



L'assimilation de données en neutronique au CERFACS.

Bertrand BOURIQUET

Plan

- Introduction
- Comment marche une centrale nucléaire.
- L'assimilation de données avec instrumentation hétérogènes.
- Les enjeux et problèmes numériques.
- Robustesse de l'assimilation de données en fonction du nombre d'instruments.
- Mise en évidence des instruments les plus importants pour l'assimilation de données.
- Optimiser l'instrumentation d'un cœur pour une évaluation par assimilation de données.
- Les études à venir
- Conclusions

Les enjeux de l'assimilation de données pour la neutronique

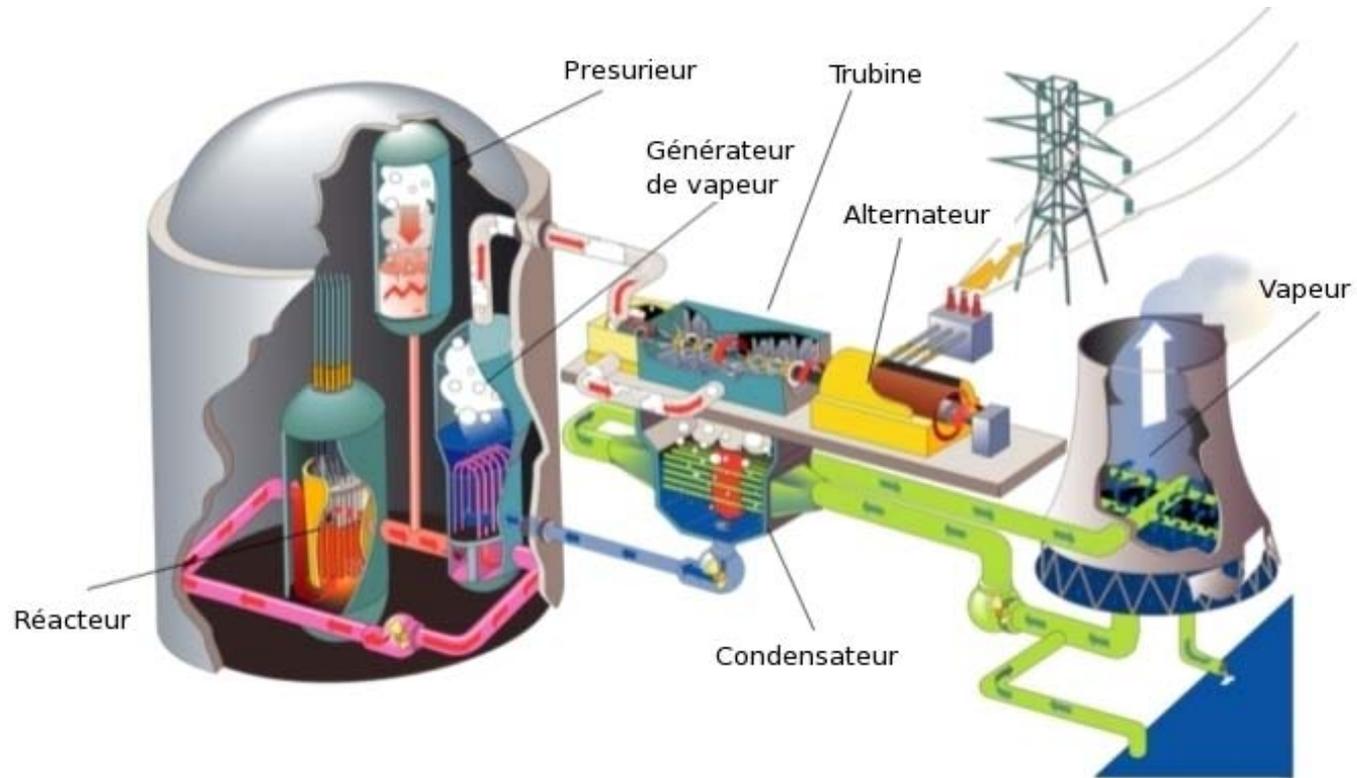
Les enjeux techniques et industriels

- Une meilleure connaissance de l'état du cœur conduit à plus de sécurité
- Une mise en place d'une gestion des instruments hétérogènes
- Une meilleure prévisibilité de la vie de la centrale
- Une connaissance plus précise du cœur

Les enjeux scientifiques

- Le développement d'analyse de données originales
- Les tests et la mise en place de méthode d'optimisation des position d'instruments
- La mise en place de possibilité de quantifier la quantité d'information fournie au système
- La connaissance de l'assimilation de données sur des système de taille réduite

Comment marche une centrale nucléaire

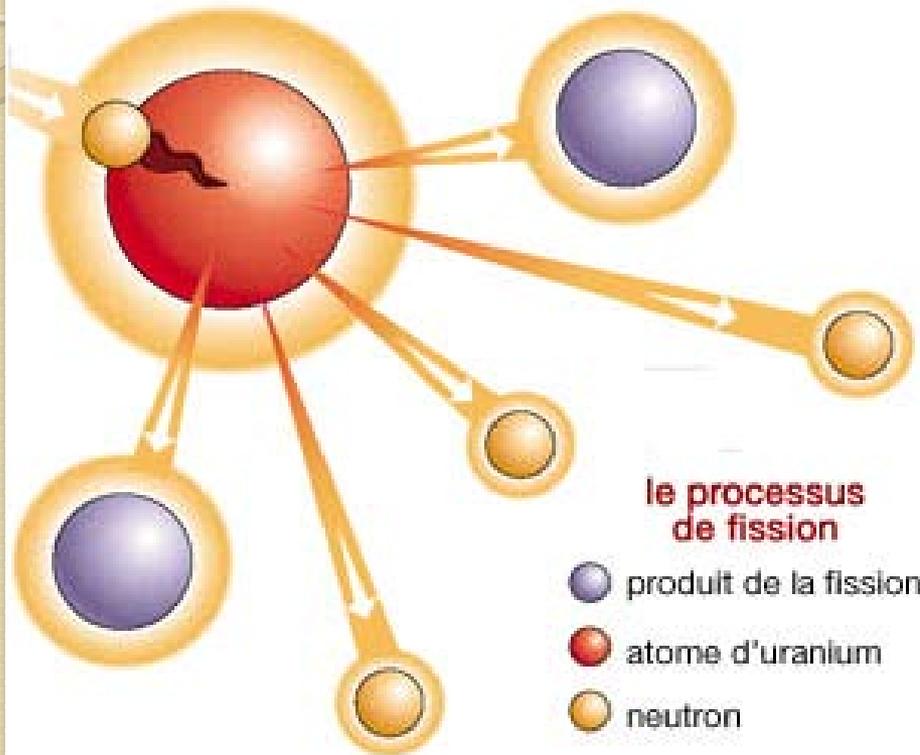


Le principe d'une centrale

- La réaction de fission produit les particules dont on récupère l'énergie cinétique par interaction de ces particules avec l'eau
- Plusieurs circuits successifs permettent d'isoler le cœur de la centrale de l'extérieur.



