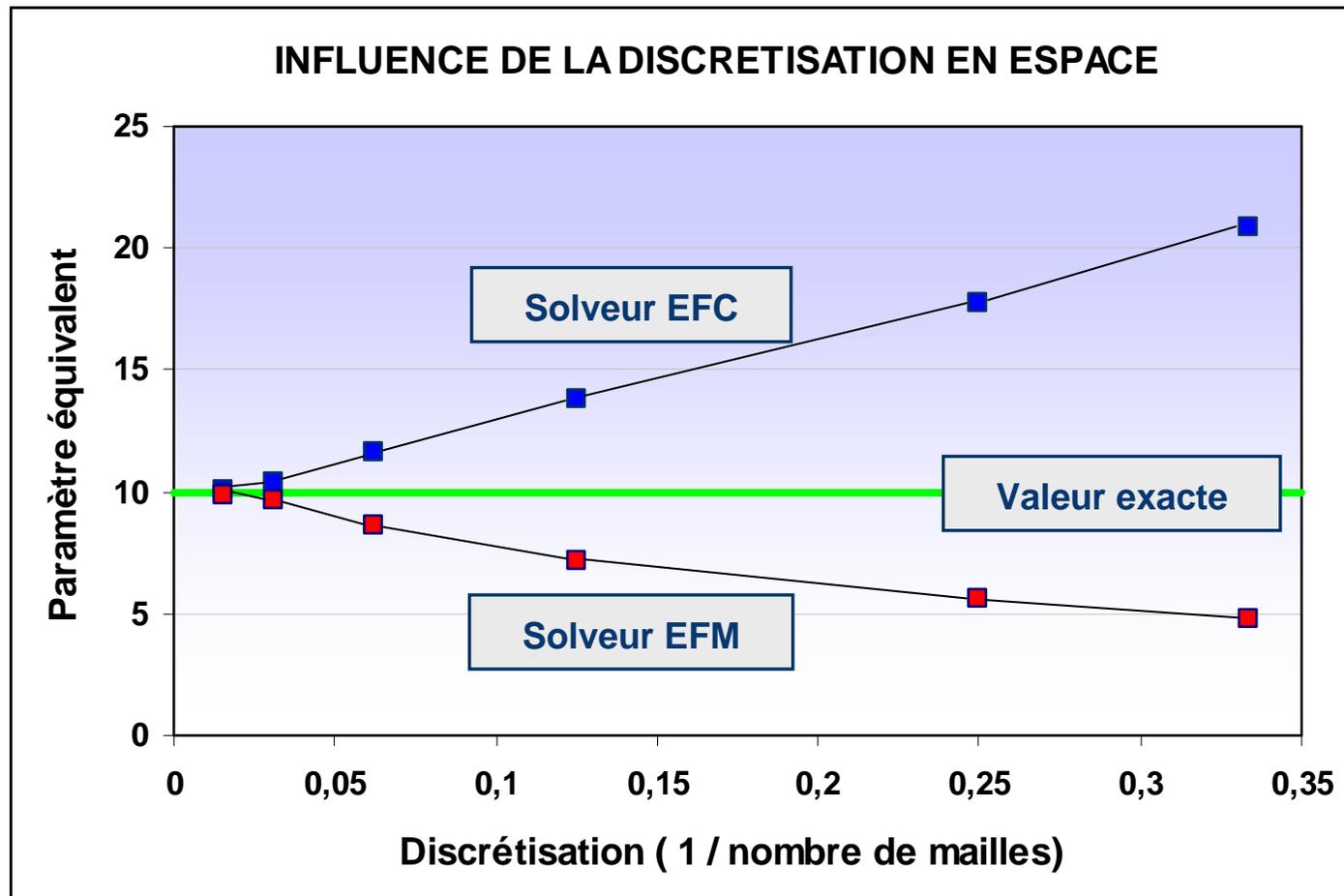


avec pour forme fonctionnelle :

$$y_{sim} = f_{sim}(u_{env}, u_{cont} / u_{sim})$$

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

EXEMPLES DE VARIABLES DE SIMULATION : DISCRETISATION EN ESPACE et SOLVEUR



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

REMARQUE IMPORTANTE

Les variables de simulation (discrétisation en espace, orientation de la grille, gestion de la discrétisation en temps, critères de convergence...) sont en général fixées avant toute simulation. Il convient de prendre conscience que la répétition d'une simulation, à variables de contrôle et d'environnement fixées, pour lesquelles on ferait varier les variables de simulation donnerait des résultats différents. Cette pratique se rapprocherait donc, dans la forme et le fond, d'une répétition expérimentale et générerait un bruit de nature numérique.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE**
 - **Problèmes directs**
 - **Problèmes inverses**

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

LES PROBLEMES À RESOUDRE

Ils sont globalement de deux types :

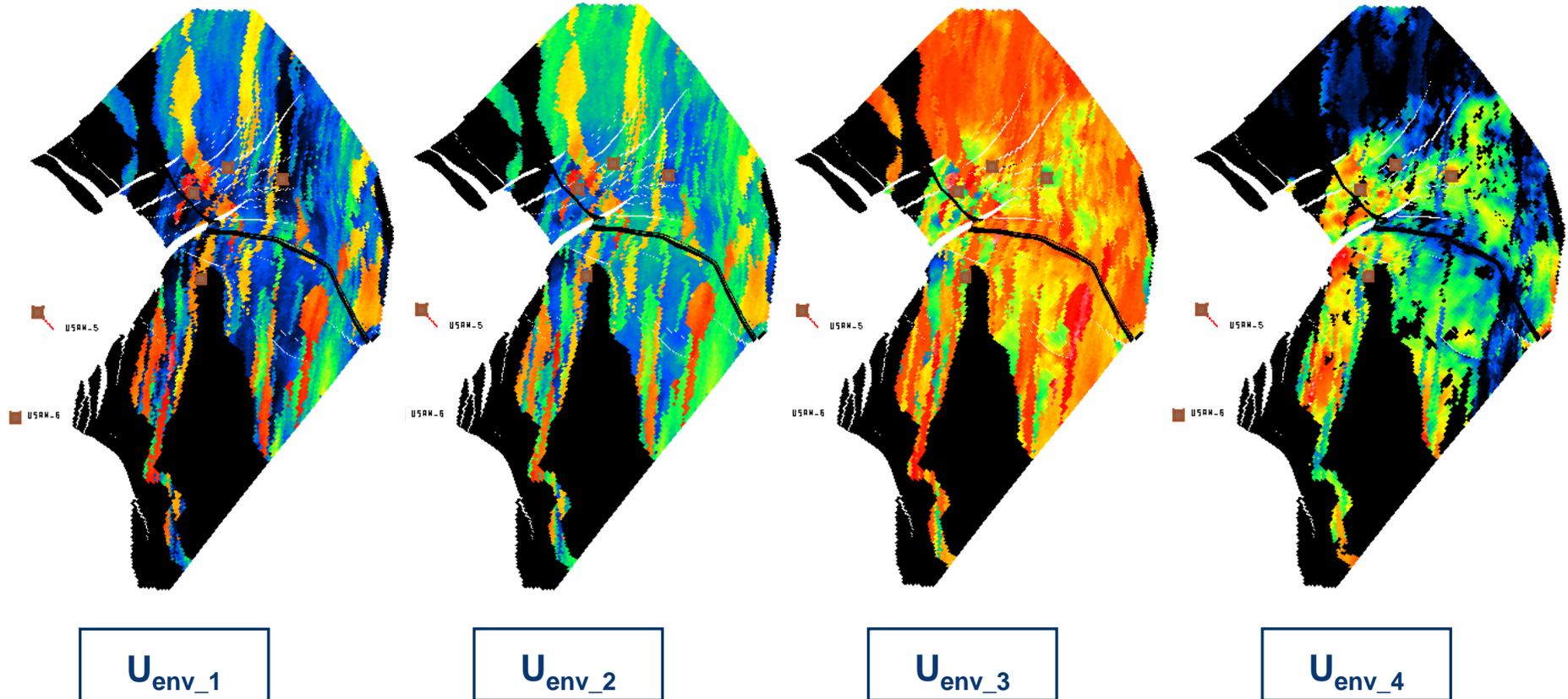
problèmes directs et problèmes inverses.

En remarques préalables :

- ❑ Le développement des techniques et l'accroissement des puissances de calcul ont mené au développement de simulateurs de plus en plus complexes qui réclament des temps de calcul souvent prohibitifs.
- ❑ Les variables d'entrée peuvent être de très grande dimension. La variable u_{env} peut ainsi dépasser facilement la dimension 10^6 , par exemple sur un maillage tridimensionnel de 200 x 200 x 25 mailles.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Variables d'environnement



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

LES PROBLEMES DIRECTS

Deux types de problèmes, parfois complémentaires et/ou séquentiels, se posent :

1. Analyse de sensibilité.

Quels sont les paramètres ou les combinaisons de paramètres, constitutifs de la variable u_{env} , influents pour la fonction f_{sim} ?

