

Données nucléaires dans les codes de neutronique et de radioprotection

Cédric Jouanne
DEN/DM2S/SERMA/LLPR

Plan



1. Contexte général
2. Bibliothèque / évaluation
3. Criticité : Tables de probabilité
4. Criticité : problématique température
5. Protection : problématique anisotropie
6. Monte Carlo évoluant
7. Incertitudes / Variance-covariance
8. Impact sur activation

Activités SERMA



Développement codes :

- neutronique (APOLLO2, APOLLO3, TRIPOLI-4)
- protection (TRIPOLI-4, NARMER)
- évolution (DARWIN2, MENDEL)

Études :

- criticité (réactivité, REP, nouveaux concepts...)
- protection (activation, flux neutron sur cuves, échauffements...)

Traitement données nucléaires pour codes :

- Production bibliothèques par GALILEE pour codes CEA
- Traitement tables de probabilité (CALENDF)
- Développement TREND

Quelles données nucléaires ?



Structure : masse, abondance
 λ , modes de décroissance, énergies

Bibliothèques évaluations pour neutrons :
JEFF, ENDF/B, JENDL, TENDL

300-400 nucléides
2000 TENDL (covariances et production γ complètes)

Interaction: σ , $\sigma(\theta', E')$ -> Traitement
production de particules (gamma...)

Quelles représentations pour les sections efficaces :
ponctuelle, multi-groupe et tables de probabilités

Quelles données nucléaires ?

CEA
Équation de Boltzmann (transport):

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\text{div}(\vec{\Omega}\phi) - \sigma_t \phi + Q + \int \sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(\Omega', E')$$

Équation de Bateman (évolution) :

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} N_j (\lambda_j C_{ji} + \phi \sigma_j D_{ji}) - N_i (\lambda_i + \phi \sigma_i)$$

Puissance résiduelle :

$$PR(t) = \sum_{i,k} \lambda_{i,k} N_i(t) \bar{E}_{i,k} + \sum_i \lambda_i N_i(t) \bar{E}_{\gamma,i}$$

Représentation des sections efficaces



Ponctuelle : $[E, \sigma(E)]$

Multi-groupe :

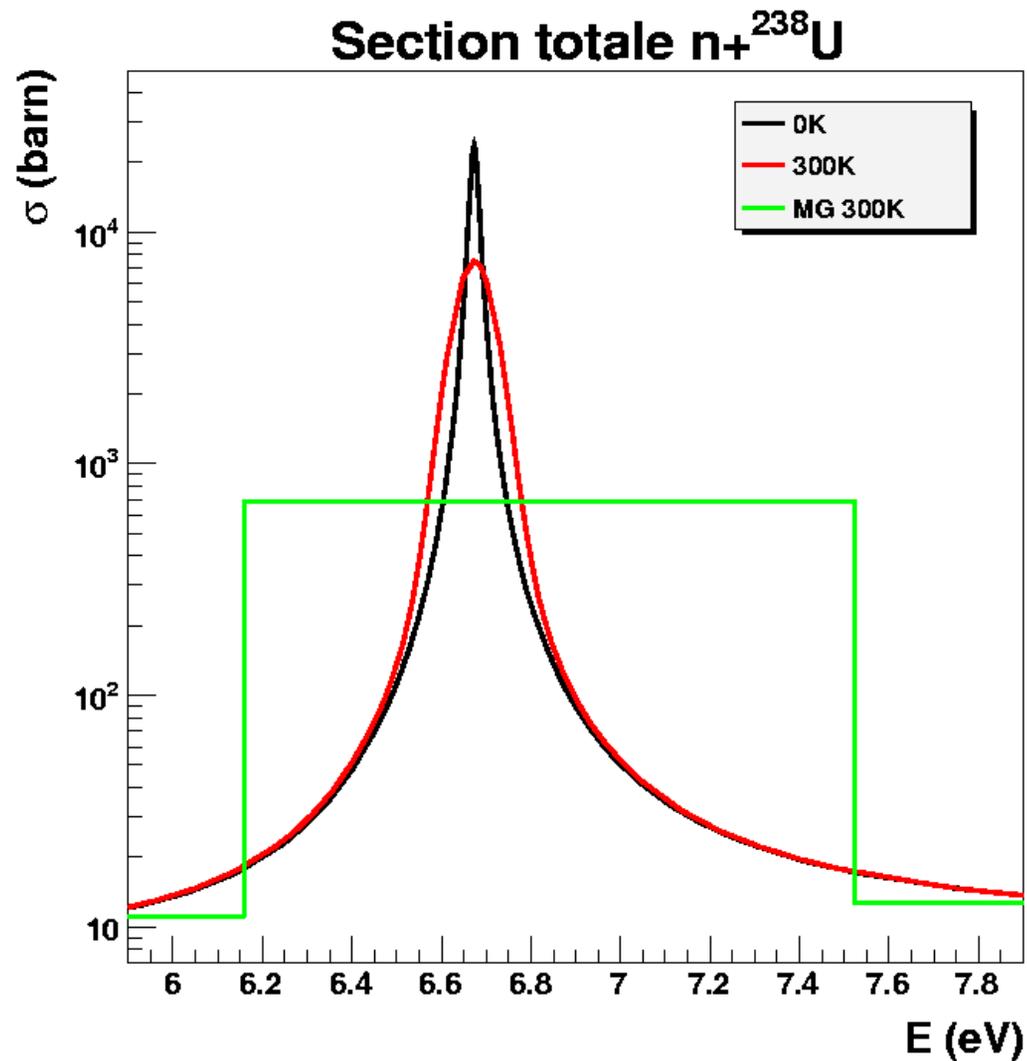
$$\bar{\sigma}_g = \frac{\int_{E_g}^{E_{g+1}} \sigma(E) \Phi(E) dE}{\int_{E_g}^{E_{g+1}} \Phi(E) dE}$$

$\Phi(E)$: Flux de pondération

E_{g+1} et E_g : bornes supérieure et inférieure du groupe g

Utilisée dans calculs déterministes (criticité et évolution)

Représentation des sections efficaces



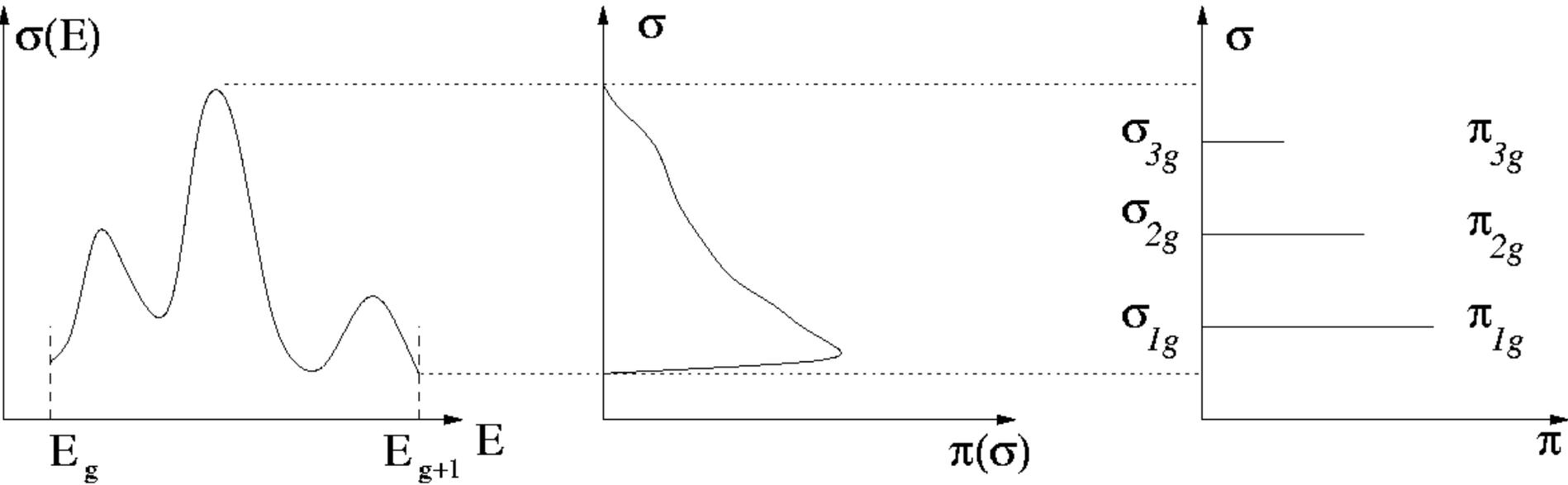
Tables de probabilités

Mise en groupes améliorée



Dans un groupe g , chaque valeur σ_{ig} est présente avec une probabilité π_{ig} .

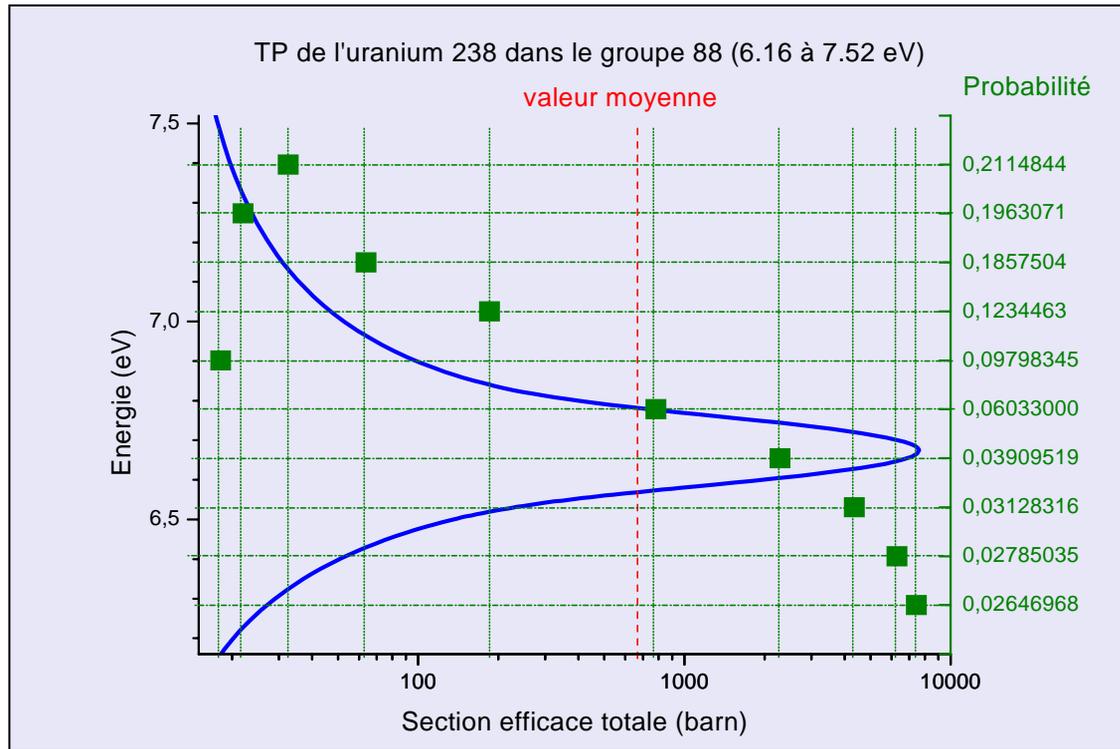
On définit une table de probabilité (σ_{ig}, π_{ig})



$$I = \frac{1}{\Delta E} \int_g f(\sigma(E)) dE = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f(\sigma) p(\sigma) d\sigma = \sum_i p_i f(\sigma_i)$$

$$\mathcal{M}_n = \frac{1}{\Delta E} \int_g \sigma^n(E) dE = \int_g \sigma^n p(\sigma) d\sigma$$