La fission nucléaire



La physique la fission nucléaire dans un cœur de centrale

- Les noyaux lourds sont proche de instabilité
- Les neutrons ne voient pas la barrière coulombienne
- Il existe des neutrons retardés

Contrôler La fission nucléaire dans un cœur de centrale

- On contrôle l'énergie des neutrons grâce à l'eau
- La borication de l'eau du primaire contrôle leur abondance
- Les barres de contrôles

L'assimilation de données : le BLUE

Les composantes de l'assimilation de données

- \mathbf{x}^a analyse
- \mathbf{x}^b ébauche
- \mathbf{y} l es observation
- \mathbf{R} La matrice de covariance d'erreur de mesure
- \mathbf{B} La matrice de covariance d'erreur de mesure
- \mathbf{H} L'opérateur d'observation

Équation de base

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K} \left(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b) \right) \quad \mathbf{K} = \mathbf{B} \mathbf{H}^T \left(\mathbf{H} \mathbf{B} \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right)^{-1}$$

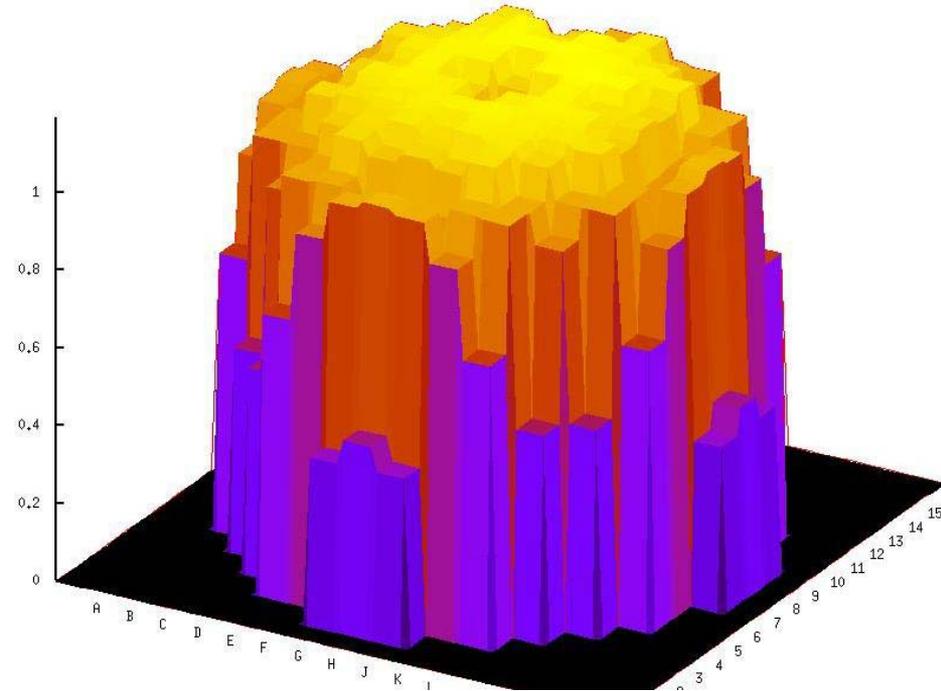
C'est équivalent à la minimisation de la fonction cout

$$J(\mathbf{x}) = \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b \right)^T \mathbf{B}^{-1} \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b \right) + \left(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}) \right)^T \mathbf{R}^{-1} \left(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}) \right)$$

L'assimilation de données pour la reconstruction de champ

Les codes de cœurs

Ils permettent d'obtenir un champ 3D de valeurs d'activité neutronique dans le cœur quand celui-ci est critique (en fonctionnement continu)



Dans tous les résultats présentés ici c'est ce champ qui est utilisé comme ébauche

L'assimilation de données avec instrumentation hétérogène

Les composants de l'assimilation de données choisie

- La matrice d'erreur de mesures R

$$\mathbf{R}_{jj} = (\alpha \mathbf{y}_j^o)^2, \forall j$$

- La matrice d'erreur d'ébauche B est construite sur la base de la fonction positive suivante

$$C(r, z) = \left(1 + \frac{r}{L_r}\right) \left(1 + \frac{|z|}{L_z}\right) \exp\left(-\frac{r}{L_r} - \frac{|z|}{L_z}\right)$$

- L'opérateur d'observation H et son linéaire tangent H : un opérateur de sélection avec éventuellement une normalisation