2. Propagation d'incertitudes.

Comment propager les incertitudes affectant la variable u_{env} sur la réponse y_{sim} ?

Difficultés à surmonter

- Dimension de la variable u_{env} . Il faut réduire drastiquement sa dimension.
- Coût de calcul. Seules quelques dizaines d'évaluation du simulateur sont permises.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

DEMARCHE

La démarche générale consiste à s'affranchir des deux difficultés précédentes :

1. Réduction de la dimension de u_{env}

Elle s'obtient en paramétrant le vecteur u_{env} . Cette paramétrisation peut être :

- déterministe, ce qui signifie que l'on écrit :

$$u_{env} = \psi(x_{env}) \quad \text{et} \quad \dim(x_{env}) \ll \dim(u_{env})$$

- Stochastique. On modélise certains champs constituant u_{env} par des processus aléatoires. Ce qui donne une relation plus complète, du type :

$$u_{env} = \psi(x_{env}, \omega) \quad \text{et} \quad \dim(x_{env}) \ll \dim(u_{env})$$

et ω est un aléa.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

2. Approximation du simulateur

L'idée est ici de remplacer le simulateur f_{sim} par une ou plusieurs fonctions plus simples, notée f_{app} . La fonction approchée, **la surface de réponse**, est construite sous une forme paramétrique plus ou moins complexe.

La réponse y_{app} donnée par la fonction f_{app} sera liée aux variables d'environnement x_{env} , de contrôle u_{cont} et d'approximation u_{app} par :

$$y_{app} = f_{app}(x_{env}, u_{cont} / u_{app})$$

3. Plan d'expériences

Pour construire la fonction approchée f_{app} , le simulateur est évalué sur un jeu de variables d'environnement, qui est le **plan d'expériences numériques**.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

LES PROBLEMES INVERSES

Les problèmes posés se ramènent tous peu ou prou à un problème d'optimisation. Néanmoins, nous distinguerons les cas suivants :

1. Calage de paramètres / d'historique

Les variables de contrôle sont fixées et le phénomène réel est observé. Comment ajuster les paramètres d'environnement et/ou de simulation pour reproduire les observations ?

2. Optimisation des variables de contrôle

Les variables de modélisation et d'environnement sont fixées et un ou plusieurs critères à maximiser introduits. Quel niveau des variables de contrôle u_{cont} maximise les critères ?

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Le problème du **calage des paramètres** peut se poser dans trois configurations assez différentes pour être ici explicitées.

1. Ajustement du simulateur.
2. Construction d'une approximation.
3. Calage d'un historique pour une meilleure prédiction du futur.

Décrivons ce dernier problème. La réponse est divisée en deux parties :

$$y_{réel} = (y_{réel}^-, y_{réel}^+)$$

$y_{réel}^-$ a été observé. Nous voulons utiliser cette information pour réestimer u_{env} , et donc mettre à jour les prévisions y_{sim}^+ . On définit alors un écart :

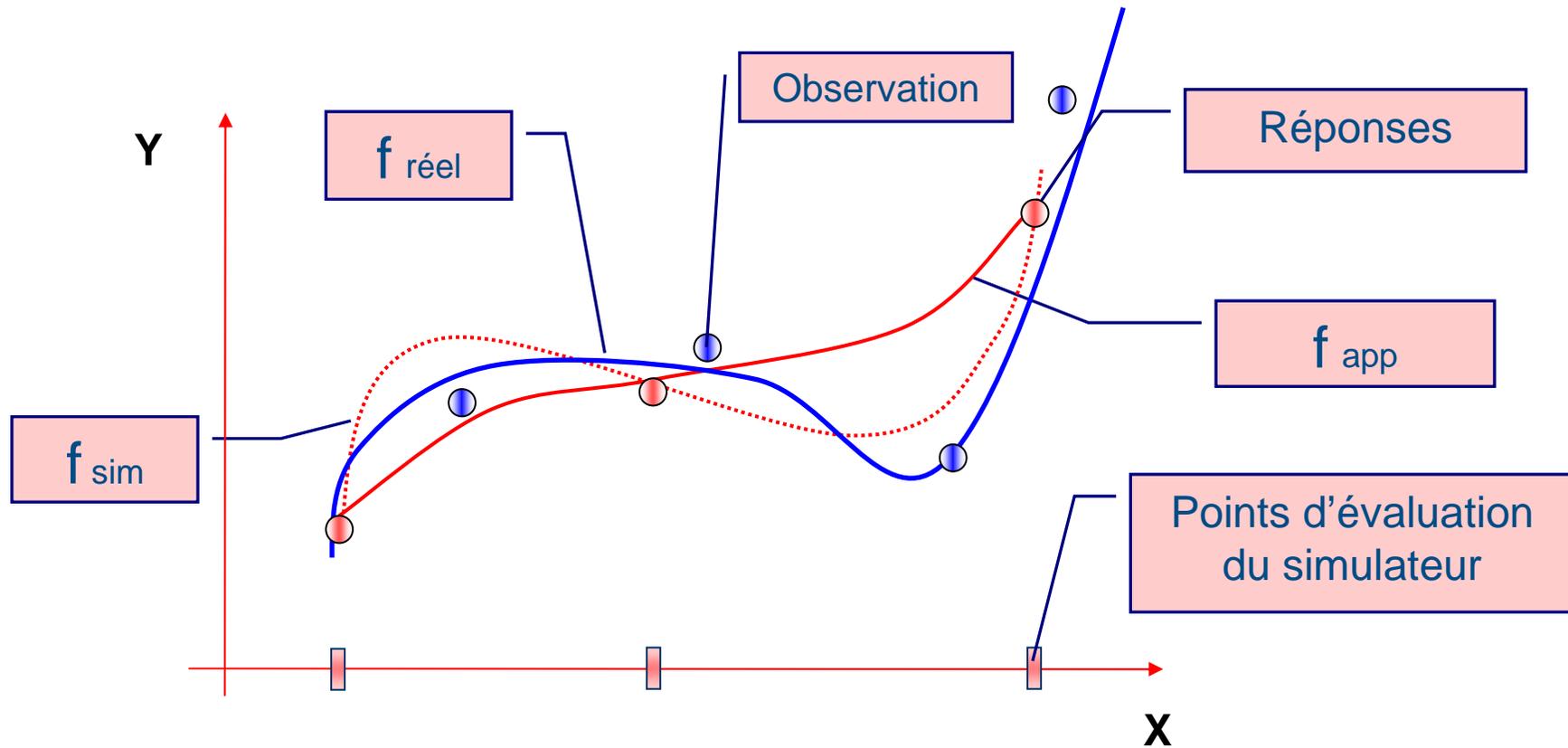
$$C_{écart}(u_{env}) = L(y_{obs}^-, f_{sim}^-(u_{env}, u_{cont} / u_{sim}))$$

Et le problème consiste ici à déterminer u_{env}^* qui minimise la fonction $C_{écart}$.

Remarque : $y_{obs}^- = y_{réel}^- + \varepsilon$

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

EN RESUME, SUR QUOI TRAVAILLONS-NOUS ?



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES**
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

GEOPHYSIQUE

- Acquisition & processing
- Interpretation:
 - Migration.
 - Picking.
 - Time-to-depth.
 - Seismic-to-well tie
 - ...
- Loi de vitesse
- ...

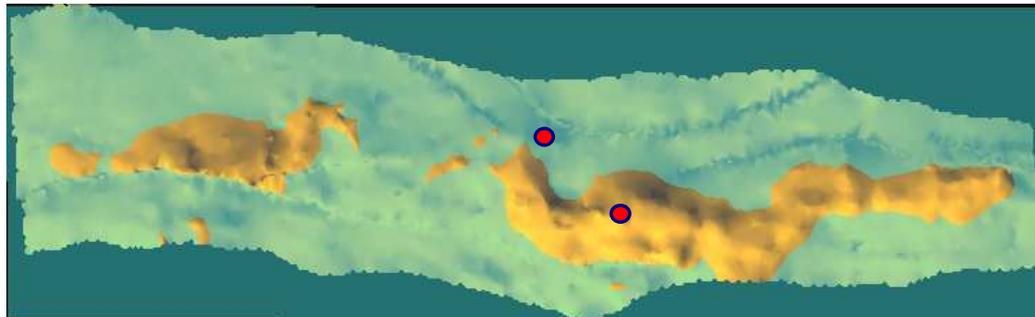
GEOLOGIE

- Concept sédimentaire
- Schéma géologique
- Propriétés des roches
 - hétérogénéité
 - Variabilité spatiale
 - extension et orientation des corps sédimentaires.
 - Propriétés pétrophysiques: k, phi, NTG
 - contacts
 - etc.
- ...