Tables de probabilités

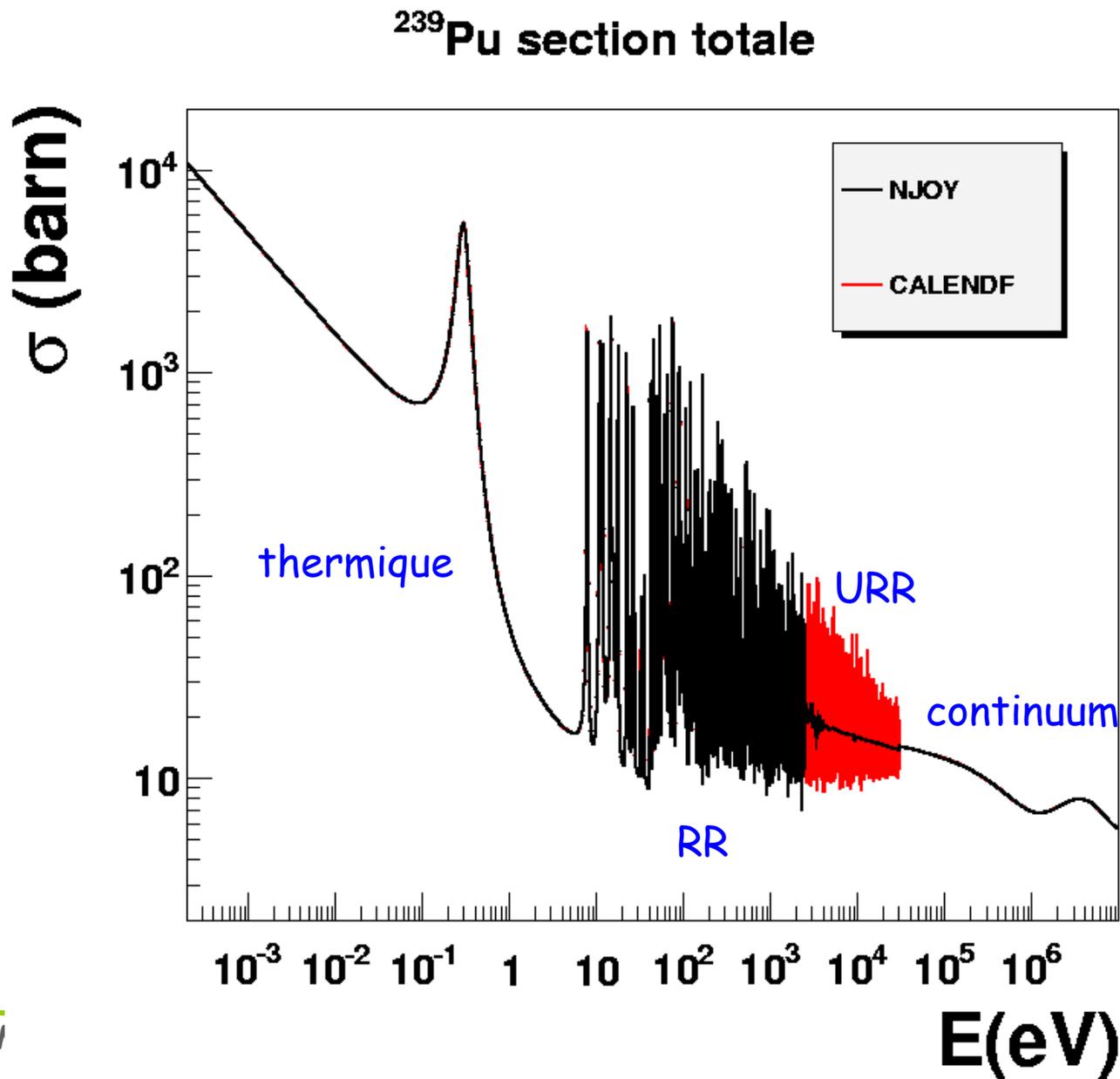


Calculées par CALENDF (P. Ribon SERMA)

Pour MCNP : module ACER du code NJOY

SERMA : développement dans TREND

Domaines énergétiques



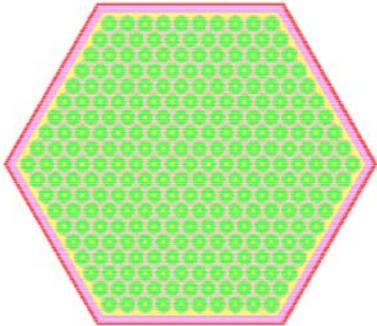
Impacts des tables de probabilité



Criticité pour un réacteur N4

$$\Delta k_{\text{eff}} = 99 \text{ pcm} \quad 100 \text{ pcm entre bibs}$$

Assemblage rapide (RNR)



$$\Delta k_{\text{eff}} = 500 \text{ pcm}$$

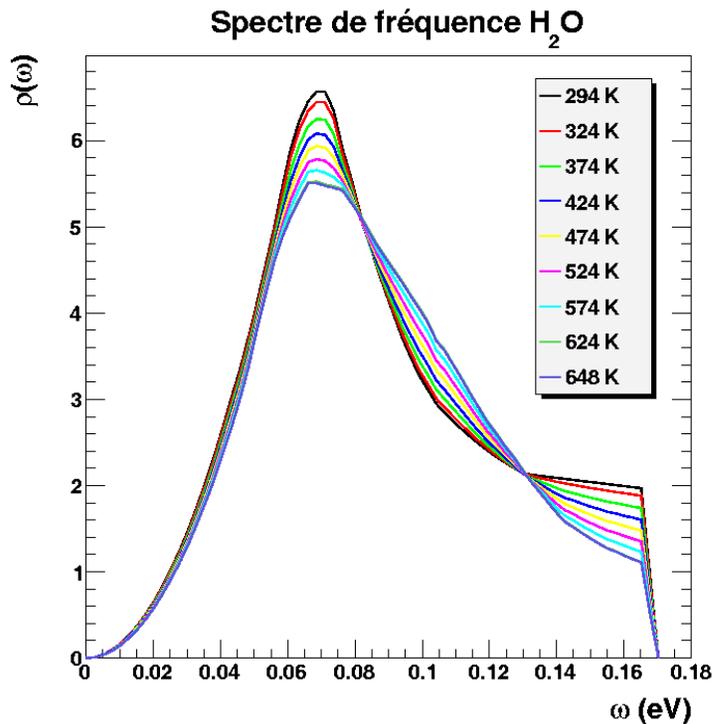
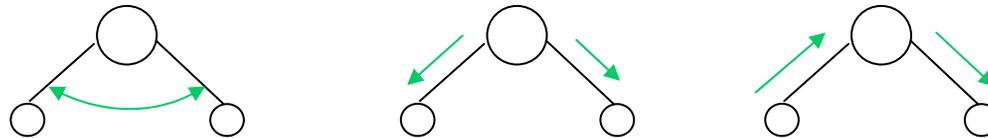
Combustible métallique enrichi en U5 (20%), spectre rapide

$$\Delta k_{\text{eff}} = 400 \text{ pcm}$$

Thermalisation, problème de température



Modes vibratoires d'une molécule d'eau



Températures disponibles (K) :

293.6, 323.6, 373.6, 423.6, 473.6,
523.6, 573.6, 623.6, 647.2, 800, 1000

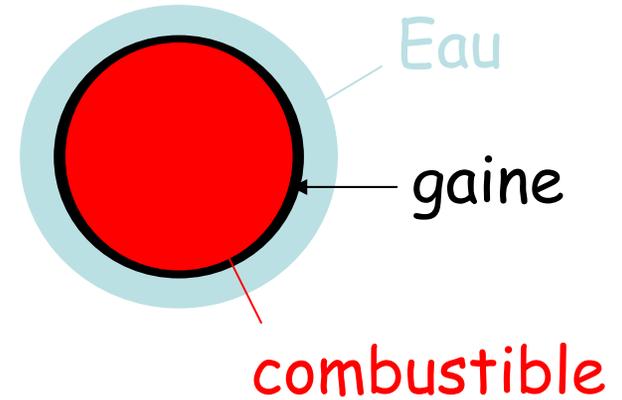
Problème de température



Cellule UOX + eau

Calcul à 574 K pour tous les milieux

Influence de la température de H1_H2O



T(K)	524	574	624	574 (gaz libre)
K_{eff}	1.01069	1.01330	1.01554	1.02459
σ (pcm)	7	7	9	7