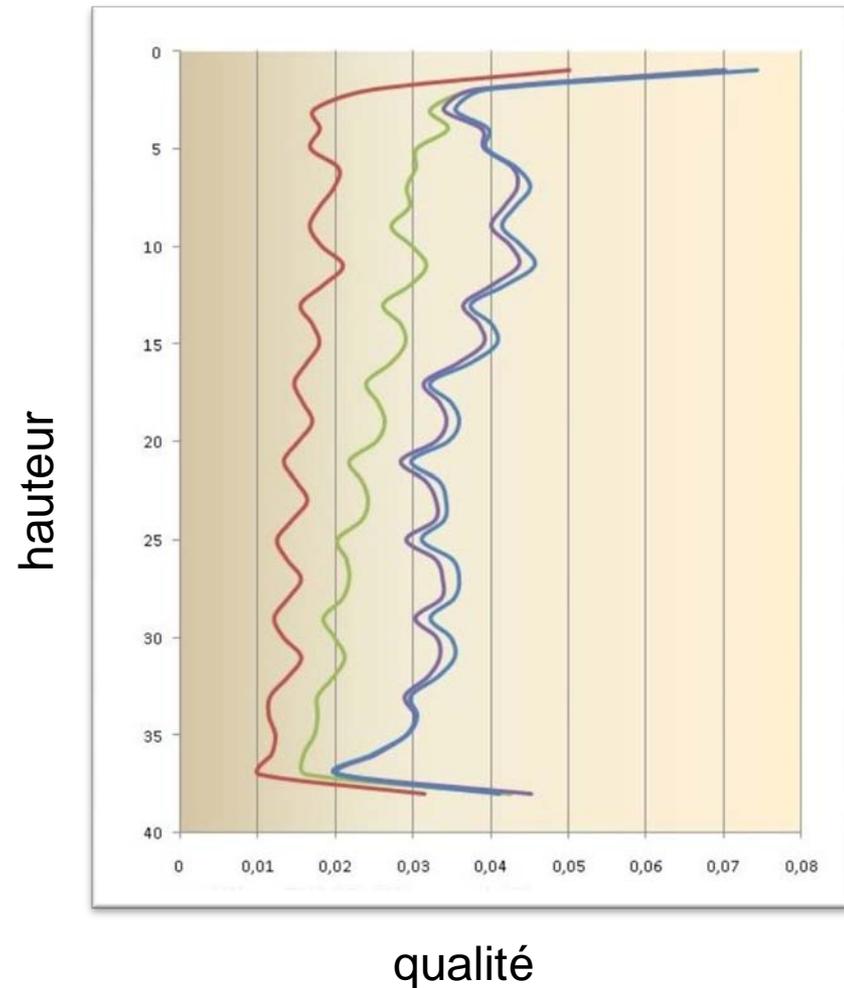
L'assimilation de données avec instrumentation hétérogènes.

Objectifs et les enjeux

- Etre capable de gérer des instrumentations hétérogènes dans un cadre unique
- Proposition d'une aide au pilotage en utilisant plus d'information

Résultats

- On améliore la reconstruction du champs d'activité en utilisant plus d'information
- On est capable avec les simplifications adéquates de le faire dans des temps compatibles avec les besoins industriels



Bilan des études d'assimilation pour la reconstruction de champ

- On a de bons résultats avec l'assimilation de données
- L'amélioration de la reconstruction est présente sur tous les cas étudiés
- On ouvre la porte à de nombreux développements

Articles

- Data assimilation : from operational and industrial application to complex systems, **Mathematic Today**, October 2010

Présentation

- L'invitation a organisée un séminaire à ECMI 2008 sur l'assimilation de données multidisciplinaire.
- Une contribution à ECMI 2008

Robustesse de l'assimilation de données en fonction du nombre d'instruments.

Quels sont les résultats de l'assimilation de données si on a moins d'instruments ?

- Il y a beaucoup de manière d'avoir moins d'instruments
- Les calcul sont lourds

Les enjeux et problèmes numériques.

Ce qui coûte cher dans le calcul direct c'est l'inversion de :

$$\mathbf{M} = \mathbf{HBH}^T + \mathbf{R}$$

Supprimer des instruments c'est faire une petite perturbation à H donc M :

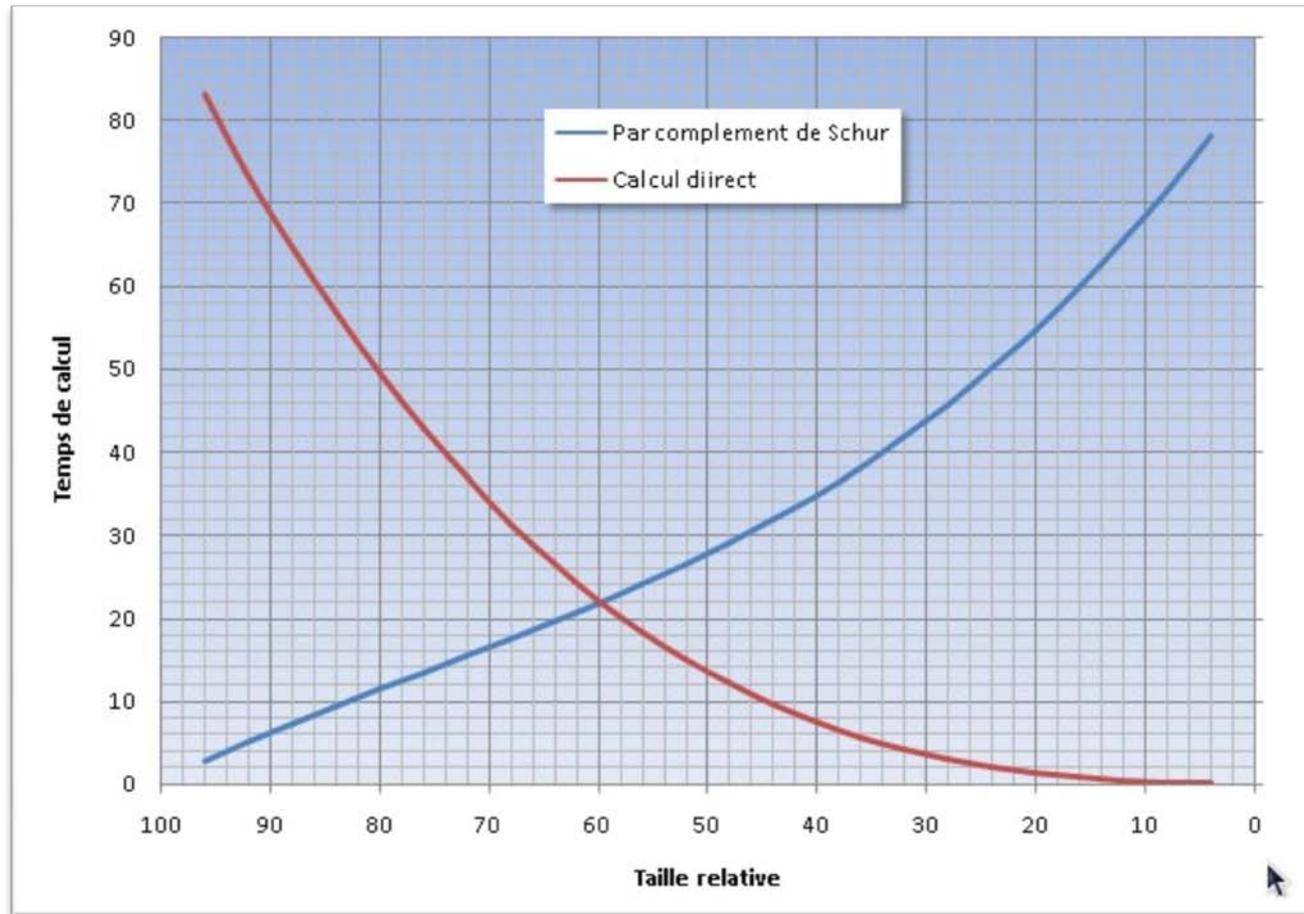
$$\mathbf{M}_{gg} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{gg} & \mathbf{Q}_{gg} \\ \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{S}_{gg} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{gg} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{gg} & \mathbf{Q}_{gg} \\ \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{S}_{gg} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{P}}_{gg} & \tilde{\mathbf{Q}}_{gg} \\ \tilde{\mathbf{R}}_{gg} & \tilde{\mathbf{S}}_{gg} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{gg}^{-1} + \mathbf{P}_{gg}^{-1} \mathbf{Q}_{gg} (\mathbf{M}_{gg}/\mathbf{P}_{gg})^{-1} \mathbf{R}_{gg} \mathbf{P}_{gg}^{-1} & -\mathbf{P}_{gg}^{-1} \mathbf{Q}_{gg} (\mathbf{M}_{gg}/\mathbf{P}_{gg})^{-1} \\ -(\mathbf{M}_{gg}/\mathbf{P}_{gg})^{-1} \mathbf{R}_{gg} \mathbf{P}_{gg}^{-1} & (\mathbf{M}_{gg}/\mathbf{P}_{gg})^{-1} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{gg}^{-1} = \tilde{\mathbf{P}}_{gg} - \tilde{\mathbf{Q}}_{gg} \tilde{\mathbf{S}}_{gg}^{-1} \tilde{\mathbf{R}}_{gg}$$