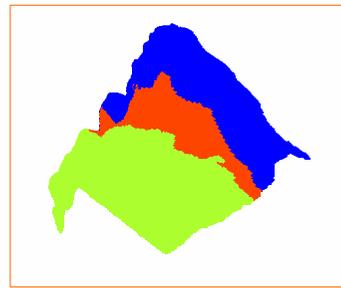
RESERVOIR

- Transmissivité des failles
- Extension des barrières
- Perméabilité absolue
- Perméabilité relative
- Kv/Kh.
- Viscosité, PVT.
- Index des puits.
- ...

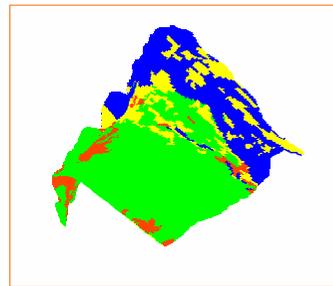
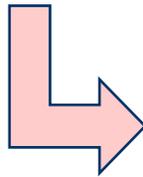
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



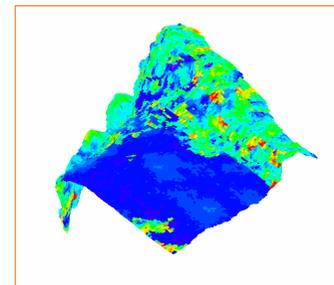
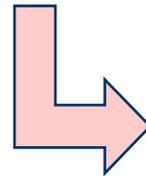
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



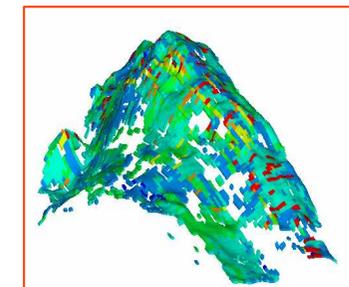
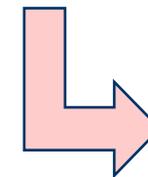
Environnements



Facies



Paramètres
pétrophysiques



Diagenèse

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

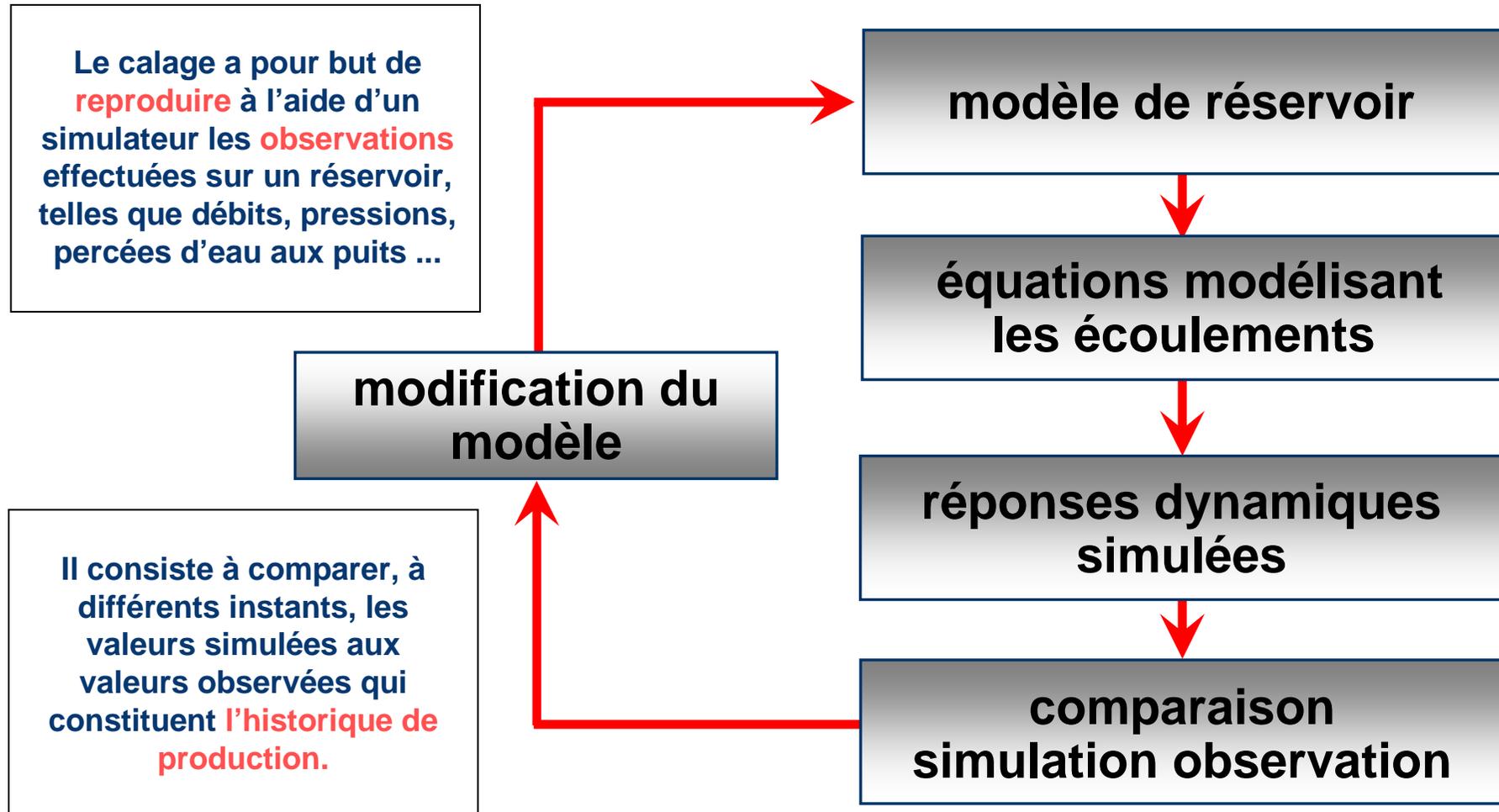
- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE**
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

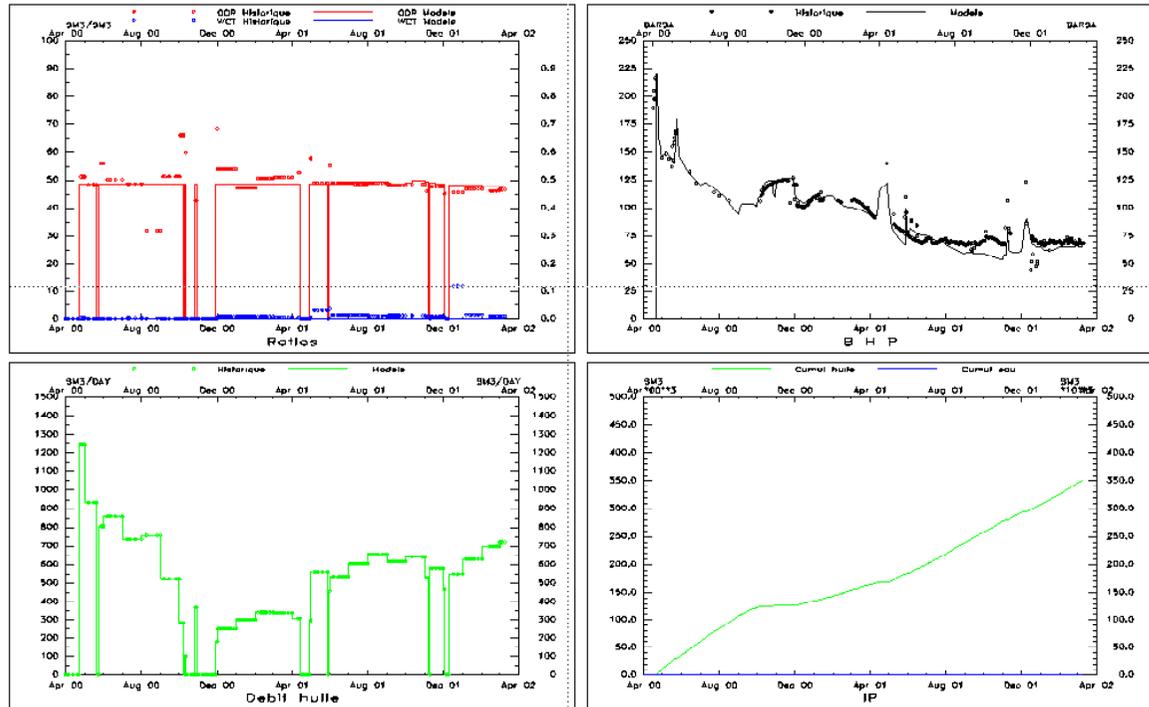


RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Historique de production

- débit d'huile
- pression en fond ou en tête de puits
- pourcentage d'eau dans la production
- ratio gaz / huile

à différents temps et en chaque puits du gisement.