5 pcm/K

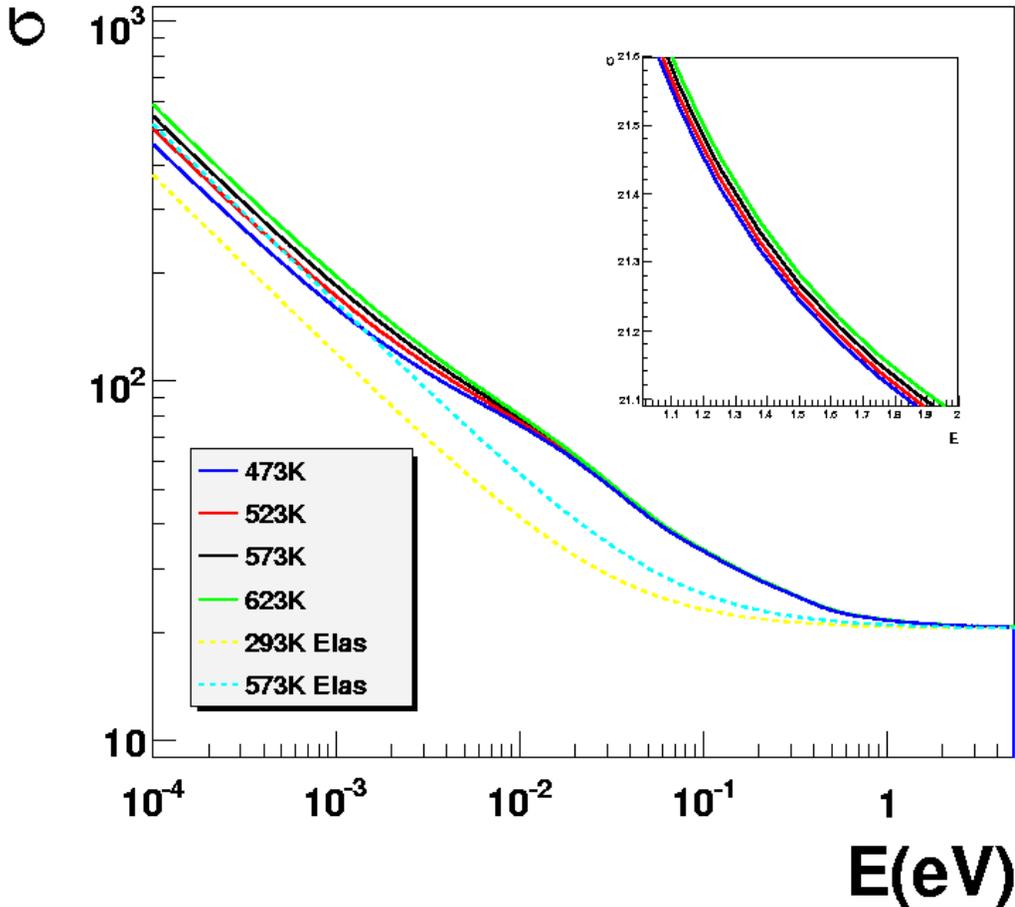
Cœur REP :

Calcul 574K : 1.00149 (6)
Calcul 574K (H1_H2O 624 K) 1.00048 (7)

2 pcm/K

Section inélastique incohérente

inel incoh h1 h2o



$$\sigma(E' \rightarrow E, \mu_0) \propto \sqrt{\frac{E}{E'}} e^{-\beta/2} S(\alpha, \beta)$$

$$\alpha = \frac{E' + E - 2\mu_0 \sqrt{EE'}}{AkT}$$

$$\beta = \frac{E - E'}{kT}$$

Interpolation de la section Inélastique incohérente



rappel

Cellule UOX :

T(K)	524	574	624	574 _{gl}
K _{eff}	1.01069	1.01330	1.01554	1.02459
σ (pcm)	7	7	9	7

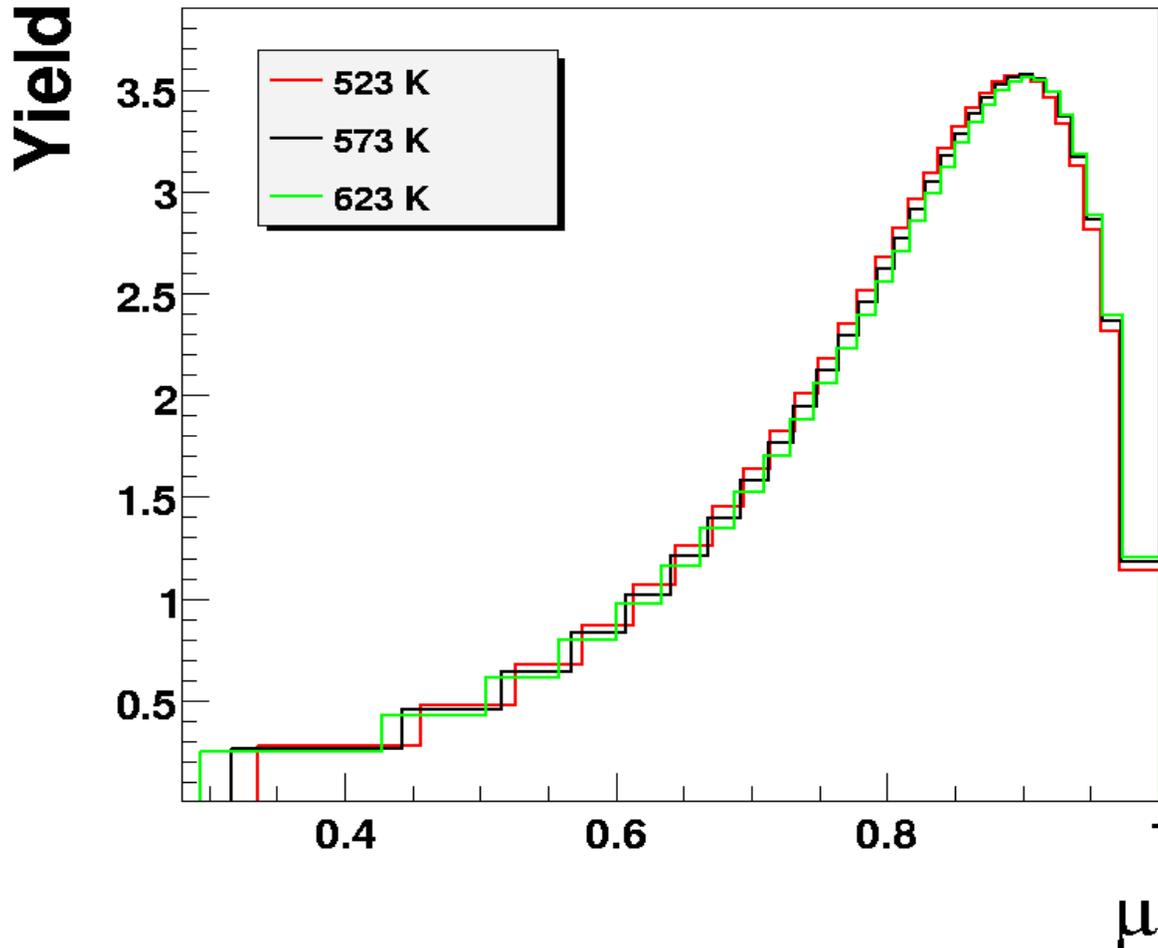
Calcul σ_{inel} (574K) + $\sigma(E',\theta')$ à 524K : 1.01079 (7)

Calcul σ_{inel} (574K) + $\sigma(E',\theta')$ à 624K : 1.01564 (7)

Faible impact de la section efficace

Anisotropie de la loi de renvoi angulaire

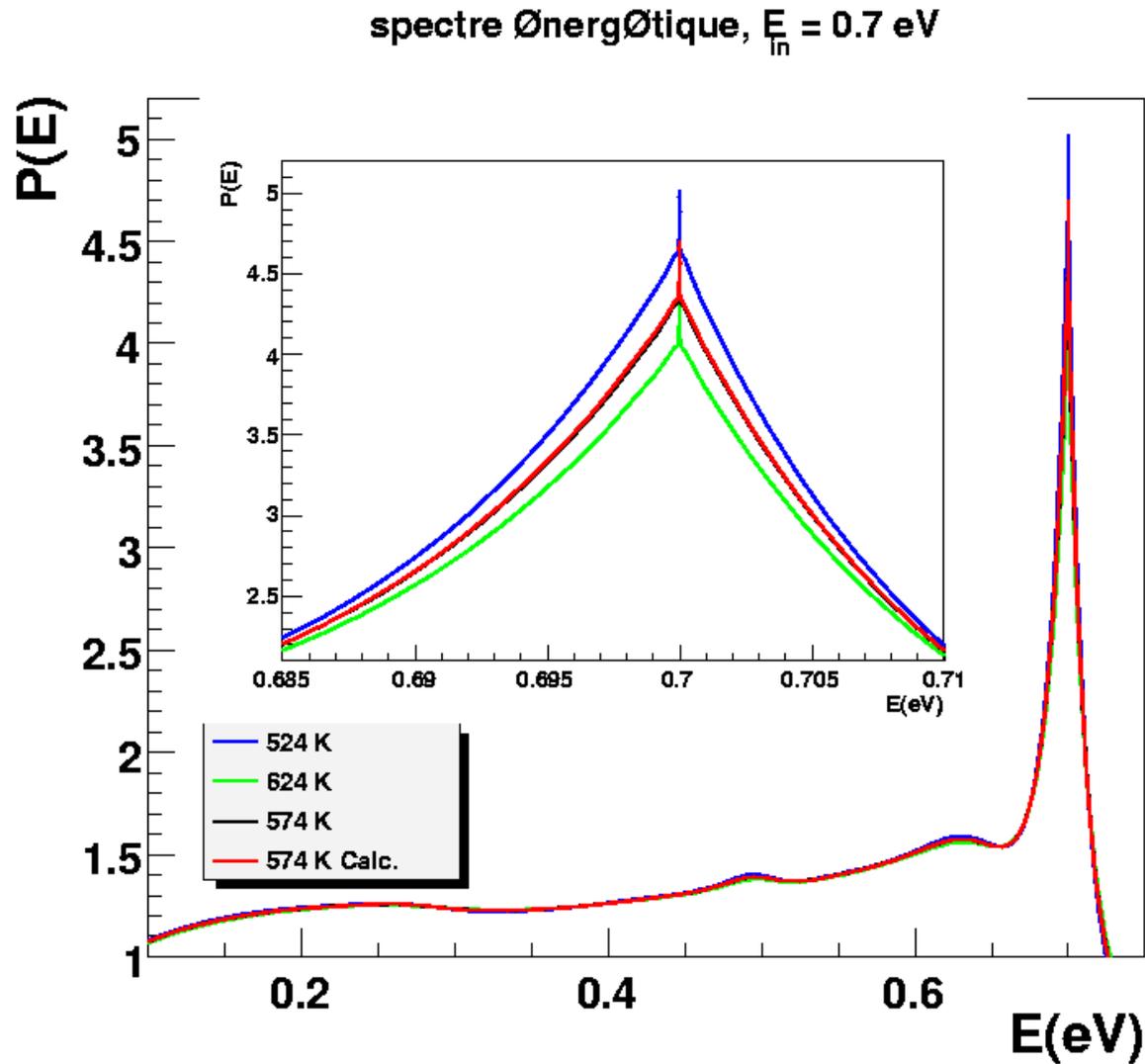
Anisotropie



Faible dépendance
de la loi de renvoi
angulaire

→ Indépendance
dans l'étude

Loi de renvoi énergétique



Influence de la loi de renvoi énergétique



Cellule UOX :

rappel

T(K)	524	574	624	574 _{gl}
K _{eff}	1.01069	1.01330	1.01554	1.02459
σ(pcm)	7	7	9	7