Les gains de l'optimisation algébrique



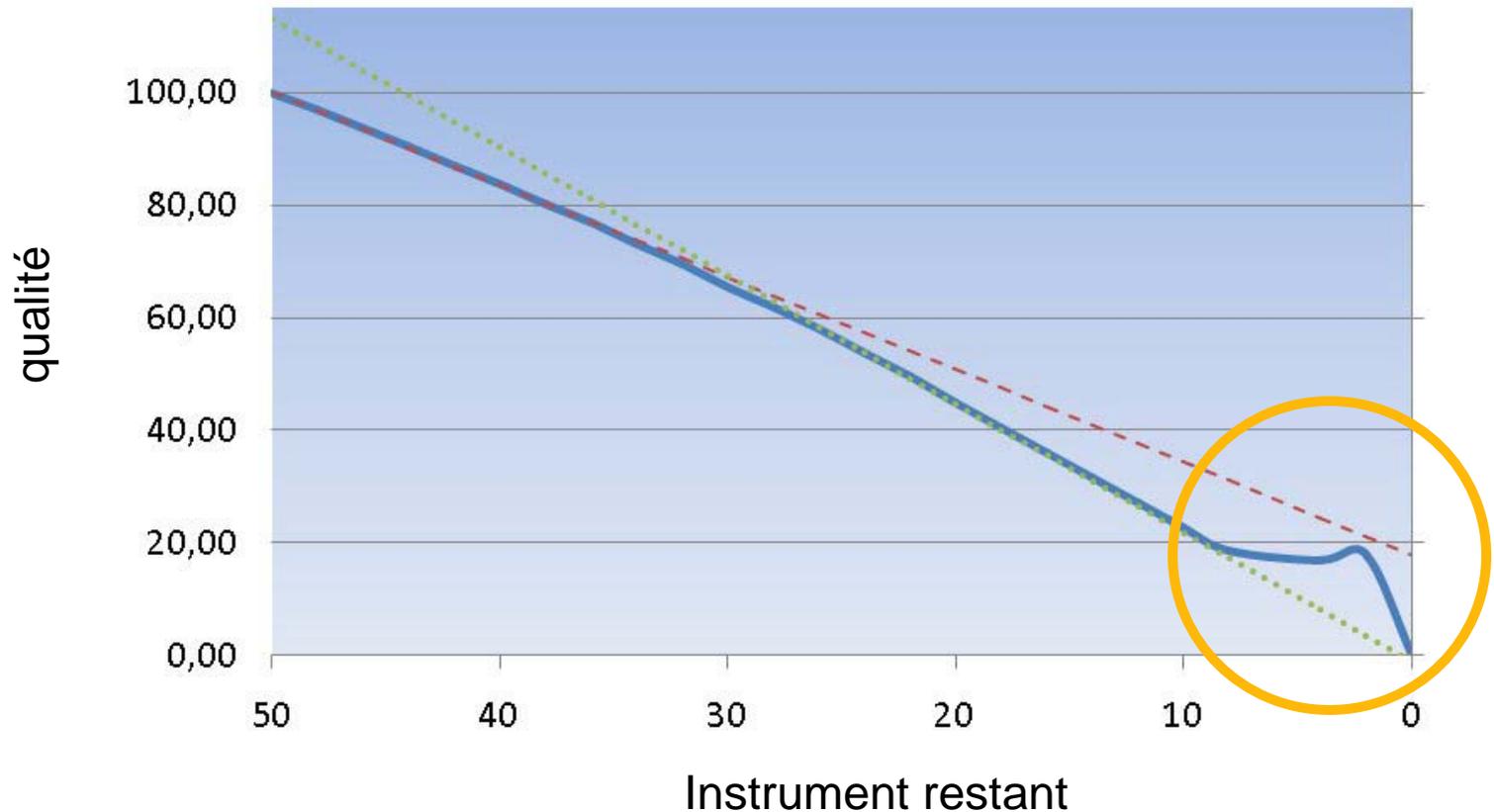
On gagne globalement 63 % de temps de calcul
Dans certain cas on peut gagner environ un facteur 20
Il existe une méthode similaire pour le gain d'instruments