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

QUELQUES DIFFICULTES ...

1. Dans le processus EP, les paramètres à gérer ne sont pas uniquement scalaires mais également fonctionnels. Ce sont :
 - des courbes (perméabilités relatives ...)
 - des objets 2D (cartes au toit, horizons sismiques ...)
 - des champs tridimensionnels (champs de porosité, perméabilité ...)
2. Nombre de réponses à restituer : de quelques centaines à quelques milliers...
3. Nombre de paramètres potentiels à gérer : plusieurs dizaines...

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

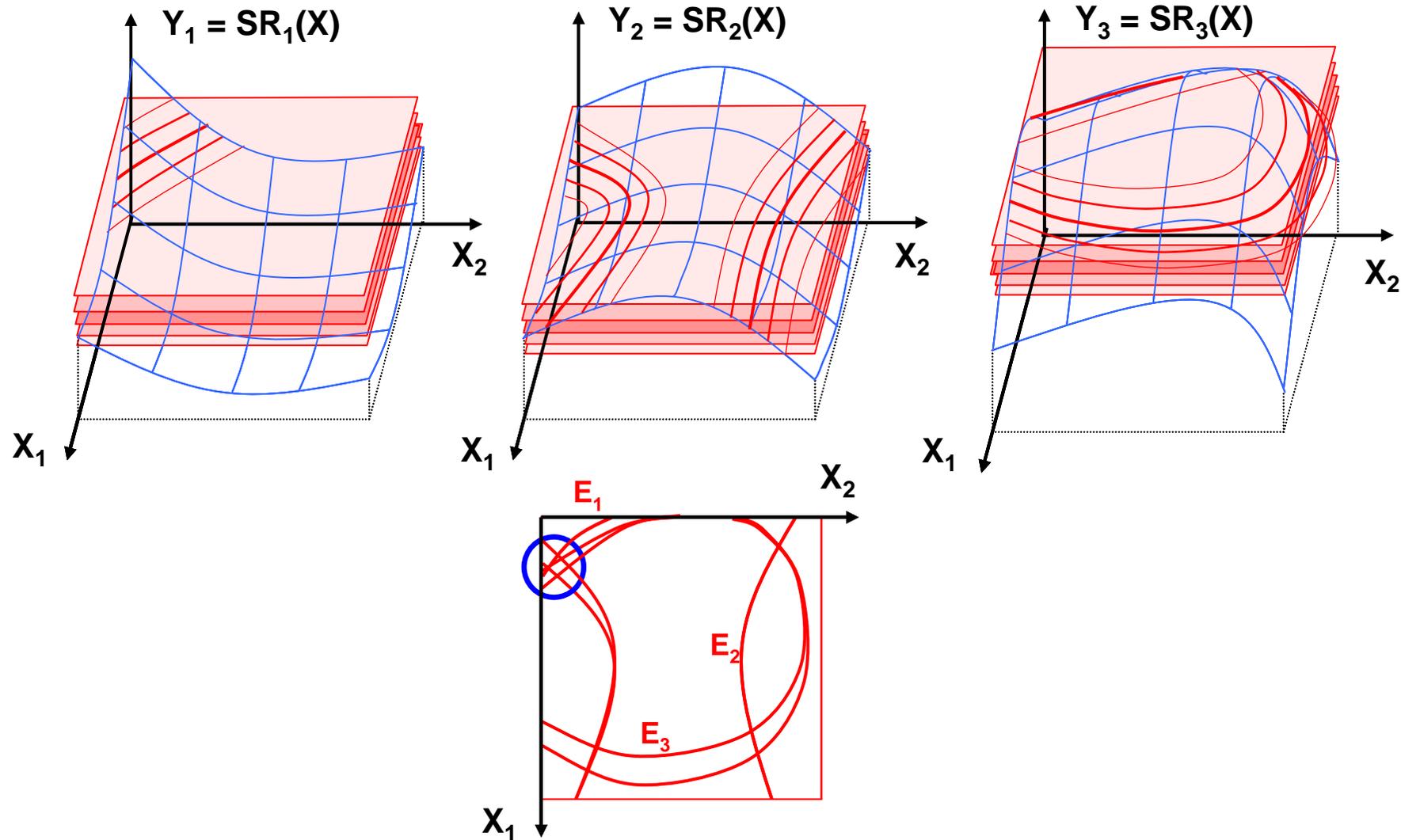
- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

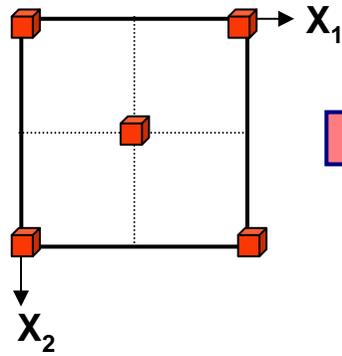
- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE**
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

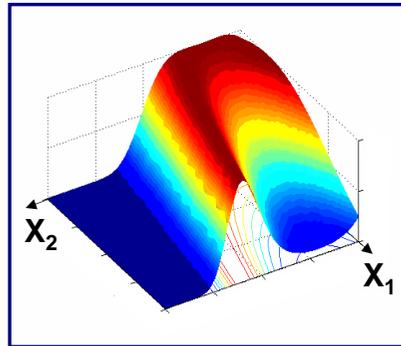
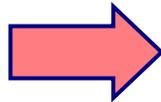
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



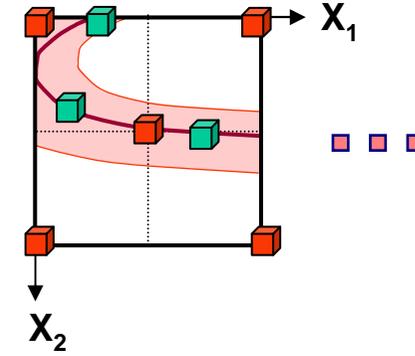
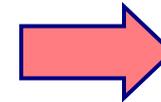
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



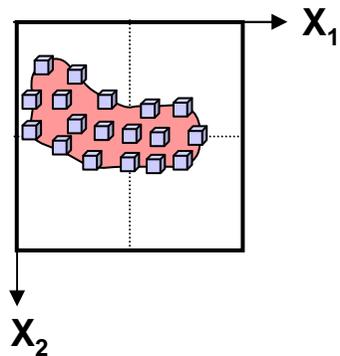
Plan itération 0



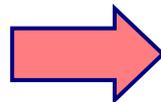
Fonction de vraisemblance



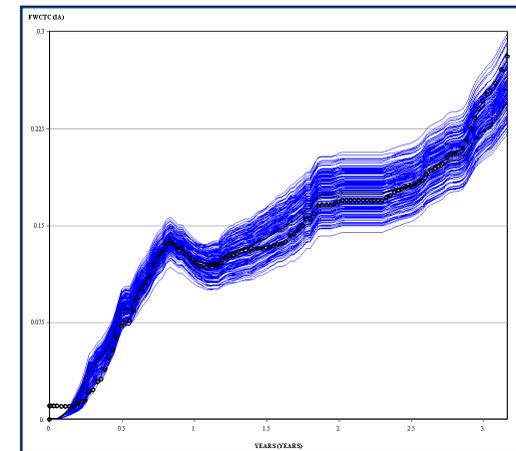
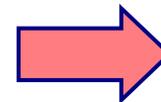
Plan itération 1



