

Propagation des incertitudes à partir des données de base aux paramètres clefs des réacteurs nucléaires

Ivo Kodeli

Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovénie

ivo.kodeli@ijs.si

Sujets

- *Pourquoi a-t-on besoin des analyses de sensibilité et d'incertitude*
- *Analyses de sensibilité*
- *Propagation des incertitudes à partir des données de base – matrices de covariance*
- *Exemples d'application*
- *Conclusions et perspectives*

“Renaissance” de l'énergie nucléaire ?

- Réacteurs à fusion (ITER)
- Réacteurs de Génération III+ et Génération IV
- Incinérateur d'actinides
- Accélérateurs, applications médicales, industrielles.

Principaux axes de R&D

- **Cycle de combustible avancé**
Taux de combustion élevé, surgénération, transmutation
- **Sûreté passive**
- **Plus économiques**

Sections efficaces pour les actinides (Pu, Am, Cm, Np, ...)

Nouveaux matériaux (haute température, haut flux)

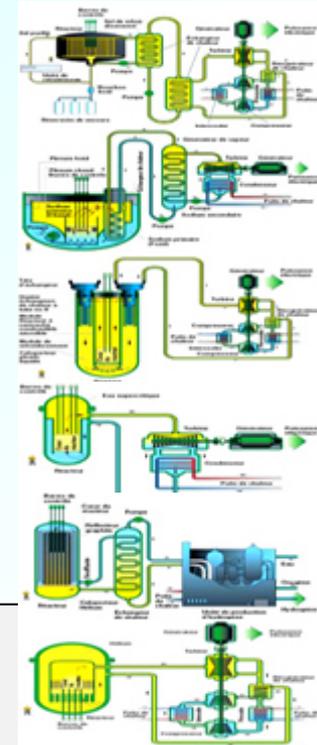
Couplage neutronique / thermo-hydraulique

Évolution du combustible, criticité, radioprotection 3-D

Supercomputing

Méthodes de sensibilité et d'incertitude, matrices de covariance

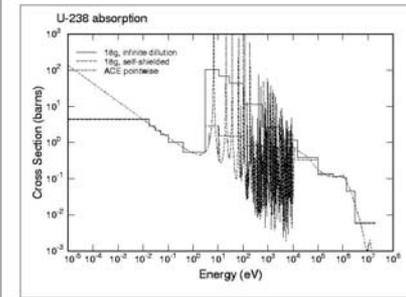
Expériences intégrales



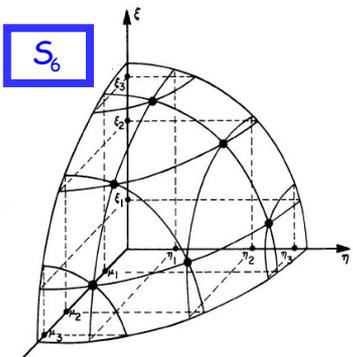
Outils de calculs de sensibilité et d'incertitude - Récentes acquisitions à l'AEN

- **SAGEP-FR**: analyses de sensibilité pour les réacteurs aux neutrons rapides (k-eff, burn-up, taux de réactions);
- **SUSD3D**: sensibilités & incertitudes à 1-, 2-, 3-D, k-eff, blindage, distributions en énergie et en angle;
- **TSUNAMI** (SCALE-6.0): 1D SN, 3D M/C (KENO5), k-eff
- **ERANOS 2.0**: sensibilités-incertitudes aux paramètres des réacteurs aux neutrons rapides
- **ZZ-COV-15GROUP**: bibliothèque des matrices de covariances des sections efficaces à 15-groupes - presenting a general overview of the presently available data, used for assessment of advanced reactors.
- **ANGELO-LAMBDA** mise-en-groupe et la vérification mathématique des matrices de covariances, développé pour les bibliothèques des covariances des sections efficaces ZZ-VITAMIN-J/COVA et ZZ-SCALE6/COVA-44G.
- **ZZ-SCALE6/COVA-44G** bibliothèque des covariances des sections efficaces à 44-groupes issues de SCALE6
- **ERRORJ-2.3**: traitement des matrices de JENDL-3.2 & 3.3 (MF=31- 35), intégré dans NJOY-99
- **PUFF-IV**: Génération des covariances à partir des fichiers ENDF/B-VI COVERX

Monte Carlo vs. Déterministe



Méthode	Avantages	Inconvénients
Monte Carlo	Description "exacte" de la géométrie Sections efficaces ponctuelles	Temps de calcul assez élevé Incertitudes statistiques Information limitée (ciblée)
Déterministes (S_N -ordonnées discrètes)	Distribution du flux détaillée Temps de calcul modeste Analyses de sensibilité et d'incertitude	Discrétisation de l'espace, de l'énergie, des directions Représentation de géométrie Sections efficaces multigroupes : autoprotection, spectre de pondération Large mémoire



Equations de transport directe et adjointe - fonction importance (Wigner, Usachev, Lewins, Gandini)