Définition de la qualité de la reconstruction

$$v = 100 \frac{\left\| y_{ref}^o - Hx^b \right\| - \left\| y_{ref}^o - Hx^a \right\|}{\left\| y_{ref}^o - Hx_{ref}^b \right\| - \left\| y_{ref}^o - Hx_{ref}^a \right\|}$$

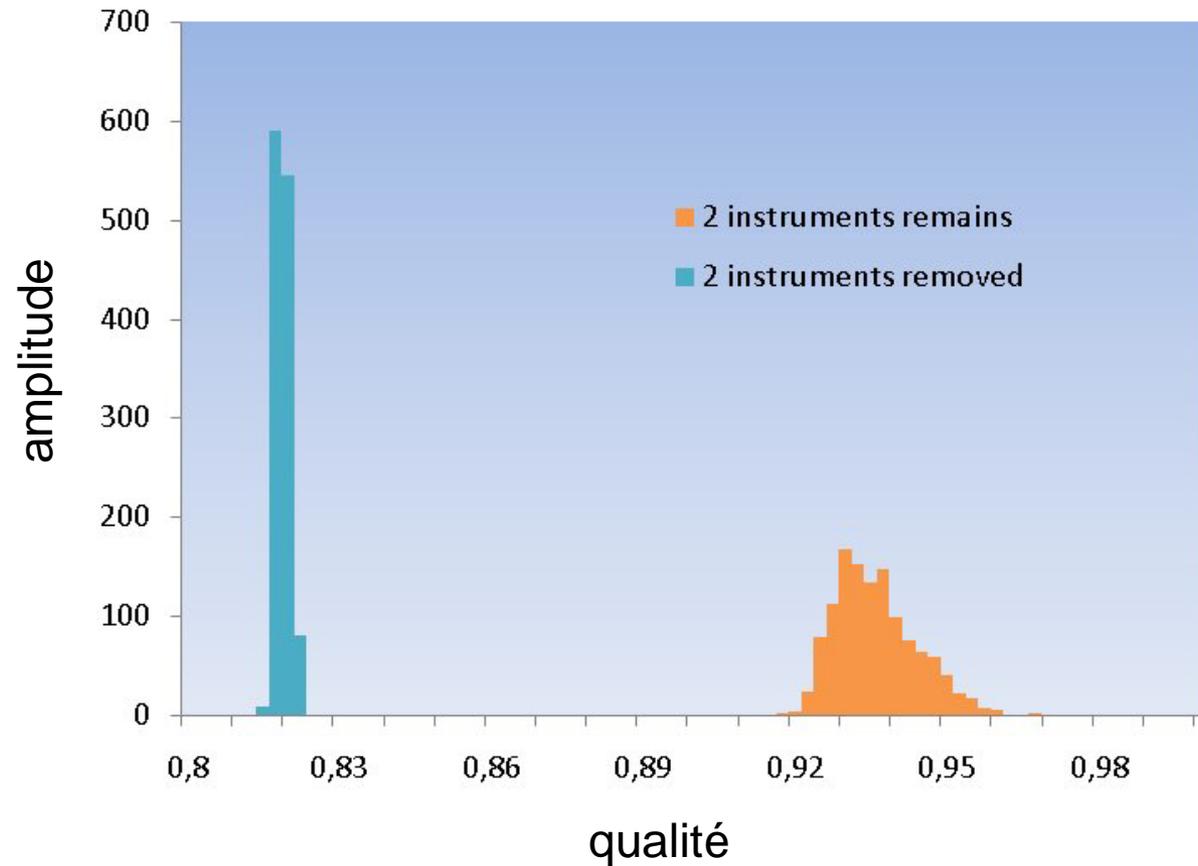
- Le choix est fait pour être applicable à une situation réelle avec un y_{ref}
- Le x_{ref}^a est une assimilation où l'on a tous les instruments
- On a une gamme de variation entre 100. et 0.

Robustesse de l'assimilation de données en fonction du nombre d'instruments.



- Deux régimes de décroissance
- Un comportement spécifique lorsque peu d'instruments restent

Evolution des distributions de qualité



La distribution est asymétrique et on a un décalage entre la valeur moyenne et la valeur la plus probable

Bilan de l'étude de la robustesse.

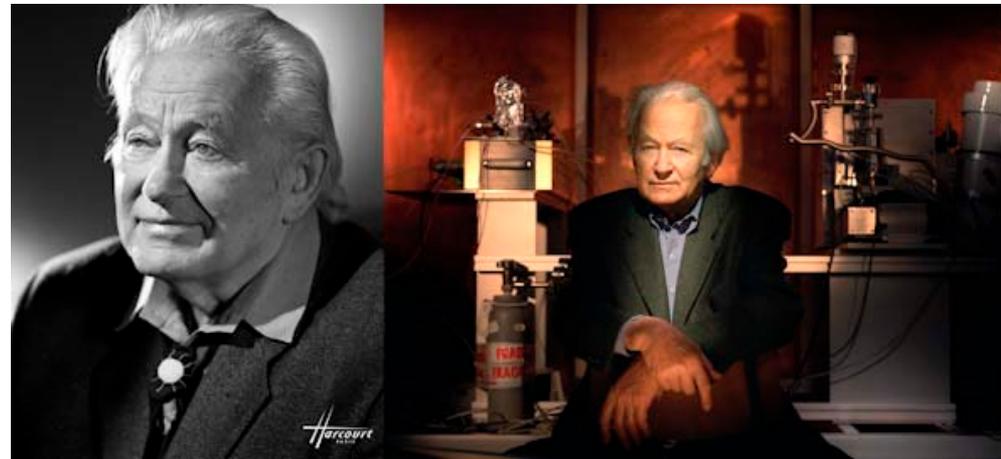
- On a mis au point une méthode numérique hybride pour réaliser rapidement de nouveau calcul de BLUE
- Les phases de décroissance sont dépendantes de la géométrie de la position des instruments
- Il reste à expliquer l'origine de ces phases et de ces pentes.