Nouveau calcul (574 Interpolé) : 1.01361 (7)

Cœur N4 :

T(K)	574	624	574 _{interp}
K _{eff}	1.00149	1.00048	1.00151
σ(pcm)	6	7	5

Éléments liés : problème de la température



Impossibilité d'interpoler $S(\alpha, \beta)$

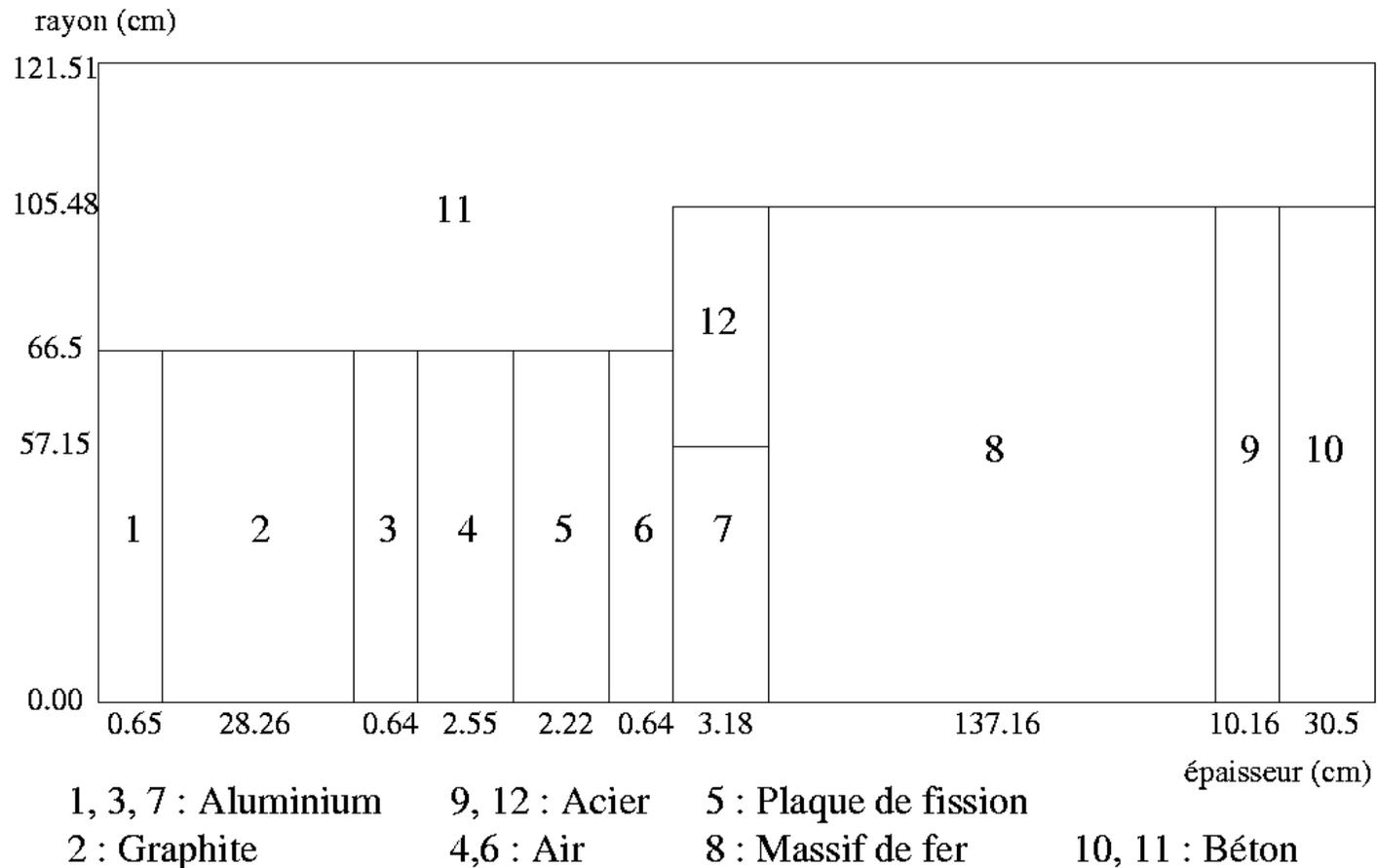
Interpolation loi de renvoi en énergie et angulaire

Discussion avec Laboratoire Léon Brillouin pour complément de données en températures

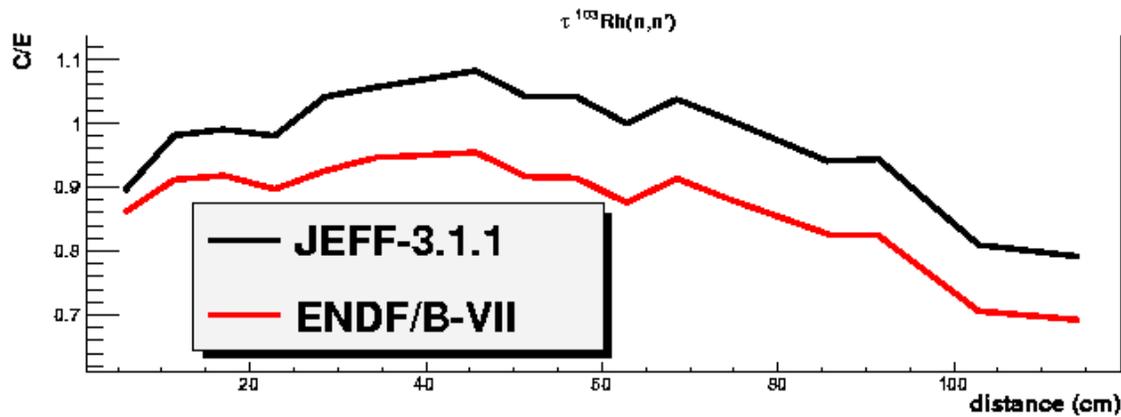
Protection : problème anisotropie



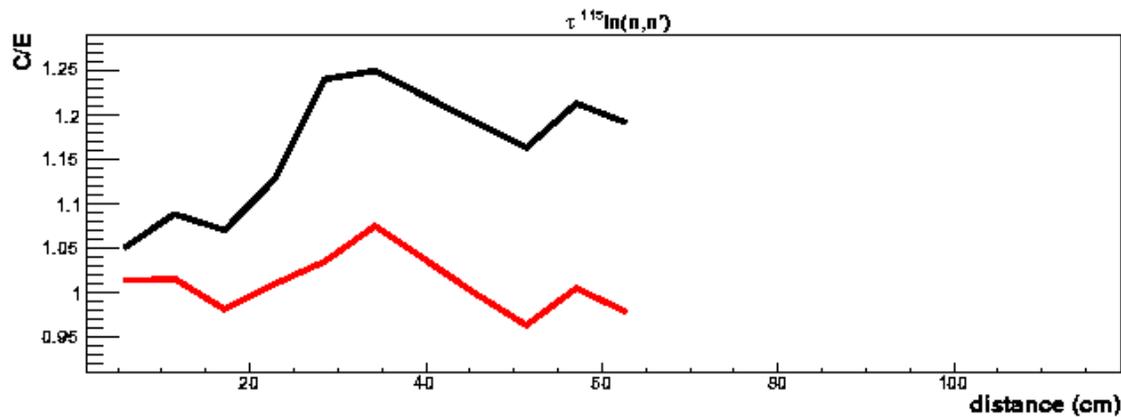
Propagation des neutrons dans un massif d'acier