Échantillonnage du maximum
la fonction de vraisemblance



f_{sim}

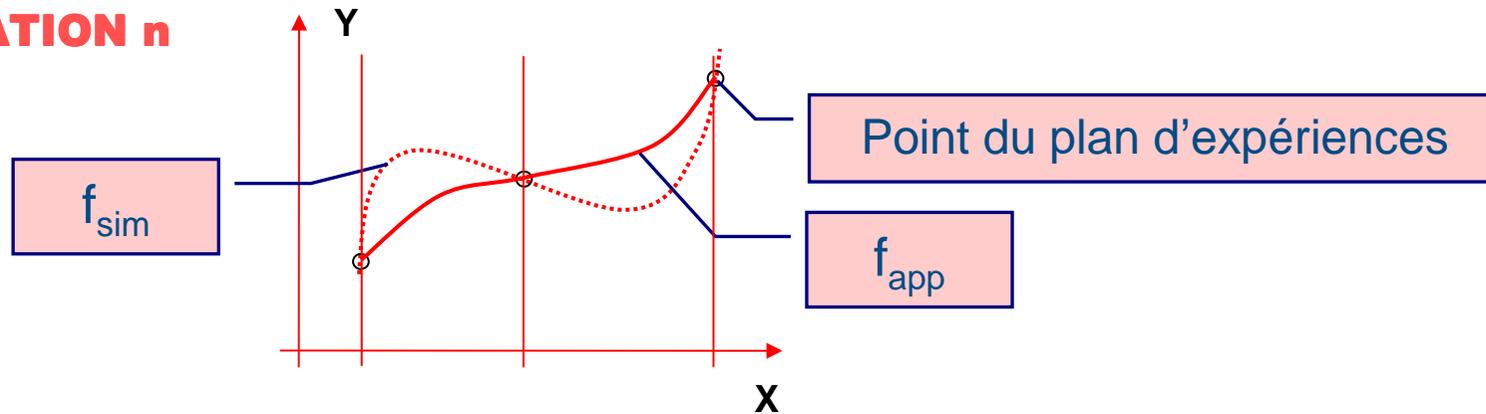


Obtention de calages multiples.

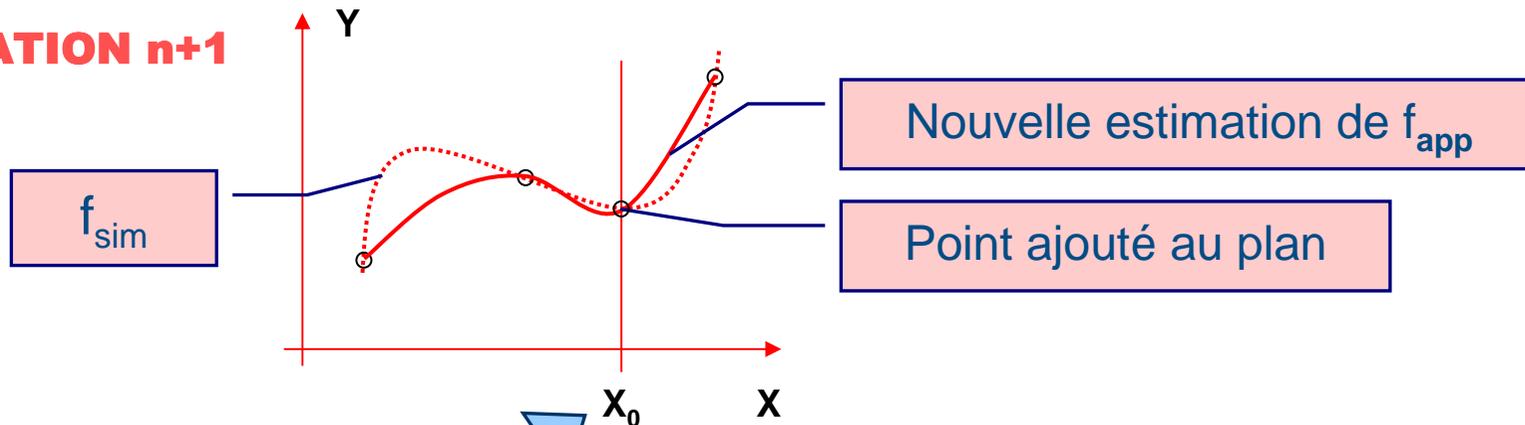
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

Amélioration Itérative de la Surface de Réponse

ITERATION n



ITERATION n+1



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE**

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

BUT

- ❑ Quantifier l'impact de paramètres incertains potentiellement influents sur le calage d'un historique de production.
- ❑ Quantifier l'incertitude sur les prévisions de production.

METHODE

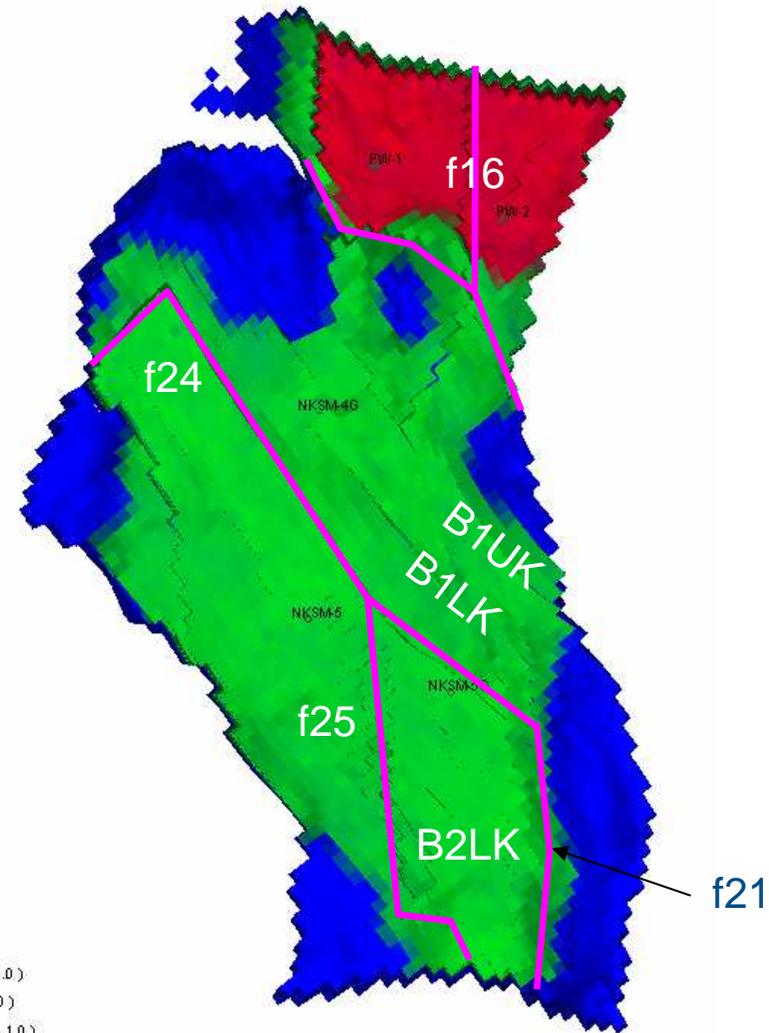
- ❑ Plan (d'expériences) de criblage : calcul de l'impact des paramètres sur les réponses, des interactions et sélection.
- ❑ Plan (d'expériences) de modélisation : détermination des surfaces de réponse du simulateur.
- ❑ Calage multiple de l'historique de production.
- ❑ Évaluation de l'incertitude sur les prévisions.

Etude réalisée par Julien SEGUIN 2003 (Total - GSR/TG/IAR)