Article

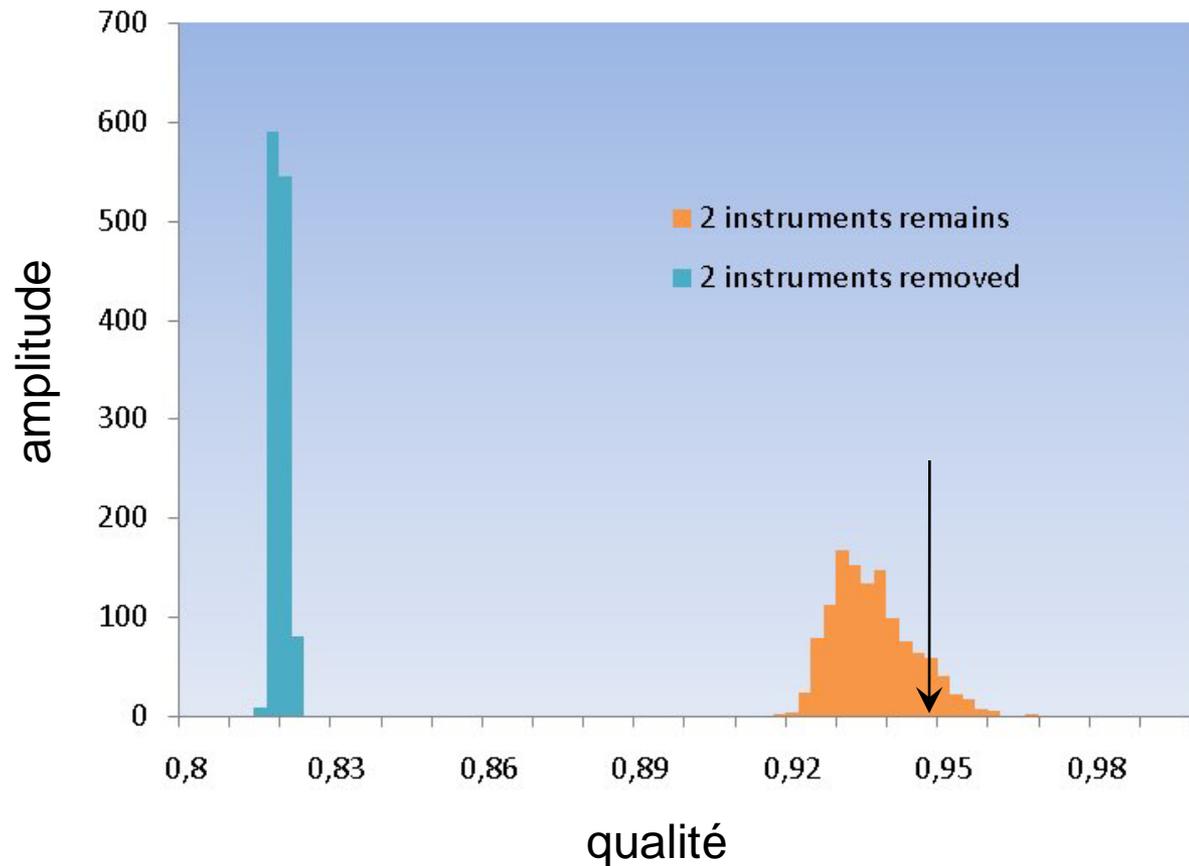
Bouriquet B., Argaud J.P., Erhard P., Massart S., Ponçot A., and Ricci S., Robustness of nuclear core activity reconstruction by data assimilation, **Nuclear Instrumentation and Method A 629** (2011), pp. 282-287

Présentation conférence ICAPP 2011

George Charpak
1924-2010



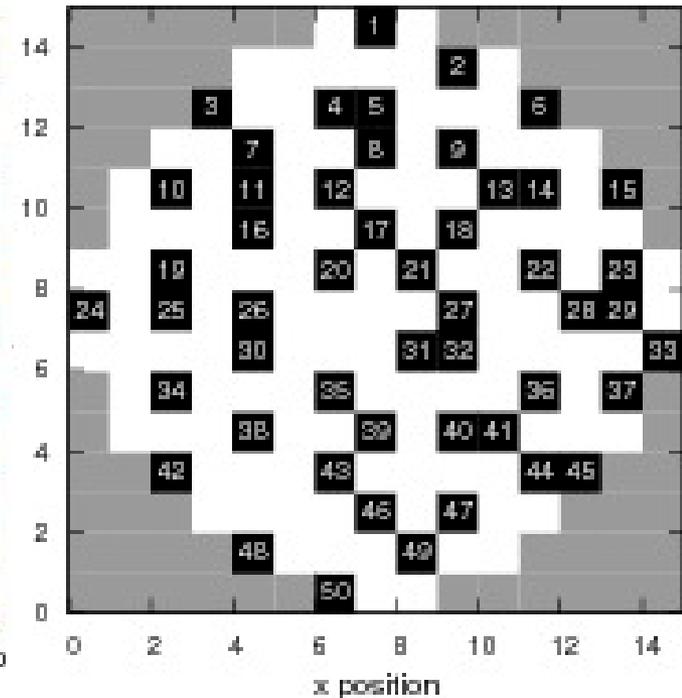
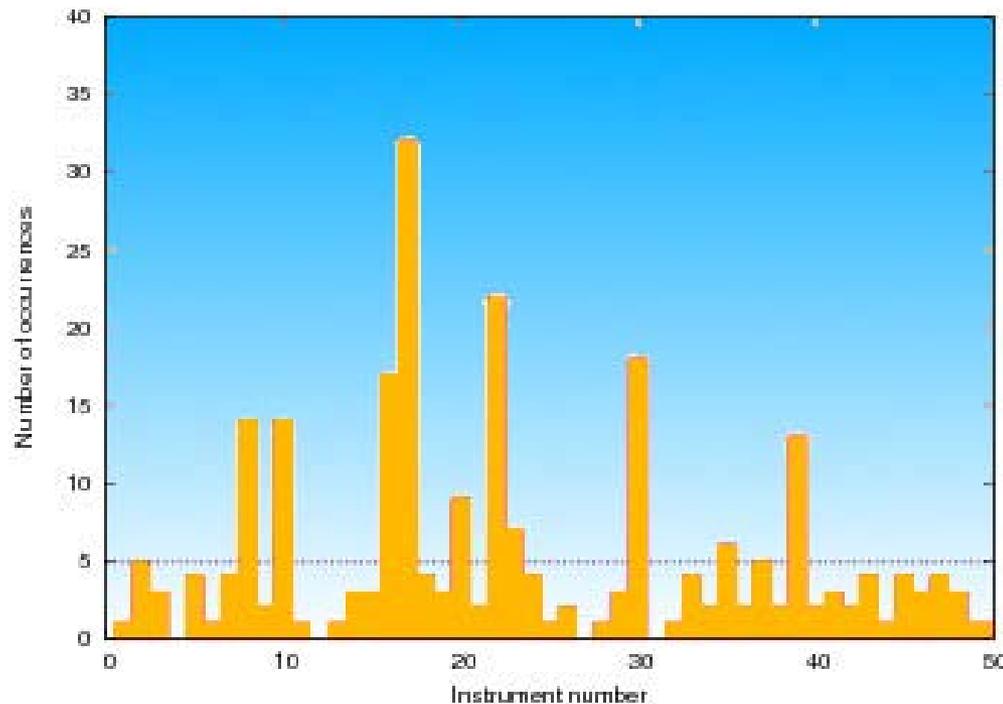
Que dire de plus sur les distributions ?