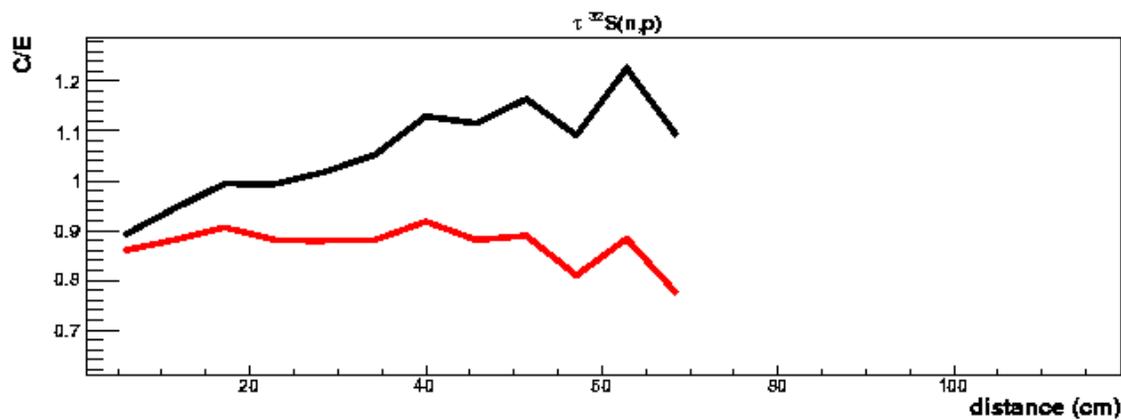
Comparaisons calcul/expérience



Impact ^{56}Fe



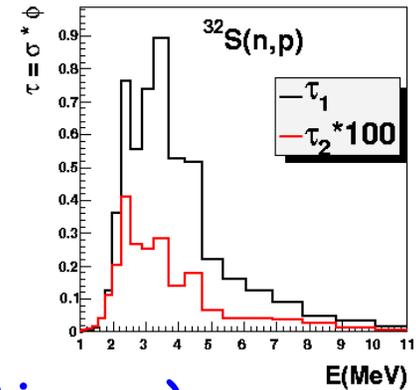
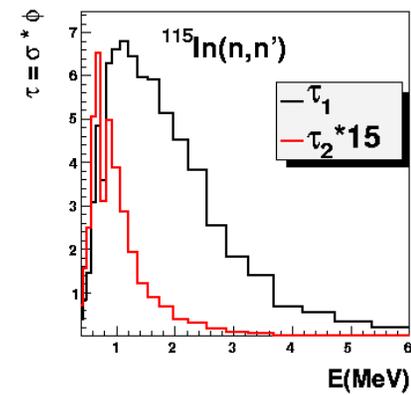
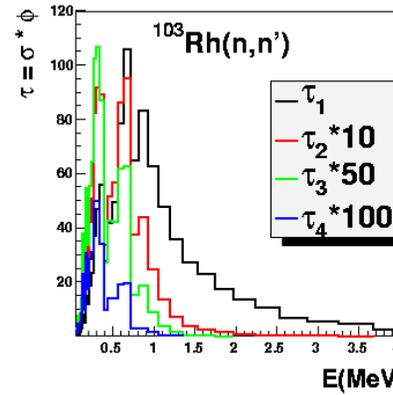
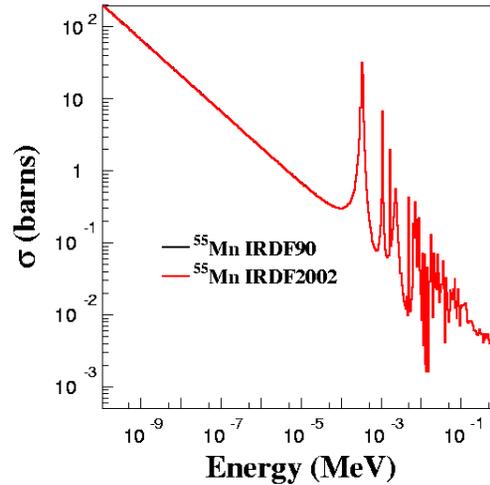
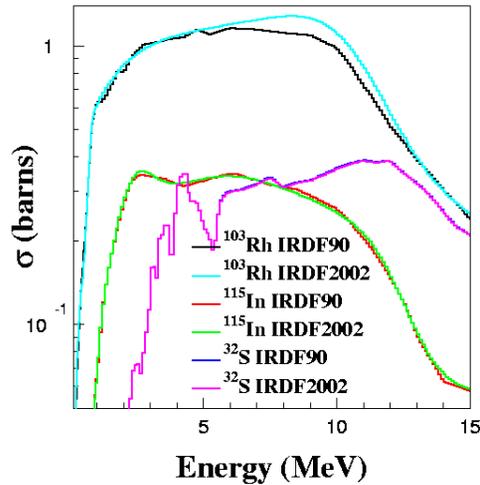
Comparaison ^{56}Fe
JEFF-3.1.1
ENDF/B-VII.0



Origines des écarts C/E

Réponse des dosimètres

Dosimetry IRDF90 / IRDF2002



Sections efficaces (élastique et inélastiques)

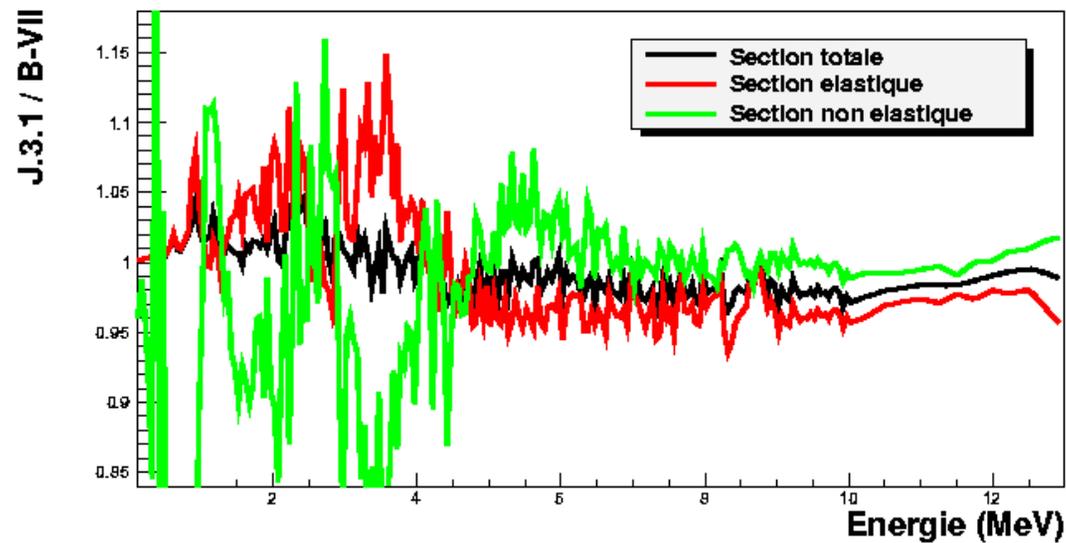
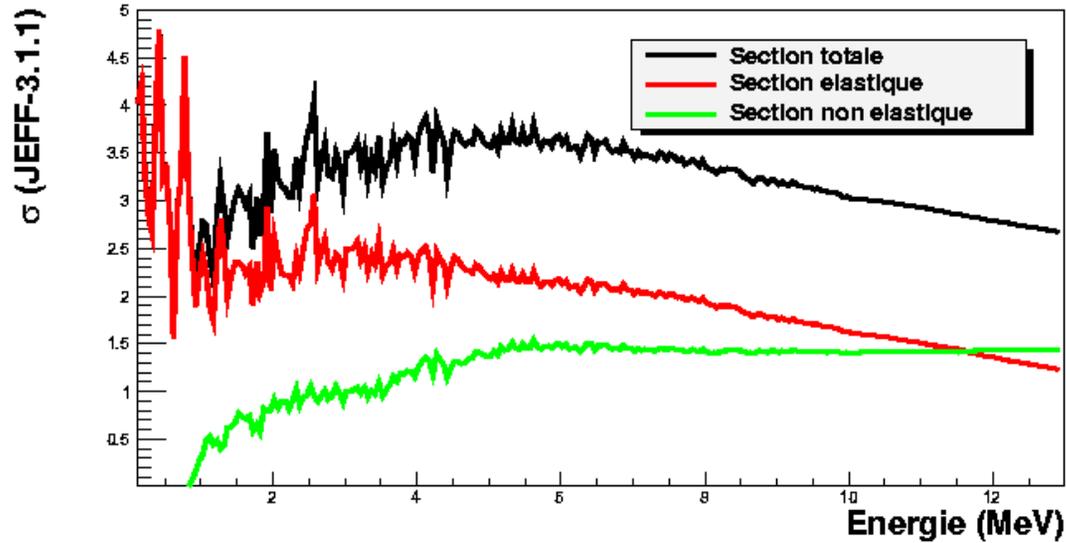
Anisotropies diffusions élastique et inélastiques



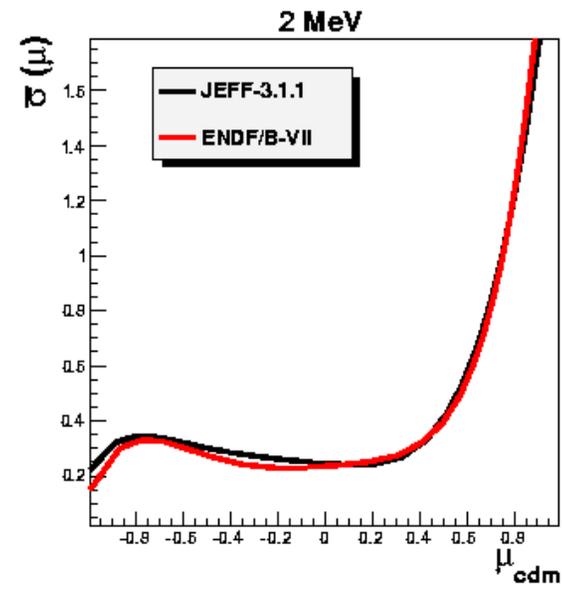
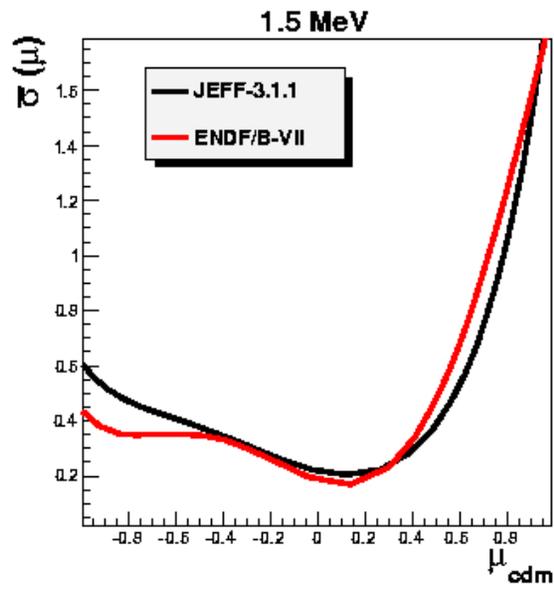
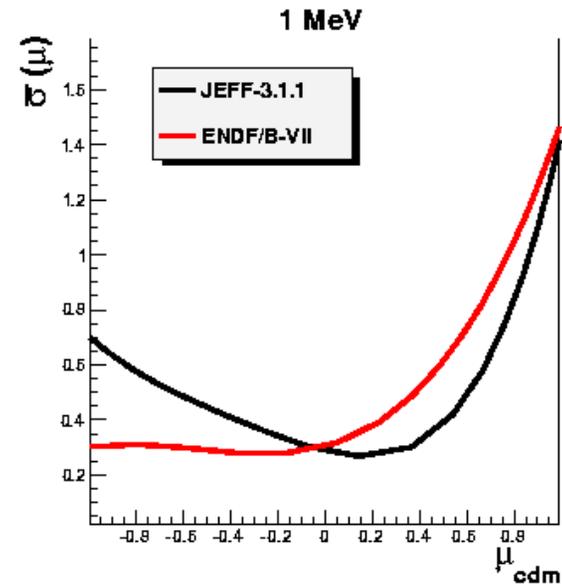
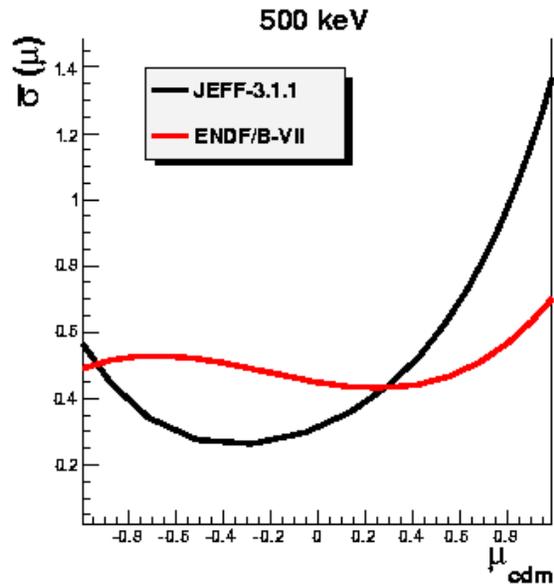
JEFF-3.1.1 : JEFF-3.0 (en provenance de EFF-3.1)
Section élastique = section totale - non-élastique
Anisotropie : EFF-2.4 (TALYS/ECIS)