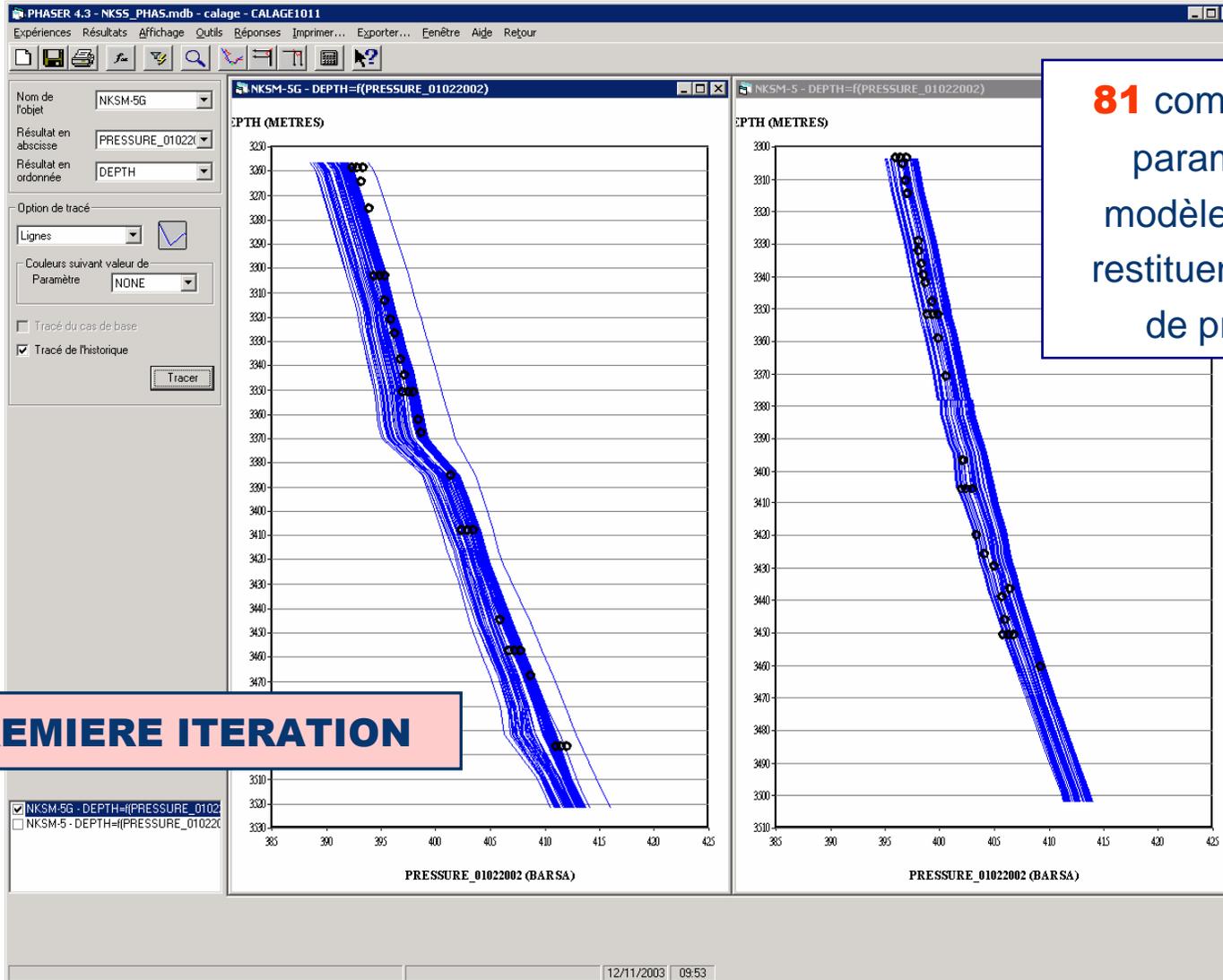
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

15 paramètres principaux pris en compte :

- Perméabilité moyenne des blocs
- Etanchéité des failles internes
- Barrières horizontales intra couches
- Profondeur du GOC
- PVT de l'huile (viscosité)

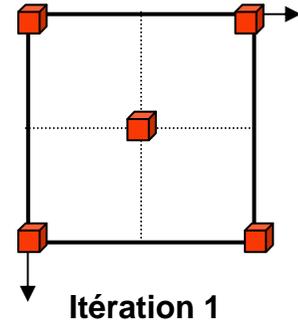


RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

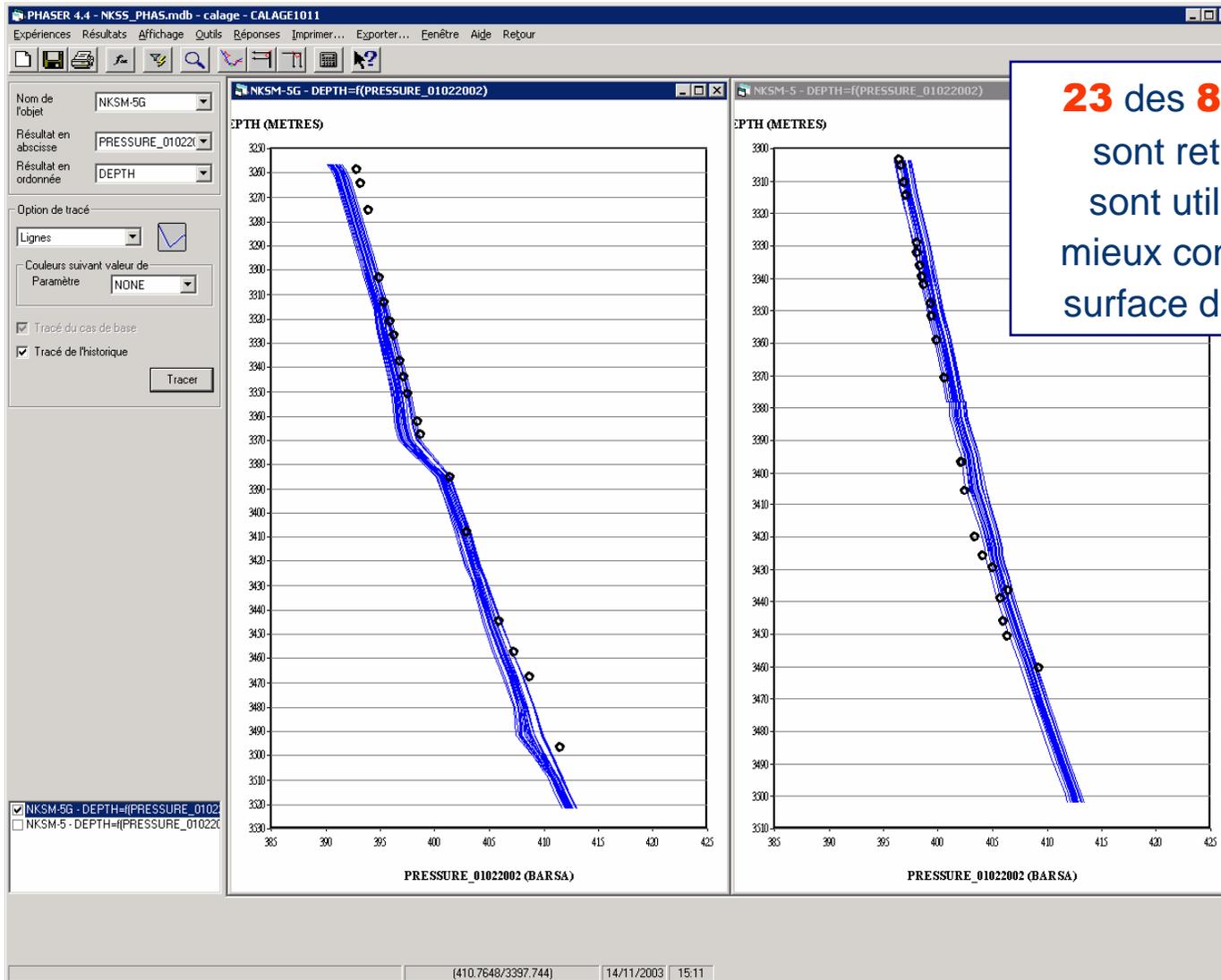


81 combinaisons de paramètres (i.e. modèles différents) restituent l'historique de production.