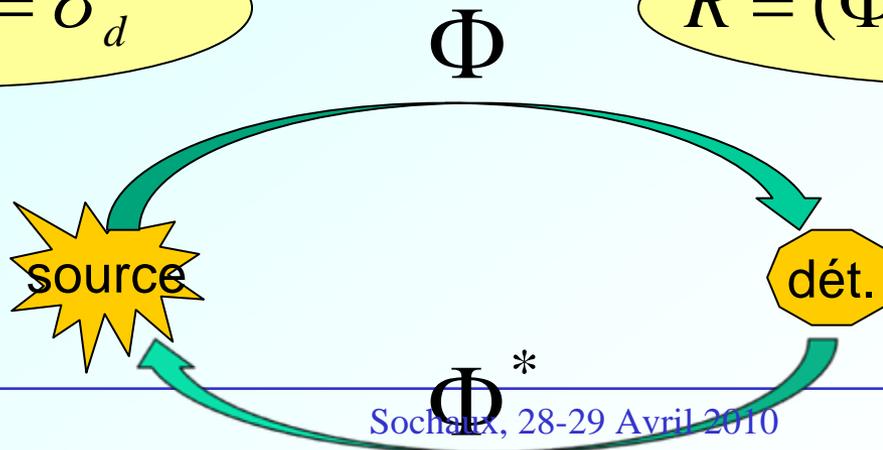
- Résolution de l'équation de Boltzmann : $B \cdot \Phi = Q$
Calcul d'un taux de réaction :

$$R = \langle \sigma_d \cdot \Phi \rangle = \int_V \int_0^{E_{\max}} \int_{4\pi} d\mathbf{r} dE d\Omega \Phi(\mathbf{r}, \Omega, E) \sigma_d(\mathbf{r}, \Omega, E)$$

- Propriété fondamentale de la fonction adjointe
Si l'opérateur de transport B n'est pas auto-adjoint on peut alors définir un opérateur adjoint de façon que :

$$B^* \cdot \Phi^* = \sigma_d$$

$$R = (\Phi, \sigma_d) = (\Phi^*, Q)$$



Théorie des perturbations :

Φ^* , Φ permettent de calculer la sensibilité du k_{eff} aux données de base

- Perturbation de l'éq. de Boltzmann stationnaire

$$P \cdot \Phi = \lambda F \cdot \Phi \quad \lambda = \frac{1}{k}$$

- Equation aux valeurs propres du système perturbé au **1^{er} ordre** (sensibilité indépendantes de la perturbation) :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\left\langle \Phi^* \left| \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} - \lambda \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right) \cdot \Phi \Delta\alpha \right. \right\rangle - \left\langle \Phi^* \left| (P - \lambda F) \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} \Delta\alpha \right. \right\rangle}{\lambda \langle \Phi^* | F \cdot \Phi \rangle} = 0$$

Simplification grâce à la propriété fondamentale de l'adjoint!

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sum_{\alpha} S_{\alpha} \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$

- **2 calculs donnent toutes les sensibilités.**

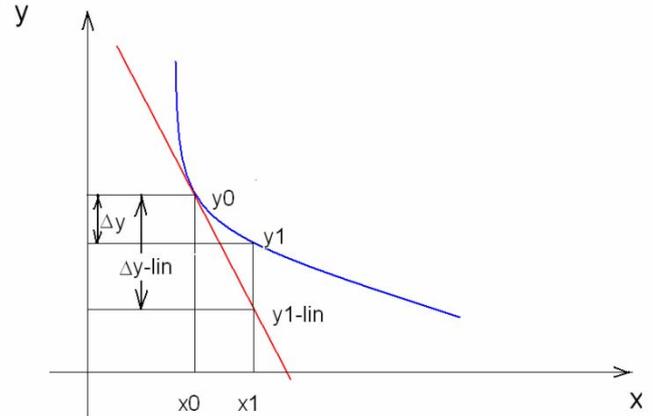
$$S_{\alpha} = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha}$$

Propagation des incertitudes – formule “sandwich”

Méthode d'évaluation des incertitudes sans utilisation de fonctions de probabilité :

$$y_j = y_j(x_i)$$

$$\bar{\mathbf{y}} = (y_i^t), \bar{\mathbf{x}} = (x_i^t)$$



$$\frac{\delta y_j}{y_j} = \sum_i \frac{x_i \partial y_j}{y_j \partial x_i} \bigg|_{x=\langle x \rangle} \frac{\delta x_i}{x_i} + K$$

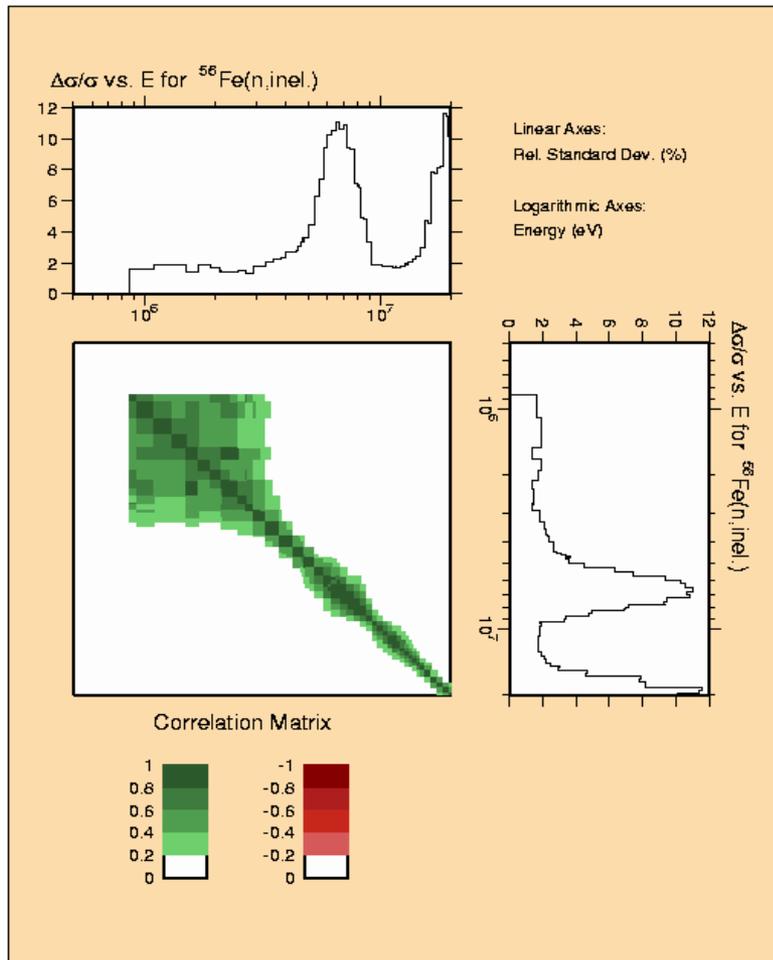
$$M(\bar{\mathbf{y}}) = S^t \cdot M(\bar{\mathbf{x}}) \cdot S$$