- Il n'y a pas seulement une translation mais une transformation des distributions
- On peut rechercher quels instruments sont les plus représentés dans une gamme de valeur

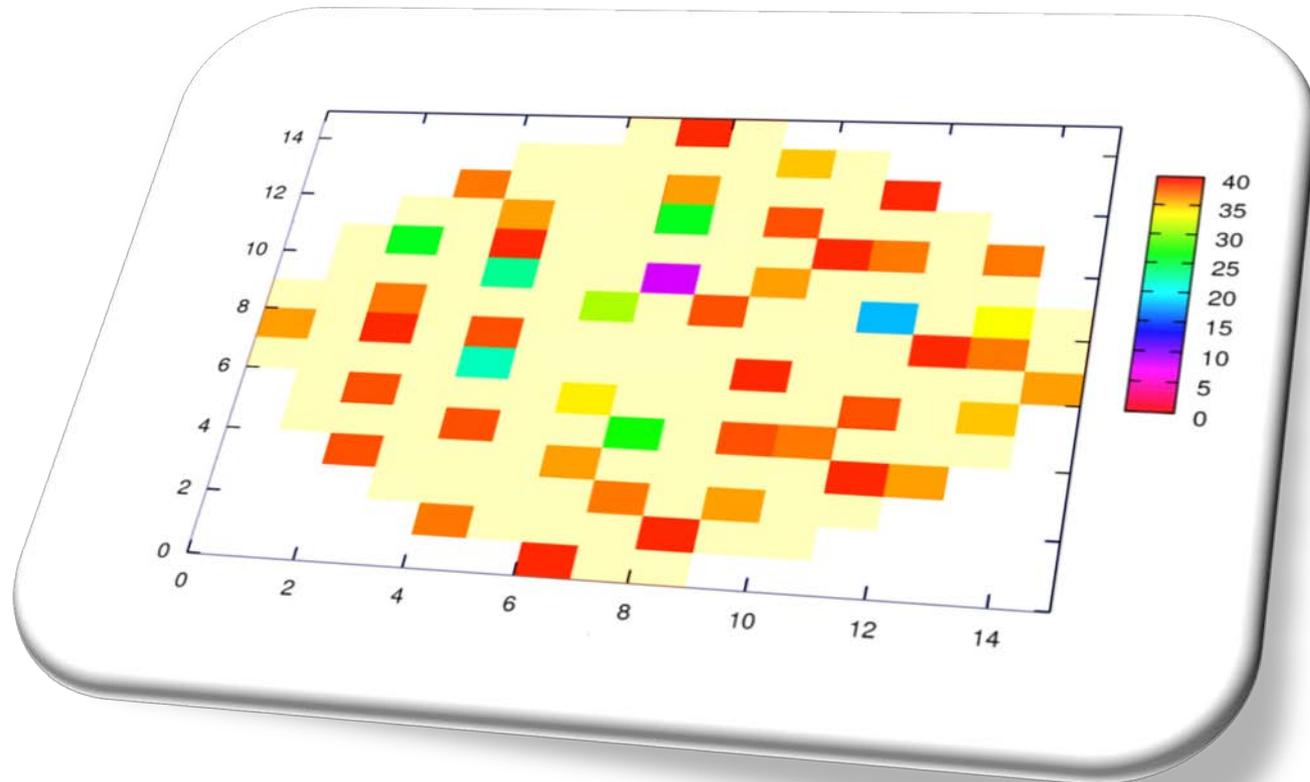
Occurrence des instruments

On compte les instruments présents dont la qualité est dans la gamme choisie.



- Tous les instruments ne sont pas équivalents, certains sont plus représentés que d'autres.

Mise en évidence des instruments les plus importants pour l'assimilation de données.



Vue sur un plan des résultats précédents

Bilan de l'étude de l'influence des instruments.

- On a mis au point une méthode permettant de voir quels sont les instruments les plus influents dans une assimilation de données
- Les positions centrales sont paradoxalement celles qui sont le moins importantes
- On ne peut pas faire une optimisation par recherche successive de la meilleure configuration

Un article

Bouriquet B., Argaud J.P., Erhard P., Massart S., Ponçot A., and Ricci S., Differential influence of each instrument in nuclear core activity evaluation by data assimilation, **Nuclear Instrumentation and Method A 626-627** (2011), pp. 97-104

Une présentation

conférence ICONE 19 en 2011

Optimiser l'instrumentation d'un cœur pour une évaluation par assimilation de données.

- Quelle est la meilleure configuration d'instruments possible ?
- Comment la trouver ou, du moins, en trouver une ?