ENDF/B-VII.0 :
Section de ENDF/B-VI.4 (GNASH)
Anisotropie : combinaison de plusieurs analyses

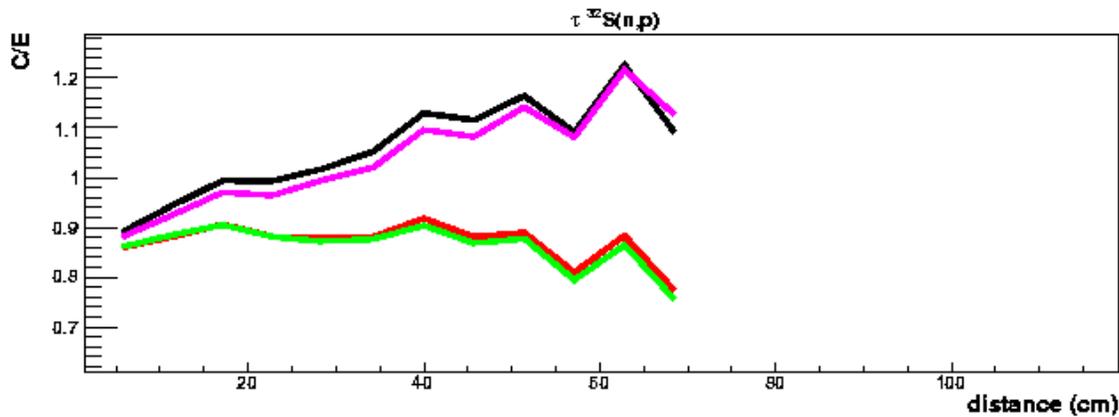
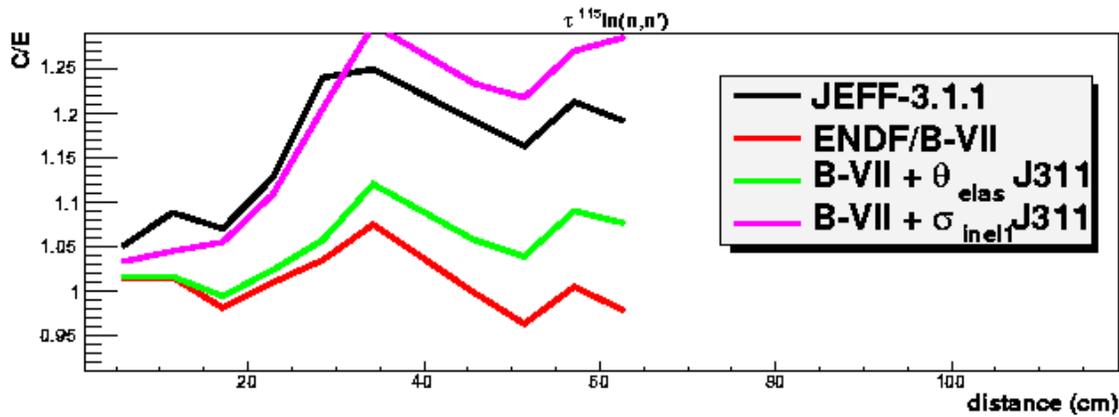
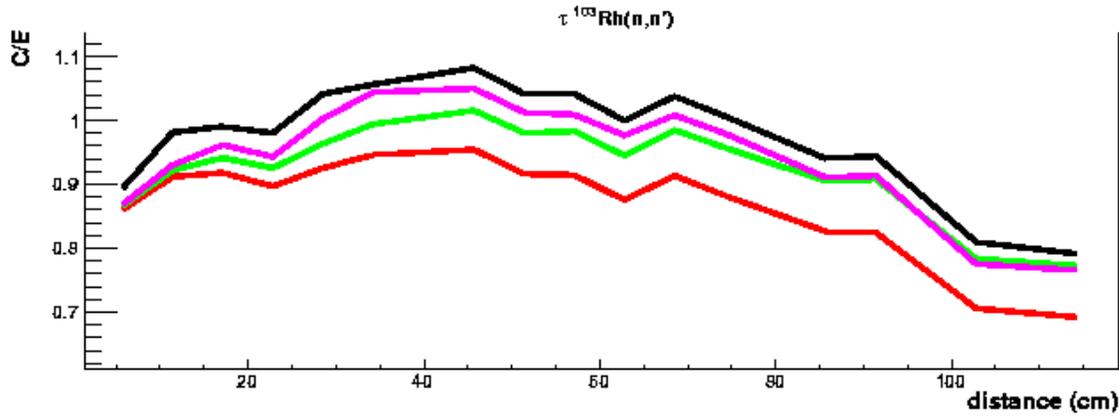
Comparaisons des sections efficaces



Anisotropies de la diffusion élastique

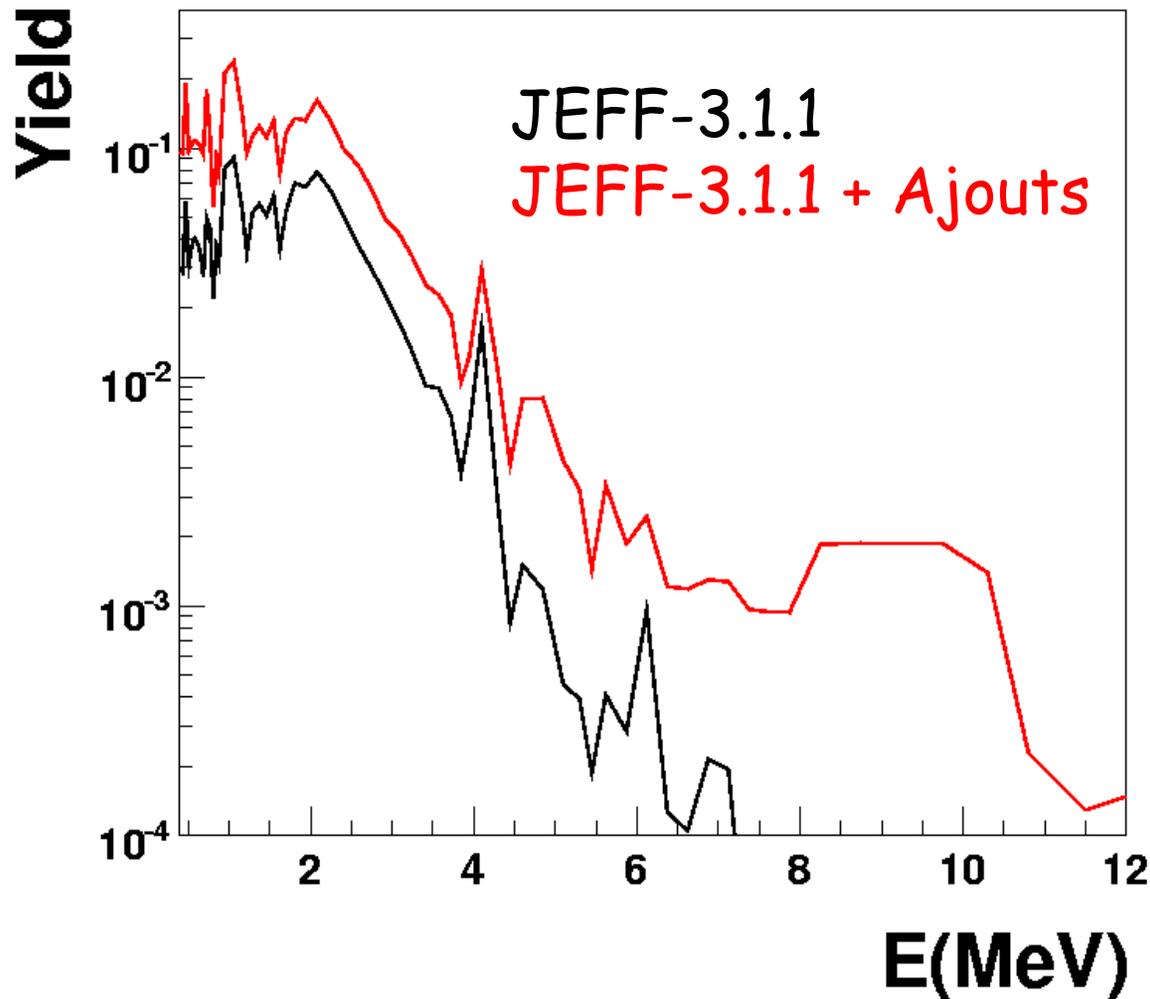


Impacts σ et $\sigma(\theta)$



Protection : production gamma

γ Cell MOX₀ : fuel



Ajouts :

(n, γ)+(n,fission)
sur ^{239,241}Pu

(n, γ) sur Gd

Production / transport gamma



JEFF-3.1.1 : ~110 nucléides avec (n, γ)

ENDF/B-VII.0 : ~130 nucléides avec (n, γ)

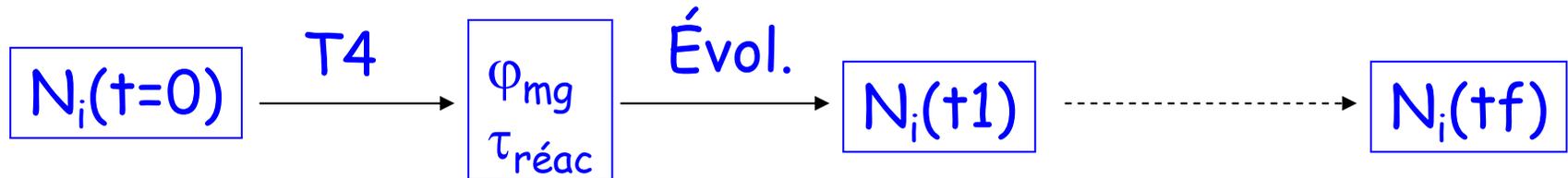
(Bibliothèques avec 380 nucléides)