$$S_{ij} = \frac{x_j}{y_i} \frac{\partial y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \ln y_i}{\partial \ln x_j} = \text{matrice de sensibilité relative}$$

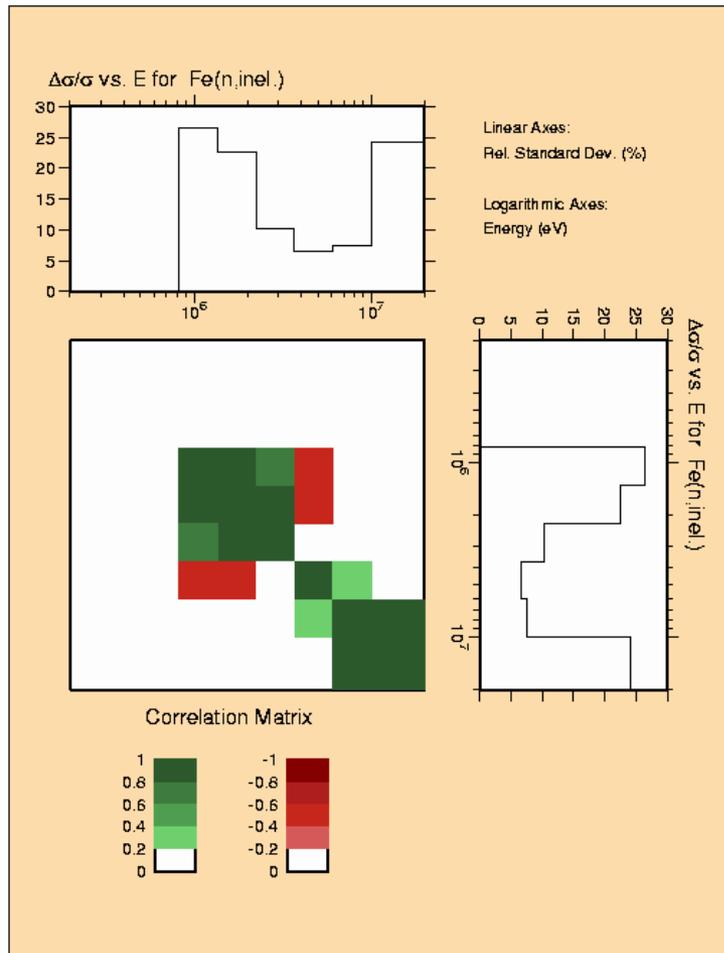
$$M_{ij} = \frac{\langle \delta x_i \delta x_j \rangle}{\langle \delta x_i \rangle \langle \delta x_j \rangle} = \text{matrice de covariance relative}$$

Dérivées sont évaluées au premier ordre, donc supposées constantes pour les variations autour de $\langle x \rangle$ à l'intérieur de l'intervalle décrit par les incertitudes associées (δx) \rightarrow relations linéaires ou petites incertitudes.

Matrice de covariance Fe-56(n,inel)