Le recuit simulé : l'algorithme de Metropolis-Hasting

```
s :=s0; e :=E(s)
sopt :=s; eopt :=e
k :=0
while k < kmax and e > emax
    snew :=neighbour(s)
    enew :=E(snew)
    if enew < ebest then
        sopt :=snew; eopt :=enew
    if P(e, enew, temp(k/kmax)) > random() then
        s :=snew; e :=enew
    k :=k + 1
return sopt
```

État initial, énergie.
Meilleure solution initiale.
Compteur des itérations.
Boucle sur les conditions.
Choix d'un voisin.
Calcul de l'énergie.
Le nouvel état est -l meilleur.
Sauver le meilleur état .
Doit on changer d'état
On met à jour.
Incrément des évaluations.
On renvoie la meilleure solution

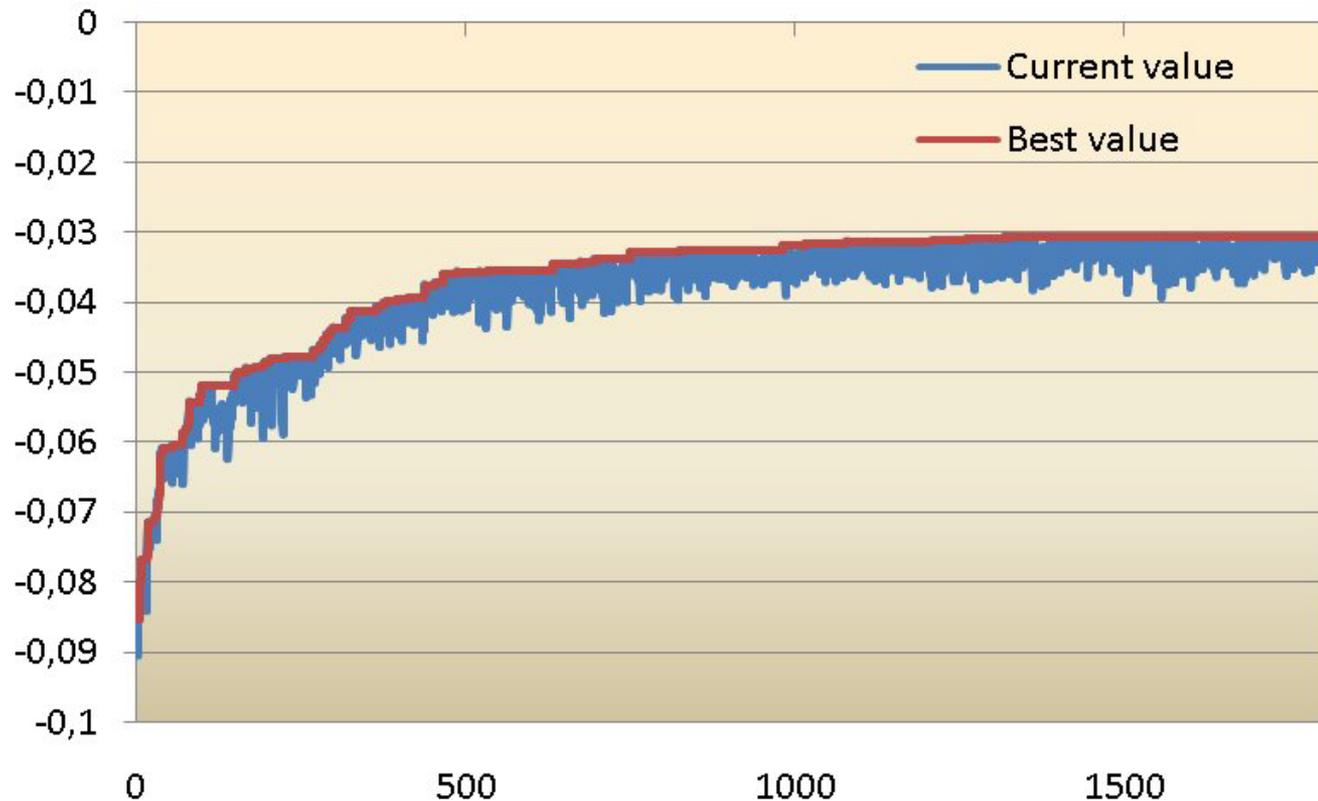
Le recuit simulé a été utilisé dans de nombreuses applications comme l'optimisation de circuits
C'est une méta heuristique donc elle ne marche pas toujours, même si sa convergence est assurée

L'utilisation dans le cas présent

- Les paramètres de l'assimilation de données sont inchangés sauf H qui est un simple opérateur de sélection
- L'énergie est prise comme l'écart à la valeur vraie
- La température est en $T_i = T_0/i$. Néanmoins toutes les lois de température ont l'air de marcher dans notre cas
- Les permutations sont faites au moyen des techniques de perte et de gain rapides d'instruments
- On représente la qualité

$$q = E(\mathbf{x}^a) - E(\mathbf{x}_{\text{ref}}^a) = \|\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^t\| - \|\mathbf{x}_{\text{ref}}^a - \mathbf{x}^t\|$$

Les résultats de l'optimisation de positions



On arrive donc à faire une optimisation de positions de capteur

Bilan de l'étude de l'influence des instruments.

- La méthode du recuit simulé marche mais n'est pas forcément optimum.
- On n'a pas trouvé de lois générales reliée à la configuration de l'état final.
- Les travaux seront présentés à 2 conférences ICONE et ICAPP en 2011

Conclusions

Techniques et industriels

- On a démontré que l'assimilation de données est un gain pour la gestion des cœurs de centrales
- On a développé des outils spécifiques pour cette problématique
- On a montré que l'on pouvait faire les calculs dans un temps compatible avec les besoins opérationnels

Scientifiques

- On a développé des méthodes adaptées aux problèmes d'assimilation de la dimension des cœurs de centrales
- On a développé des méthodes numériques pour optimiser les calculs
- On a étudié la sensibilité de l'assimilation de données à l'instrumentation
- On a mis en place des diagnostics permettant de mettre en évidence quels instruments sont les plus importants dans une assimilation de données.
- On a utilisé pour la première fois le recuit simulé en conjonction avec l'assimilation de données.

Bilan d'ARTEMIS

3 publications, 5 contributions à des conférences, 1 poster