Colis de déchets : DED 2/3 neutrons 1/3 gamma

Réactions photo-nucléaires : 160 nucléides

Monte Carlo évolutif

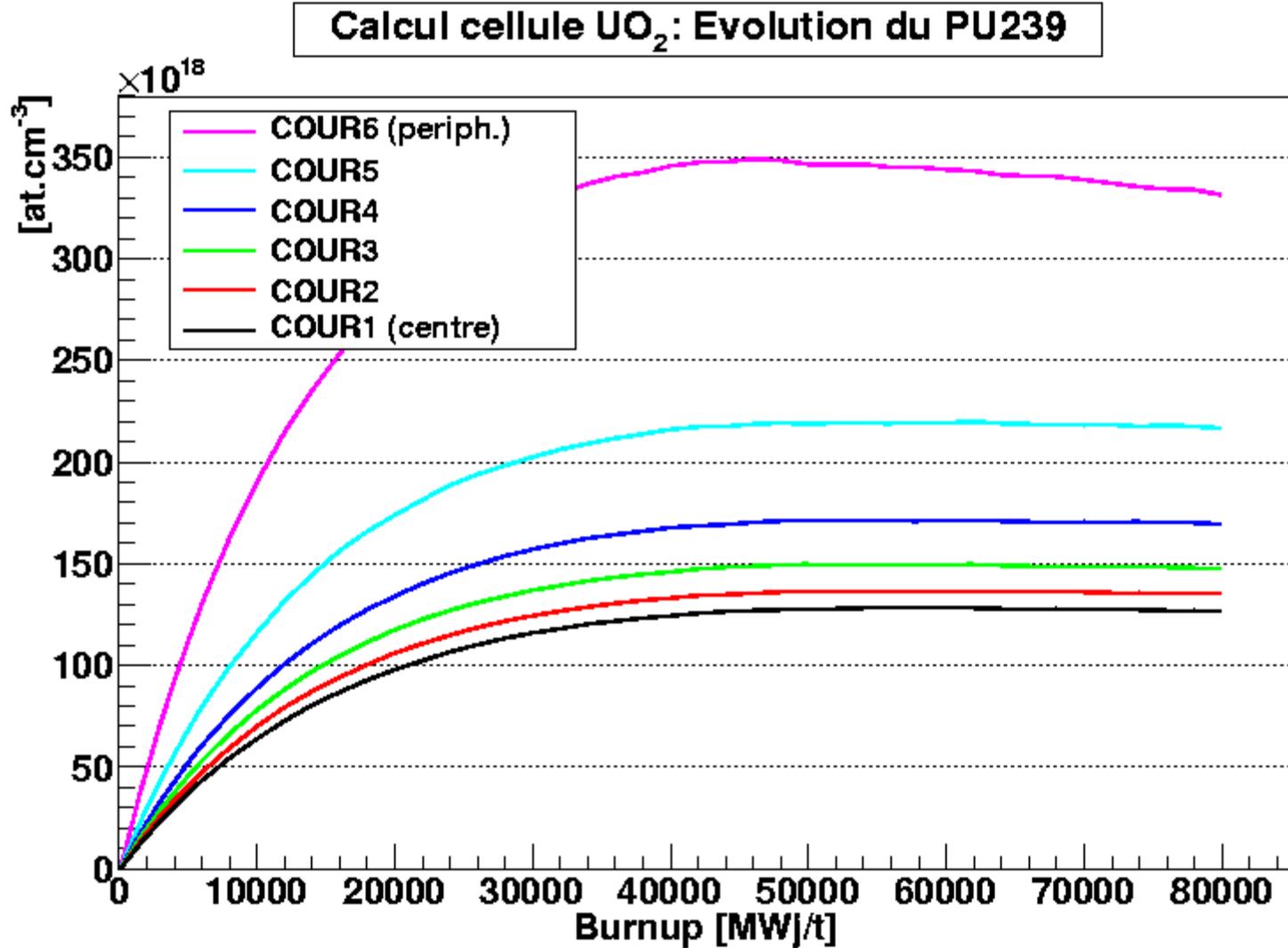
Schéma de principe du MC évolutif



Problématique :

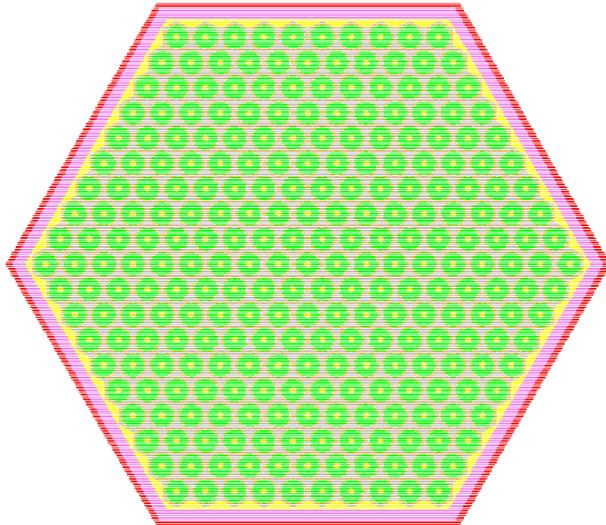
- convergence
- temps de calcul
- traitement des compositions pour flux
- propagation des incertitudes

Monte Carlo évoluant

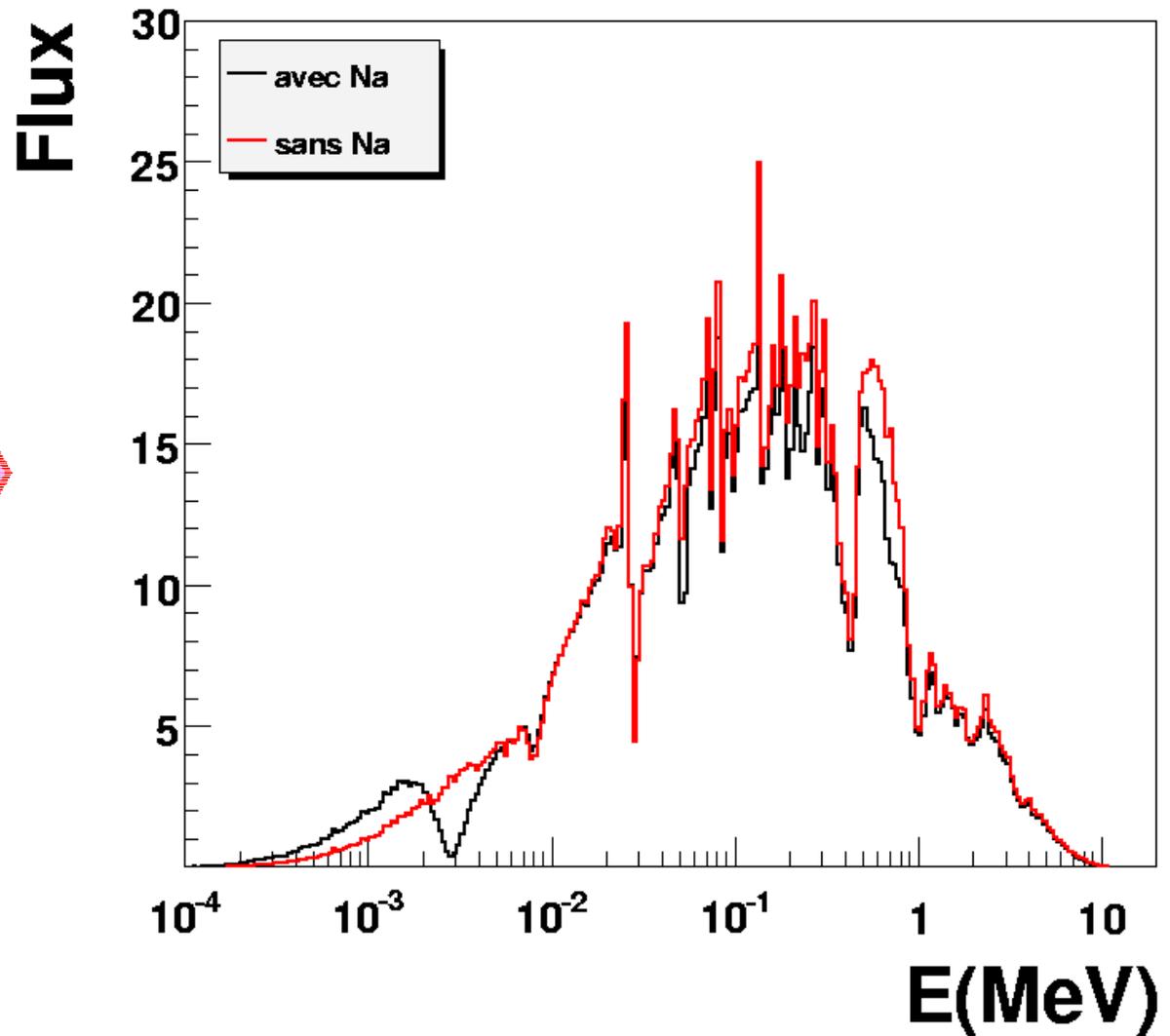


Impact des incertitudes

cea



flux dans MOX



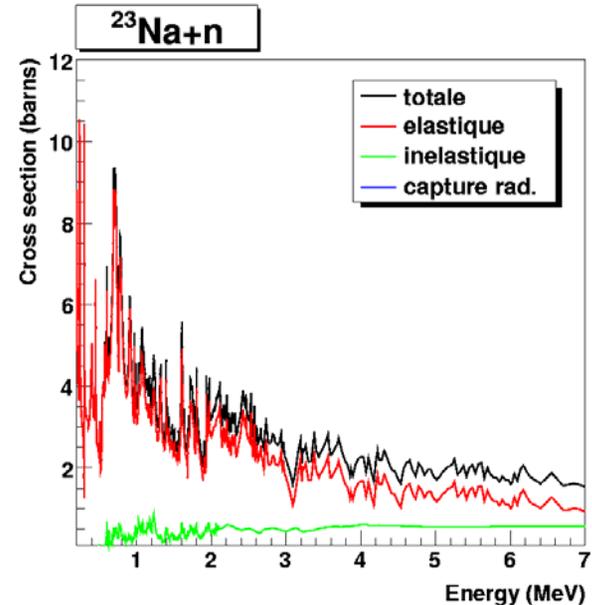
Inélastique ^{23}Na



Incertitudes admises de 20% sur inélastique

2 groupes de 0.5 MeV à 2.23 MeV

Report 50% totale 50% élastique



	$\text{Na}\uparrow$	
	k_{eff}	$\Delta/\text{central (pcm)}$
$\sigma\uparrow$	1.11539 (12)	-177
$\sigma\downarrow$	1.11830 (12)	+114