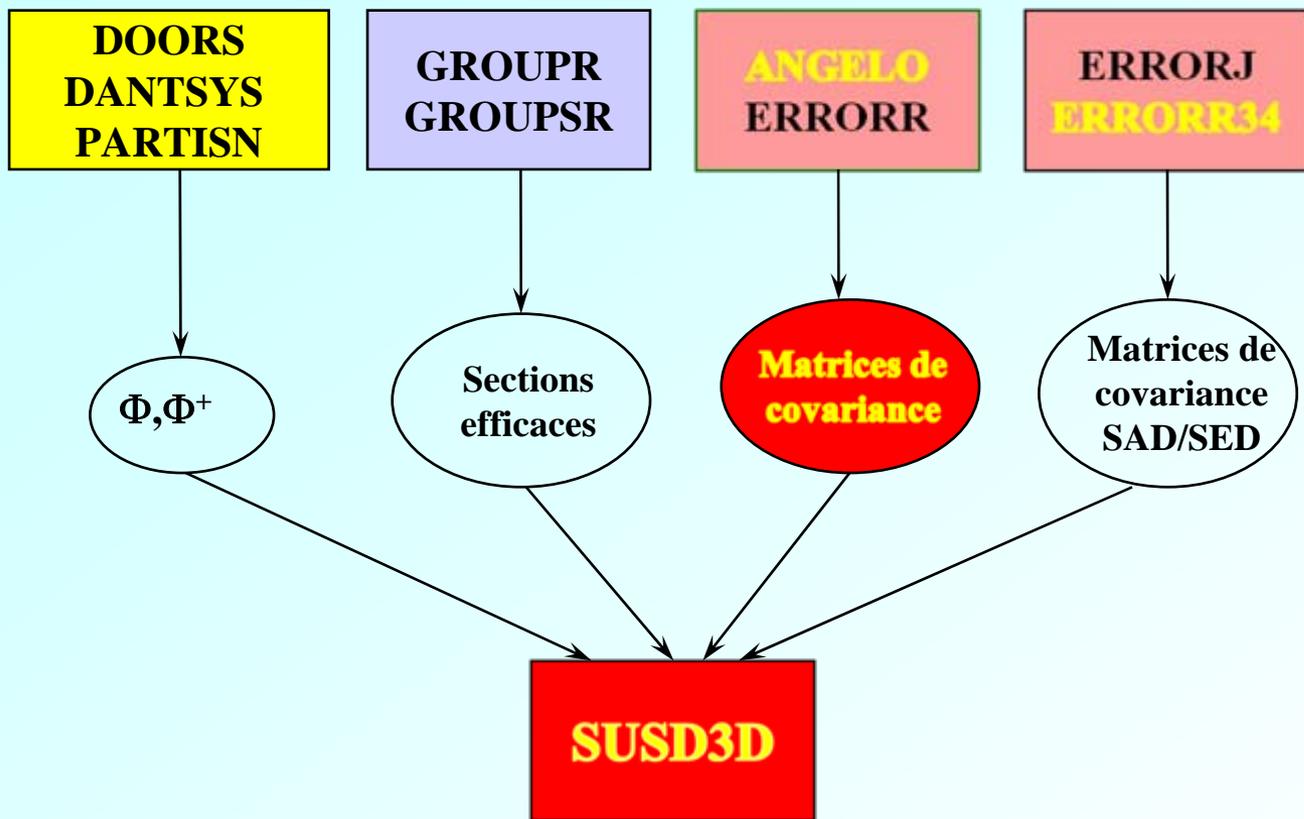


EFF-3.1



JENDL-3.2

SUSD3D : code pour les analyses de sensibilités et d'incertitudes sur les sections efficaces



ZZ-VITAMIN-J/COVA : bibliothèques de matrices de variance – covariance (fission, fusion).

SUSD3D

- Géométries complexes à 1D, 2D, 3D
- Sensibilités-incertitudes aux distributions en (E, Θ) des neutrons émis
- Protection, criticité (fusion, fission)

Exemples d'analyses par SUS3D

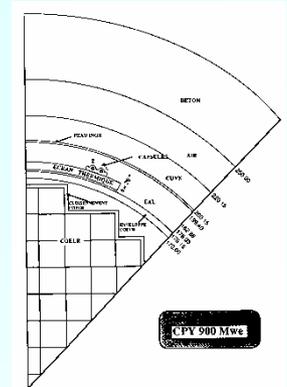
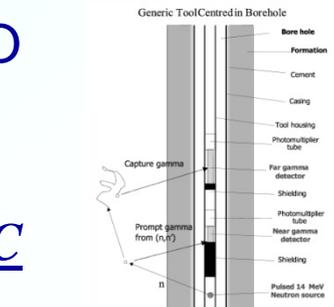
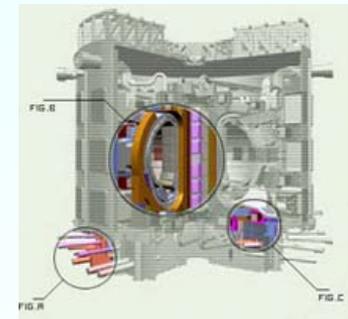
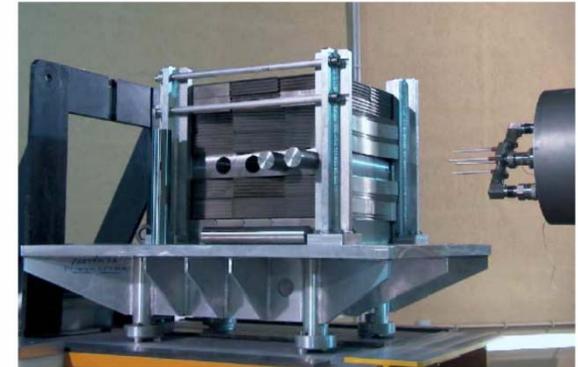