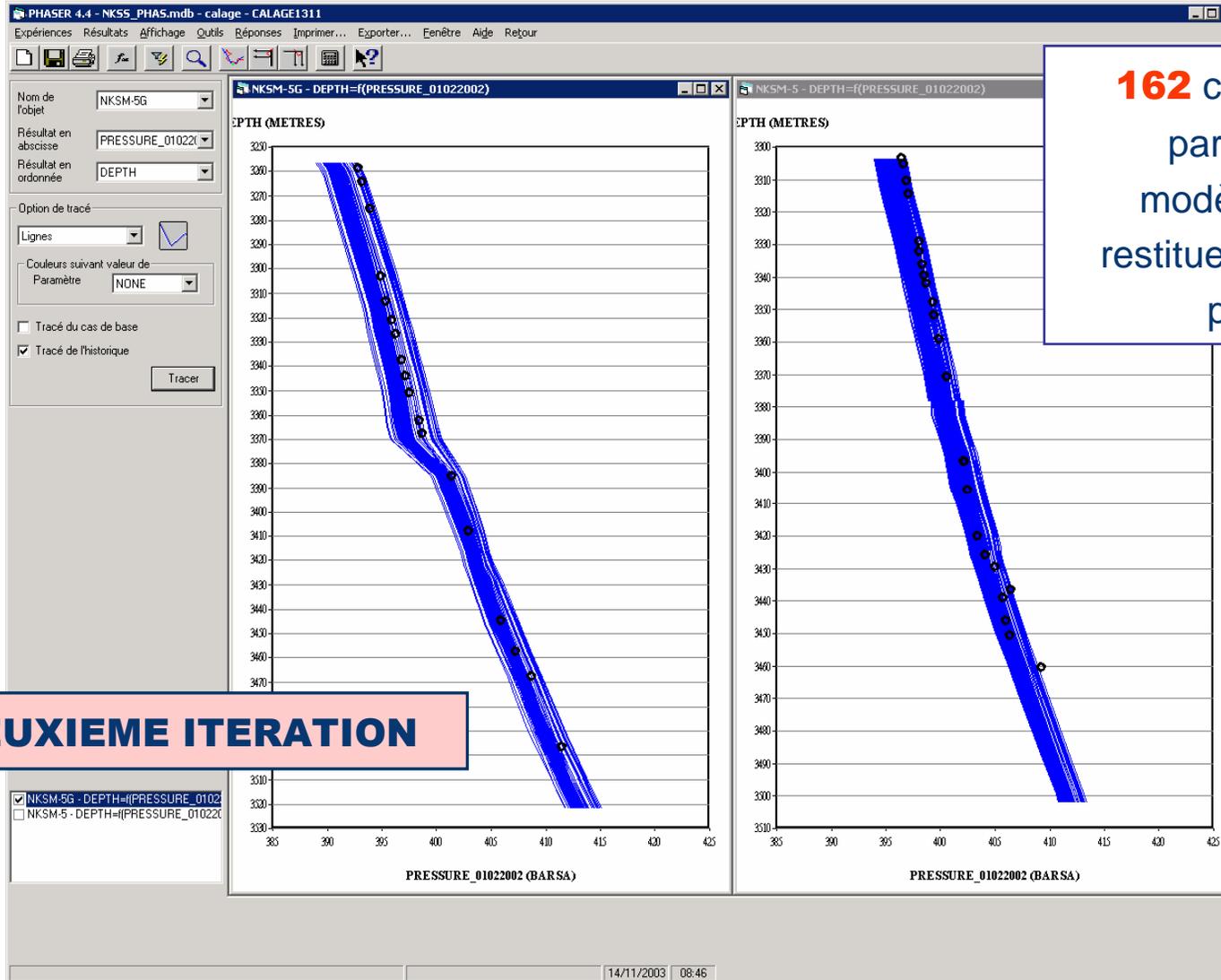
PREMIERE ITERATION



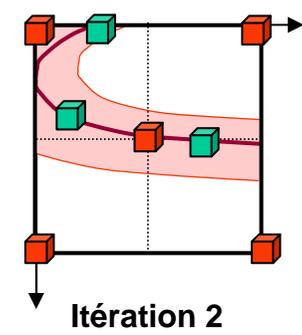
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

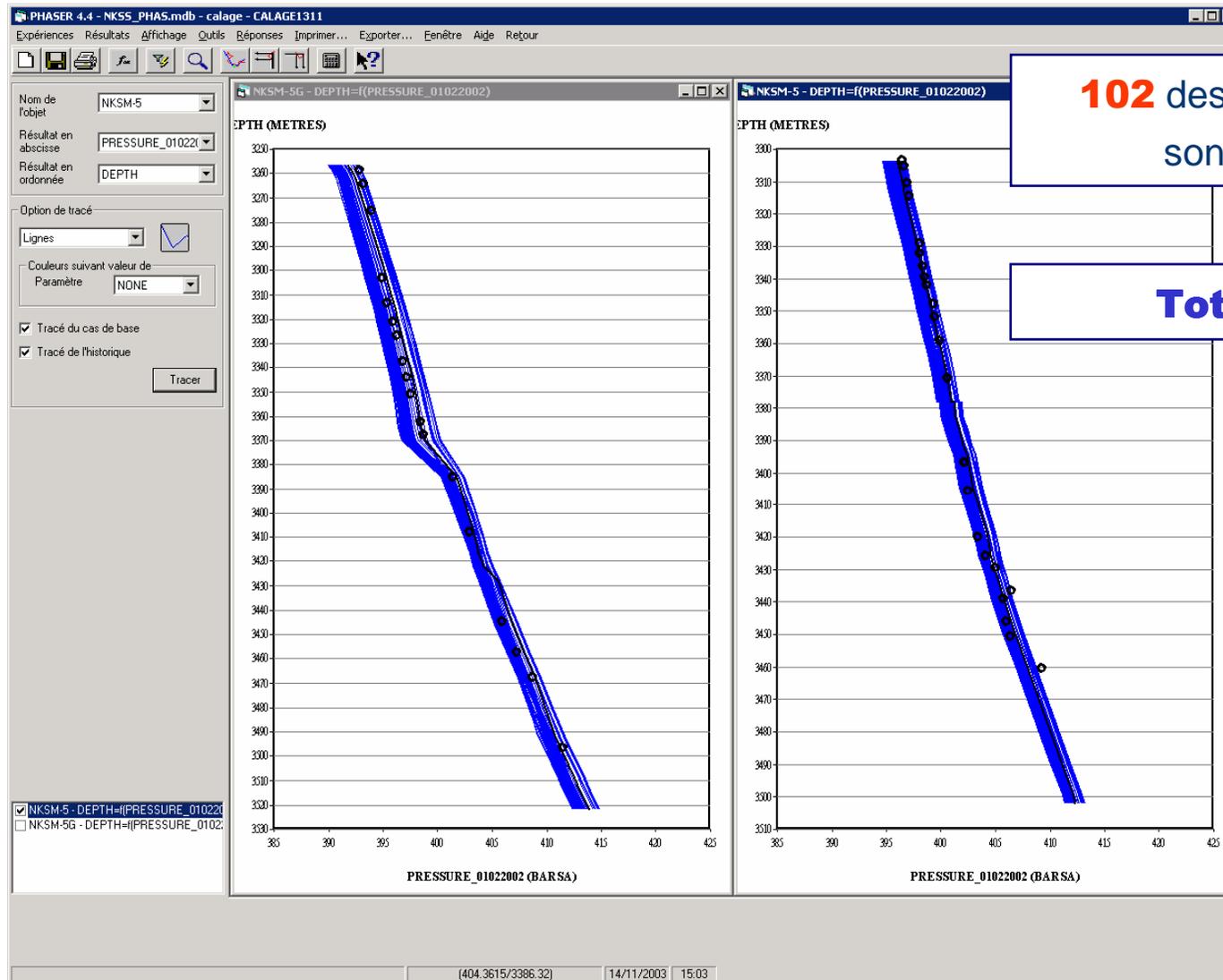


162 combinaisons de paramètres (i.e. modèles différents) restituent l'historique de production.



DEUXIEME ITERATION

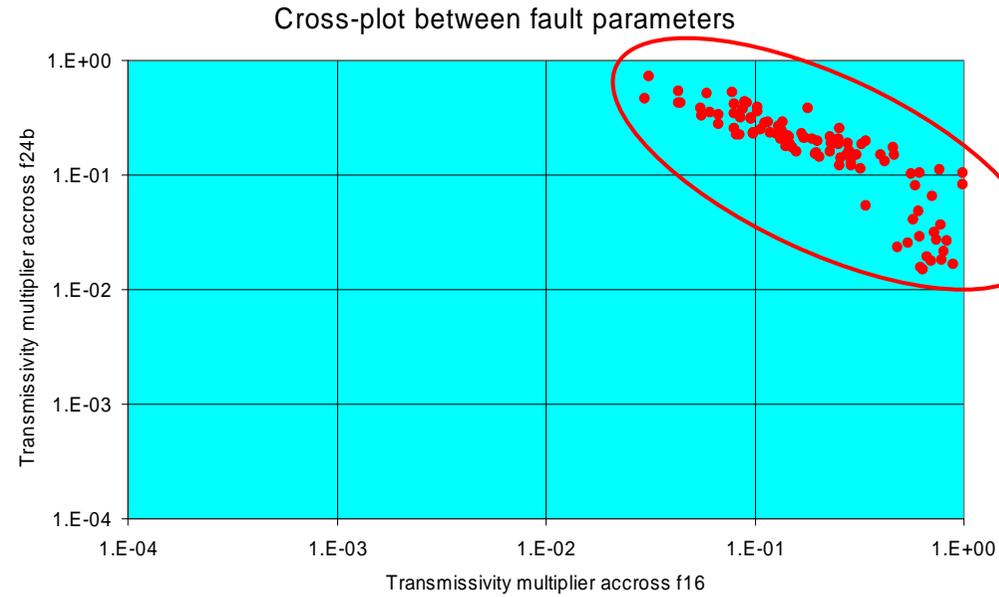
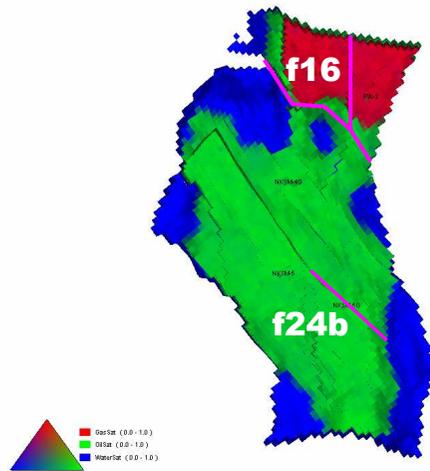
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



102 des **162** modèles sont retenus.