Figure 4-1: Géométrie REP-CPY

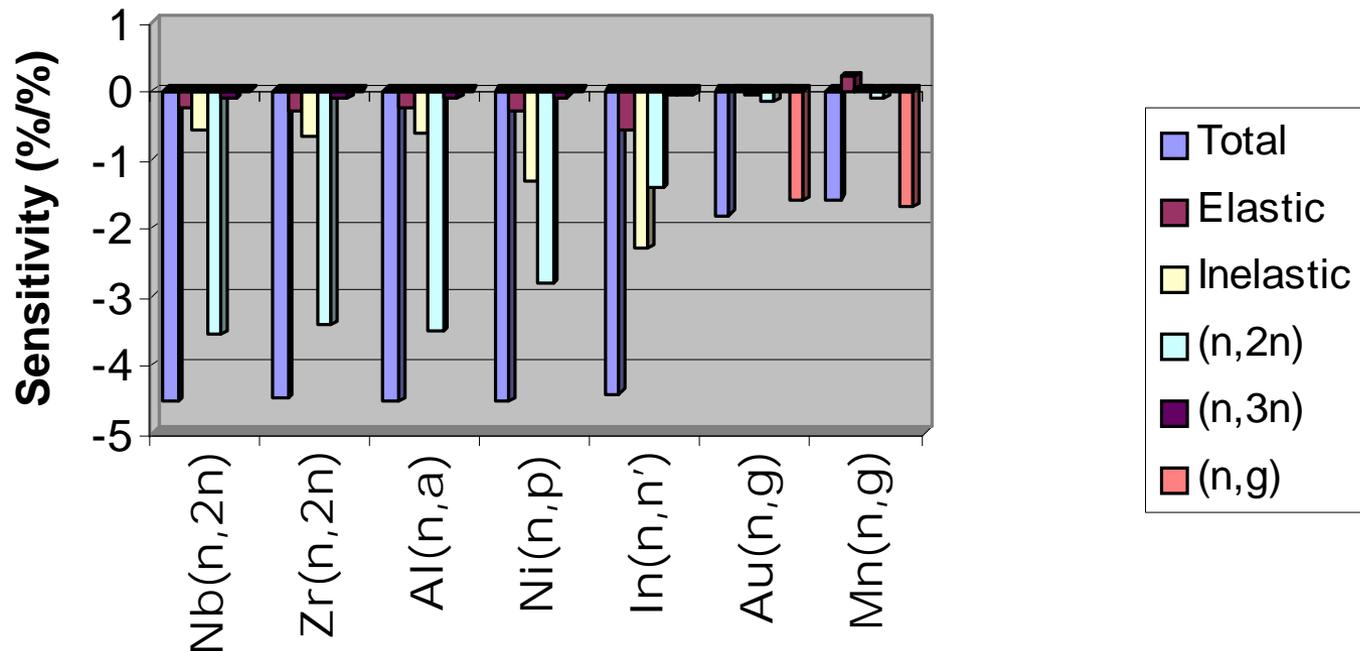


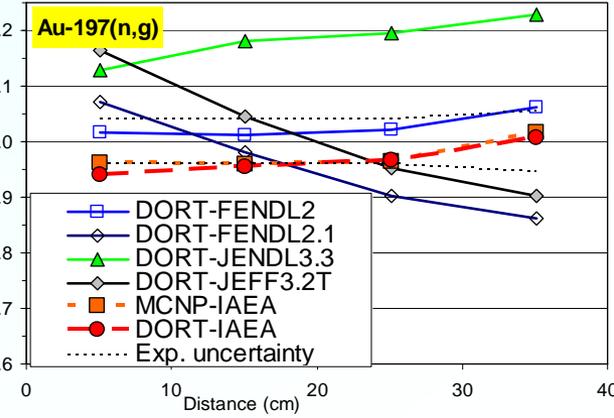
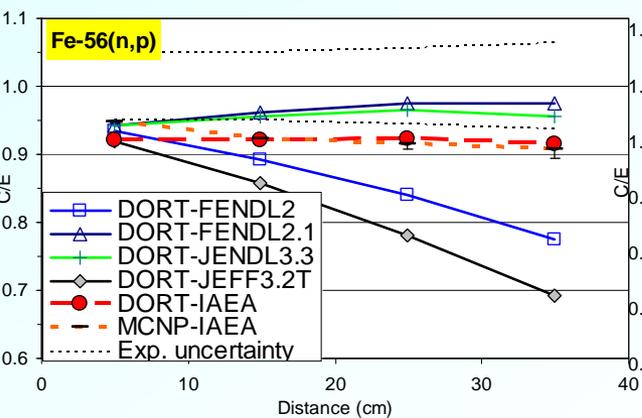
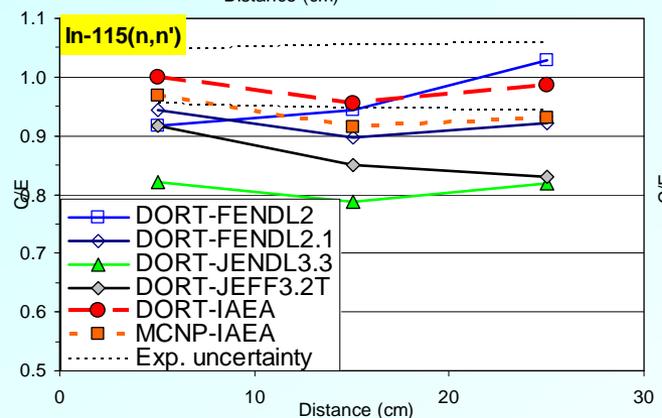
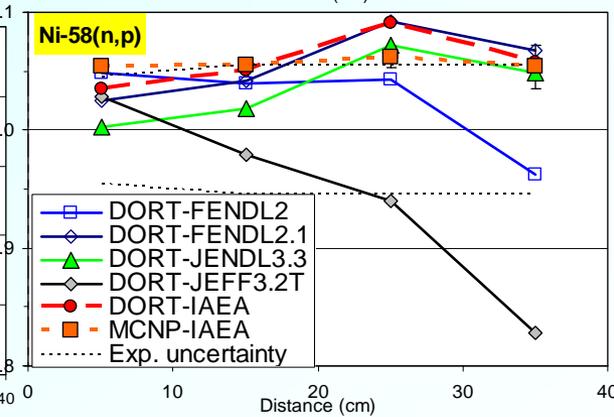
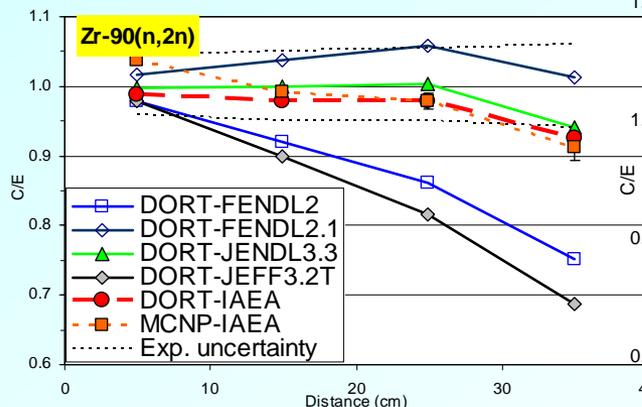
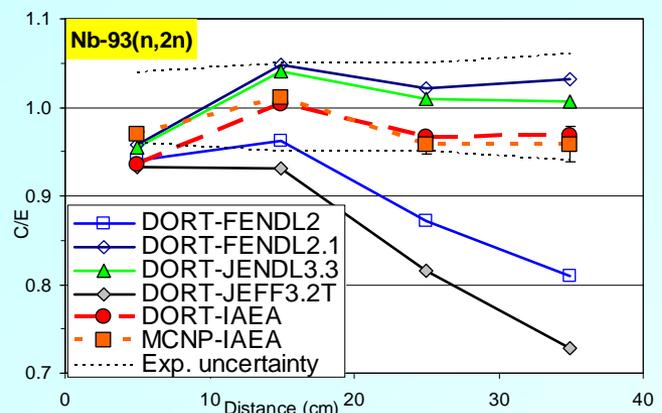
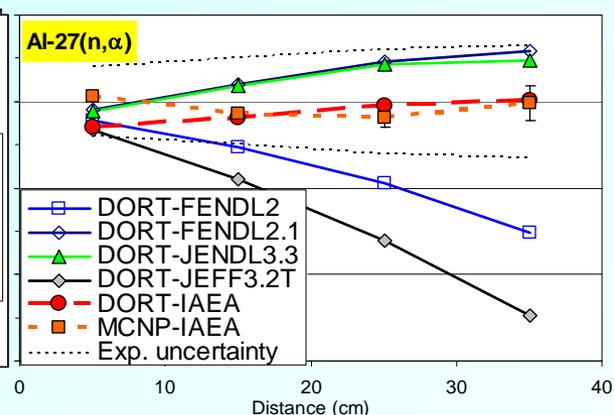
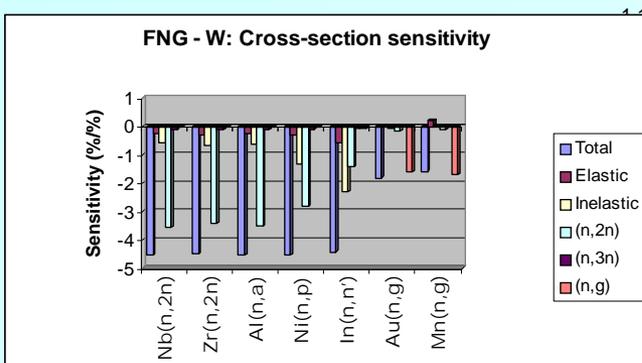
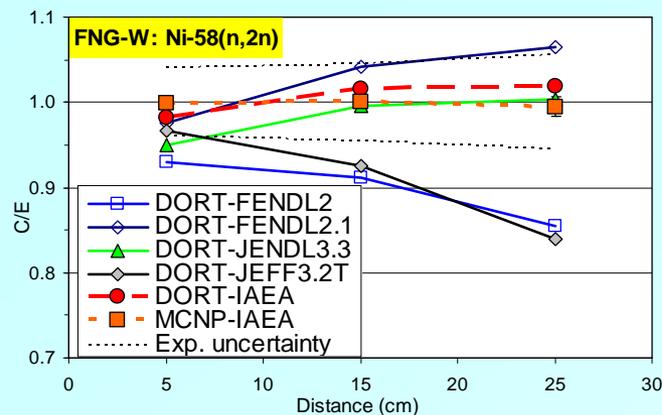
- Surveillance des cuves sous pression des REP : l'incertitude sur le flux et les taux de réaction dans les capsules de surveillance et dans la cuve, l'estimation des marges de sûreté, la **durée de vie des centrales**
- Expériences intégrales pour surveillance des cuves :
 - ASPIS (1D, 2D), VENUS-3 (3D)
- Expériences de protection pour le réacteur à fusion :
 - 6 expériences FNG, Frascati : **validation des sections efficaces** du Fe, SiC, W, Be, Pb et de la **production de tritium** dans les éléments HCPB et HCLL;
- Expériences critiques :
 - thermiques (KRITZ-2, VENUS-2) et rapides (SNEAK-7);
- Puits de pétrole – C/O logging : sensibilité du rapport C/O (gamma) aux sections efficaces
- BNCT : optimisation du faisceau de neutrons
- Validation d'une méthode de sensibilité/incertitude basée sur M/C : (benchmark de temps de vol avec des sphères de fer)

Benchmark FNG-tungstène : Sensibilités aux sections efficaces du W (%/%)

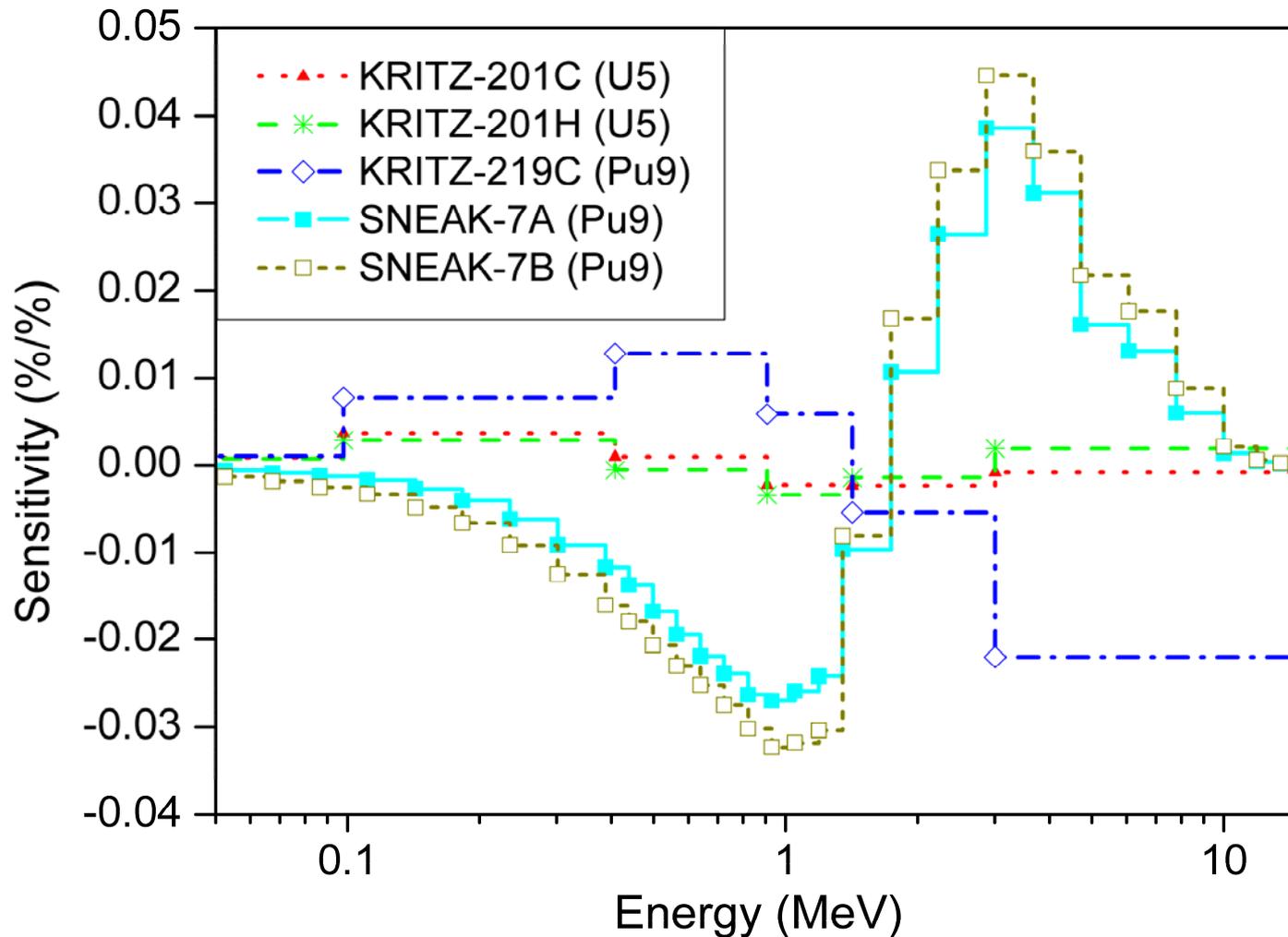


FNG - W: Cross-section sensitivity





Sensibilités normalisées aux spectres de fission



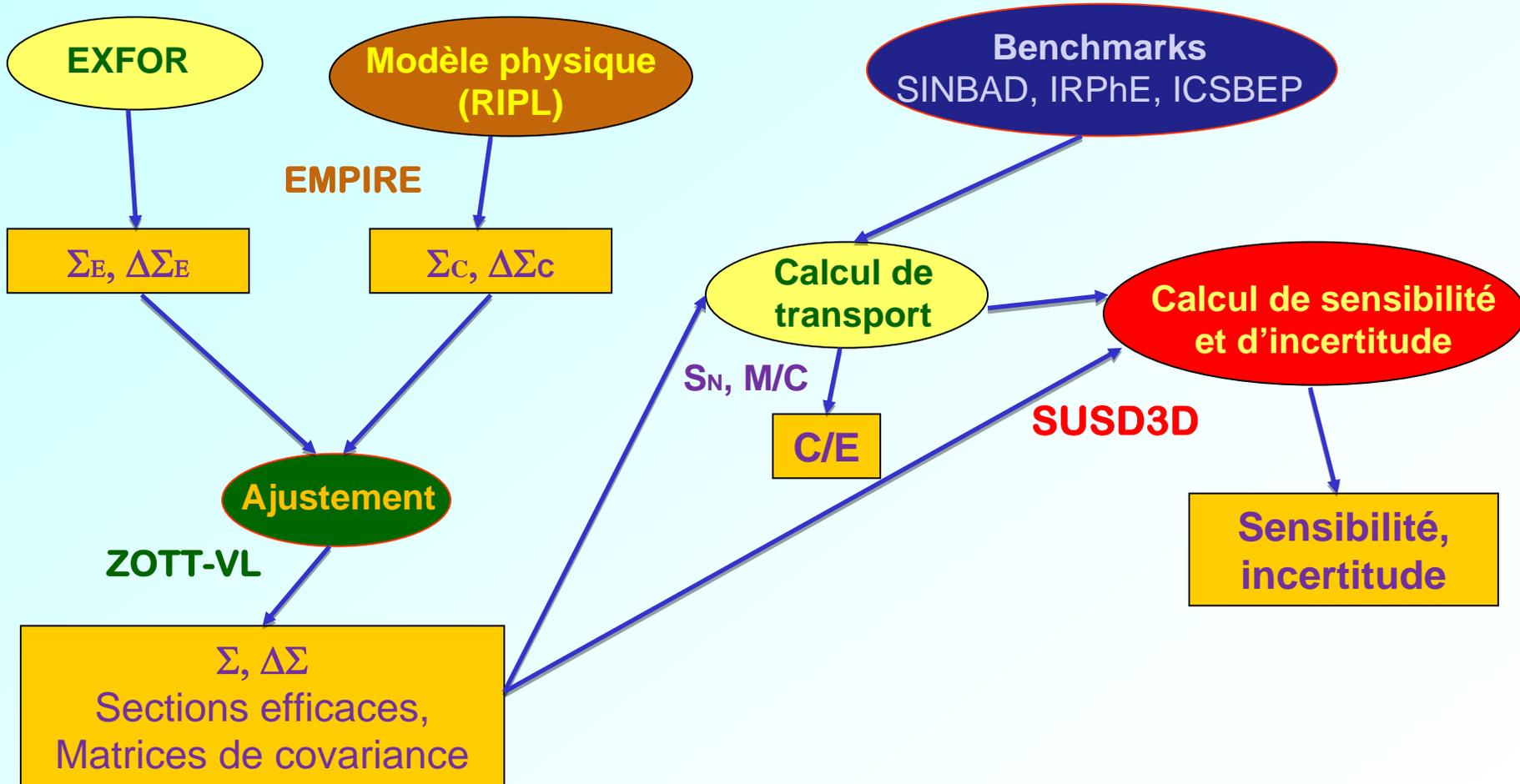
Analyses de sensibilité et d'incertitude : participation dans les projets de l'AEN/OCDE

- **UAM (Uncertainty Analysis in Modeling, E. Sartori)** : élargir les analyses d'incertitudes à la modélisation couplée **neutronique - thermo hydraulique d'un réacteur REP. Propagation des incertitudes à partir des données de base, incertitudes d'ingénierie**, application à une série d'expériences intégrales;
- **Comparaison des performances des différents codes de calcul de sensibilité et d'incertitude** – benchmark SNEAK (AEN/CNAM/IPN-Orsay);
- **WPEC (Working Party on Evaluation Cooperation)** : matrices de covariances, sensibilités, expériences intégrales, ajustement (**SG33: Methods and issues for combined use of integral experiments and covariance data**);
- **GANDR** : Chaîne d'outils pour **évaluer la pertinence d'une nouvelle expérience intégrale proposée**. Facilitera le choix parmi différentes propositions de mesures;
- **CONRAD – EURADOS (CE)** : Vérification de la bonne utilisation des codes dans la radioprotection et la dosimétrie; Encourager l'utilisation des analyses de sensibilité et d'incertitudes.

GANDR - Sensitivity-Based Global Assessment of Nuclear Data Requirements

- Projet AIEA (D. Muir)
- Chaine d'outils pour **évaluer la pertinence d'une nouvelle expérience intégrale proposée**. Facilitera le choix parmi différentes propositions de mesures.