Total = 125

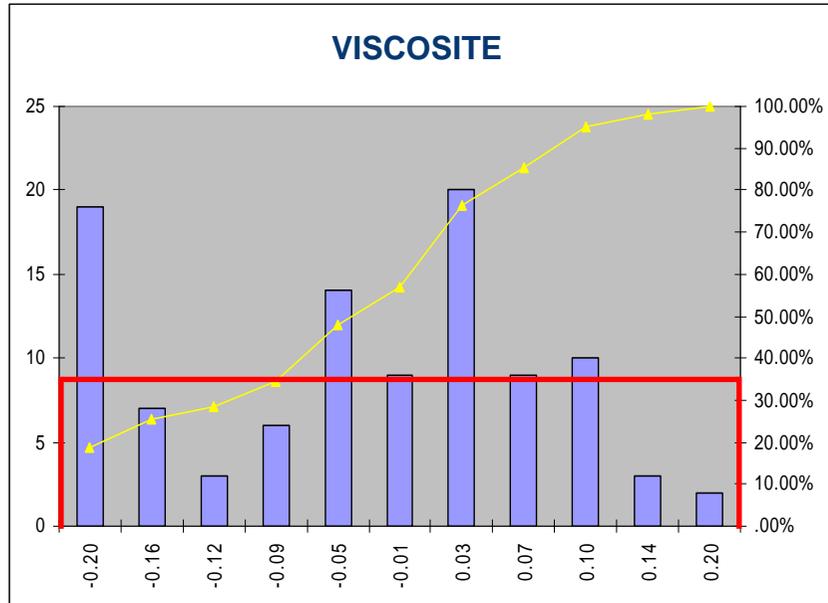
RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



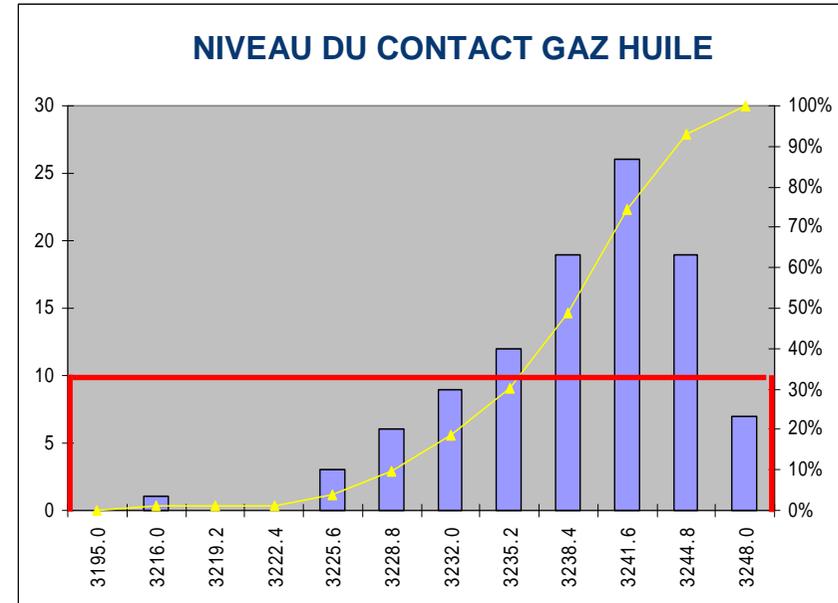
Caractérisation des **125**
modèles.

Domaine de
calage possible
de l'historique de
production.

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



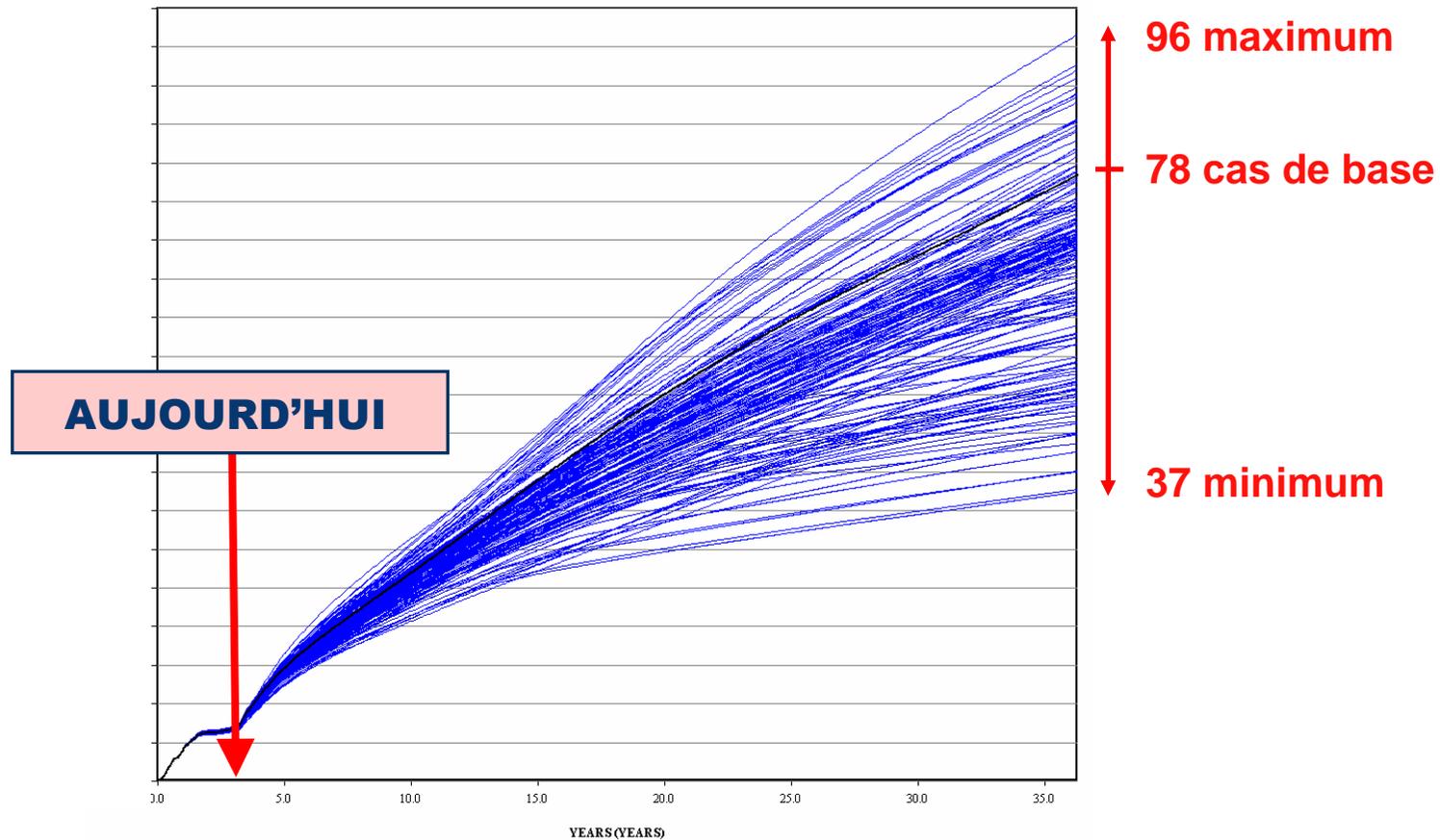
Range of uncertainty on oil viscosity (0.2 cp +/- 20%) unrestricted by confrontation of simulations and history data



Initial range of uncertainty on GOC (3195 - 3248 m/MSL) restricted by confrontation of simulations and history data (upside rejected)

PLAGE D'INCERTITUDE

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE



RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

1. Introduction

2. Formalisation

- LE PHENOMENE REEL
- LE SIMULATEUR
- LES PROBLEMES À RESOUDRE
 - Problèmes directs
 - Problèmes inverses

3. Application à la résolution du problème inverse

- LES DONNÉES
- LE PROBLEME DU CALAGE
- LA MÉTHODE
- LE CAS D'ÉTUDE

4. Conclusions

RISQUES ET INCERTITUDES EN EP PETROLIERE

CONCLUSIONS

- ❑ L'introduction des plans d'expériences numériques dans le cadre des études en exploration-production pétrolière a constitué une avancée significative.
- ❑ Les résultats obtenus (aide au calage et/ou obtention de calages multiples) sont prometteurs bien que les plans « standard » ne soient pas forcément bien adaptés aux problèmes posés.
- ❑ La multiplicité des problèmes industriels à résoudre (direct ou inverse, propagation d'incertitudes ou optimisation, ...) impose des solutions multiples et surtout complexes.
- ❑ Il reste cependant de nombreux points fondamentaux à résoudre, certains constituant de vrais défis comme l'exploration des grands espaces lacunaires par exemple.