- Basé sur les **analyses de sensibilité et d'incertitude**.
- **Une évaluation globale et cohérente des matrices de covariance.**

Schéma du système GANDR



SINBAD - expériences intégrales



- ❑ Réacteurs de fission, dosimétrie de surveillance des cuves REP (42)
- ❑ Fusion (27)
- ❑ Accélérateurs (15)
- Validations des codes de calculs, encadrement des experts.
 - Calcul doit reproduire l'expérience aussi fidèlement que possible, évitant des approximations non nécessaire;
 - Comparer les calculs avec des mesures 'propres'.
- Amélioration des évaluations des sections efficaces modernes :
 - nouvelles expériences de haute précision
 - interprétation plus fine des expériences existantes.

Conclusions et perspectives

- Calculs de sensibilités et d'incertitudes (SI) utilisés pour :
 - conception de nouveaux systèmes (GEN-IV, ITER, ADS),
 - analyses de sûreté, de fiabilité et d'optimisation des systèmes
 - évaluations des données nucléaires
 - applications médicales etc.
- Analyses SI indiquent la **représentativité des expériences intégrales** pour la conception des nouveaux réacteurs.
- Travaux futurs :
 - ⇒ Réévaluation cohérente d'une grande partie de **matrices de covariances**
 - ⇒ **Développement de la méthodologie de calcul de matrices de covariances, incertitudes dues aux méthodes et modèles physiques**
 - ⇒ **Évaluation des matrices pour les distributions énergétiques et angulaires des neutrons émis**
 - ⇒ **Modélisation plus fine des expériences intégrales**
 - ⇒ **Bonne utilisation des codes - formation du personnel.**