Variances / Covariances



-Paramètres de résonance

- σ : dans 1 voie de réaction / groupes d'énergie

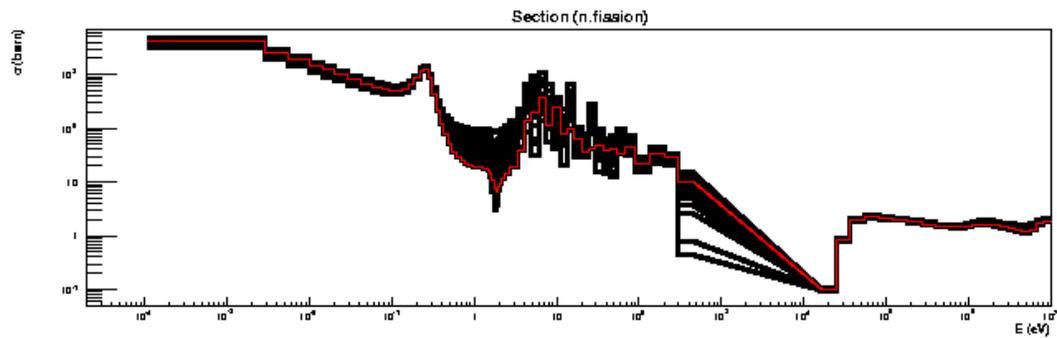
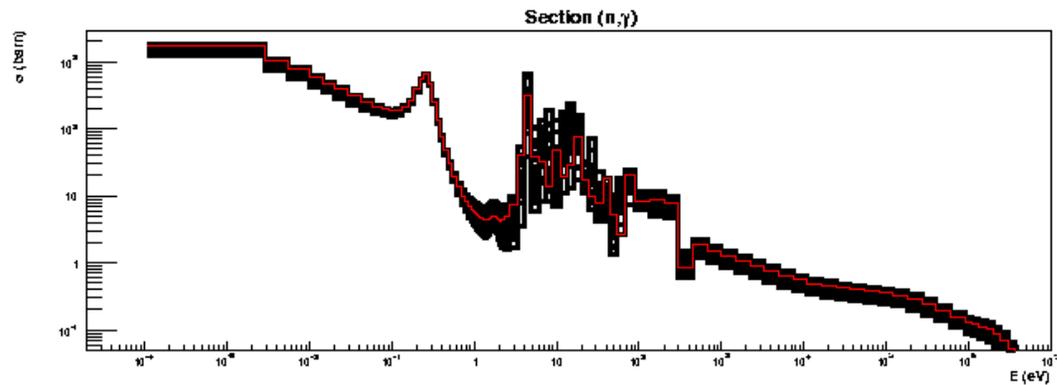
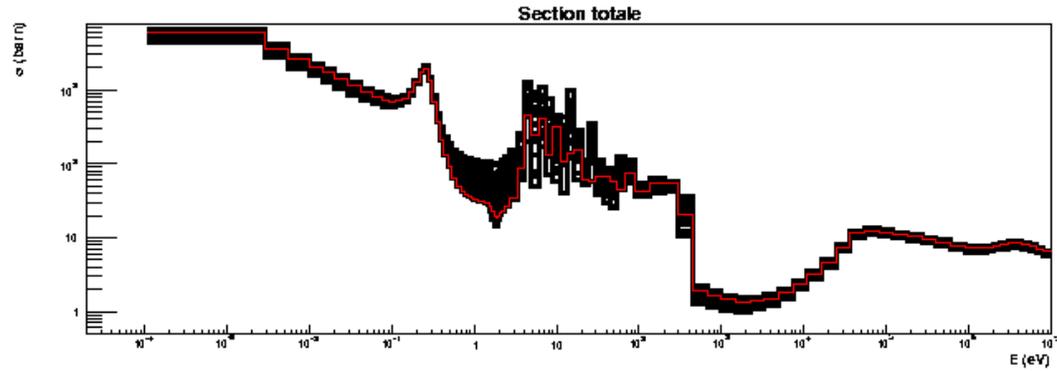
- σ : entre voies de réaction / groupes d'énergie

- $\sigma(\theta)$: pour diffusions

Quelles utilisations ?

1. Développer dans les codes le traitement et l'utilisation de ces informations
2. Echantillonnage extérieur avec appels multiples aux codes de calculs

TENDL-09 : ^{241}Pu



Application criticité



30 évaluations de ^{241}Pu et évaluation moyenne

→ 30 calculs d'un assemblage MOX

Moyenne $k_{\text{eff}} = 0.99795$ ($\sigma=39\text{pcm}$)

Calcul moyen $k_{\text{eff}} = 0.99782$ ($\sigma=9\text{pcm}$)

1 % de ^{241}Pu / Pu

→ D. Rochman (NRG) pour tests

Utilisation des covariances



Matrice Cov : symétrique, définie positive

Décomposition de Cholesky (ROOT par exemple)

$$\text{Cov} = L L^T$$

L : matrice triangulaire inférieure

Echantillonnage d'une section multigroupe

$$X_{\mu} = \sigma + L\mu$$

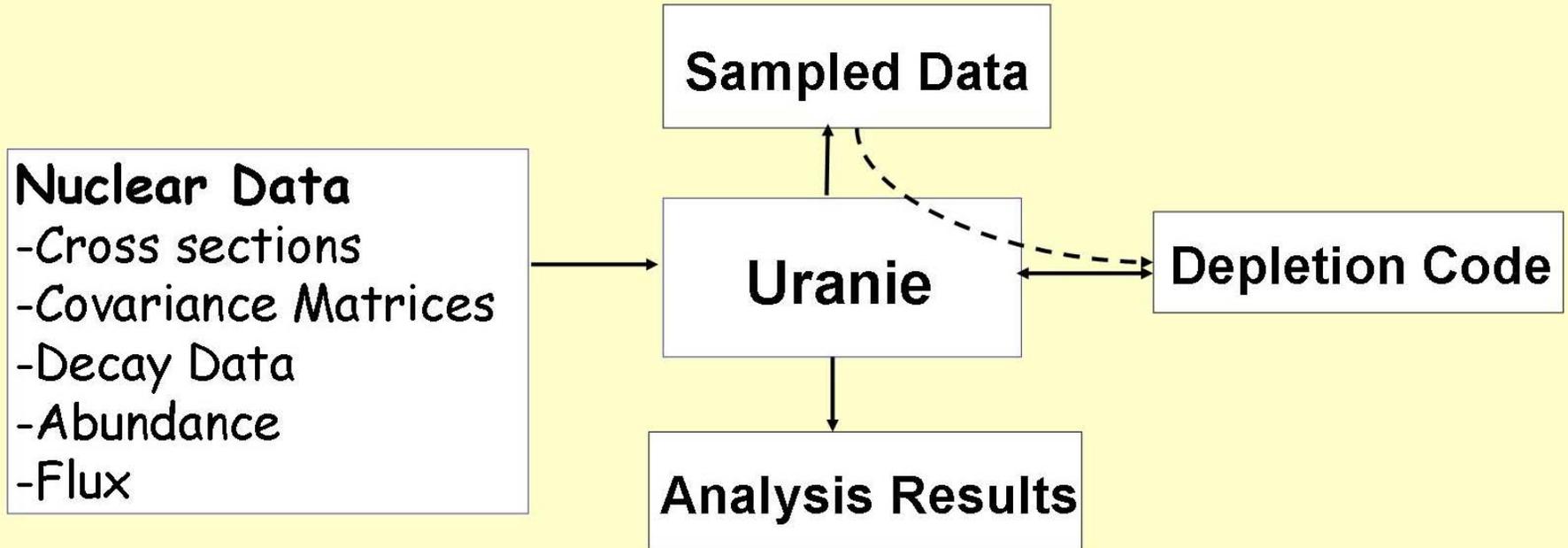
μ : vecteur multigroupe normal indépendant

σ : section multigroupe moyenne

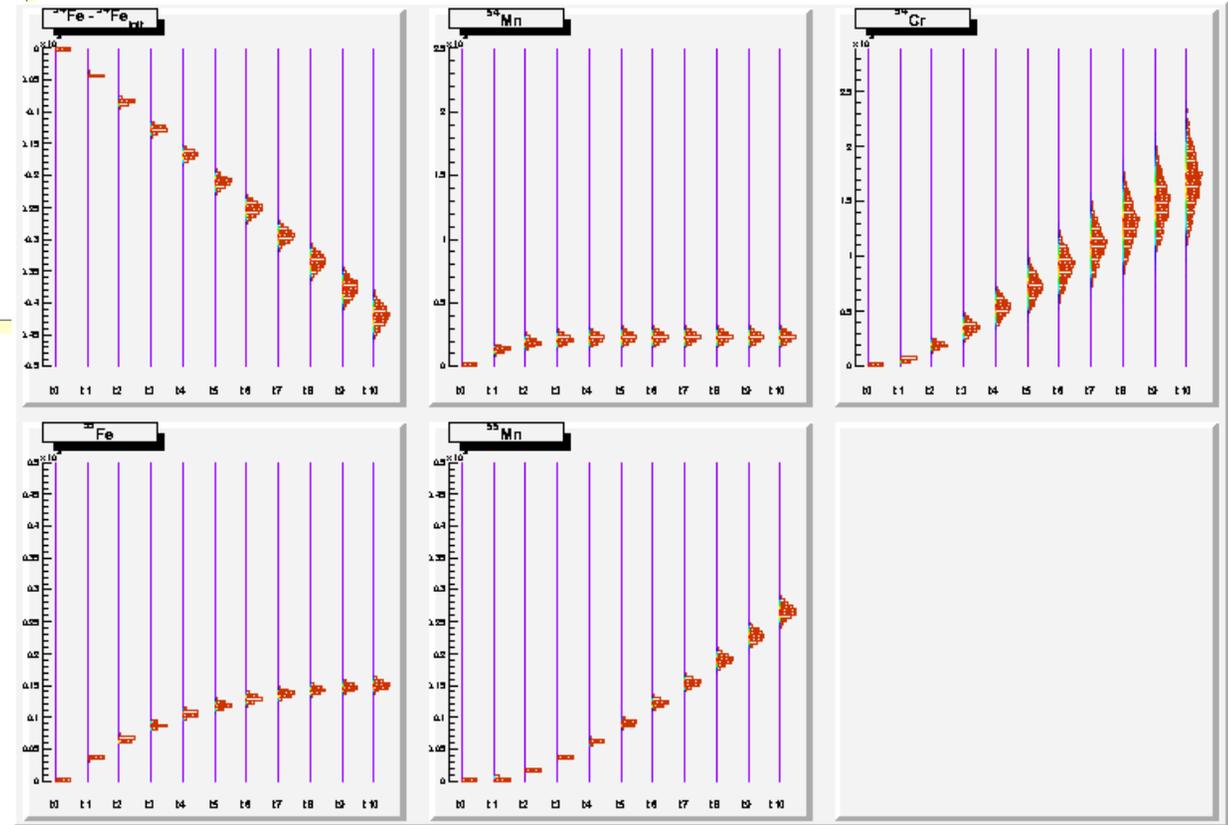
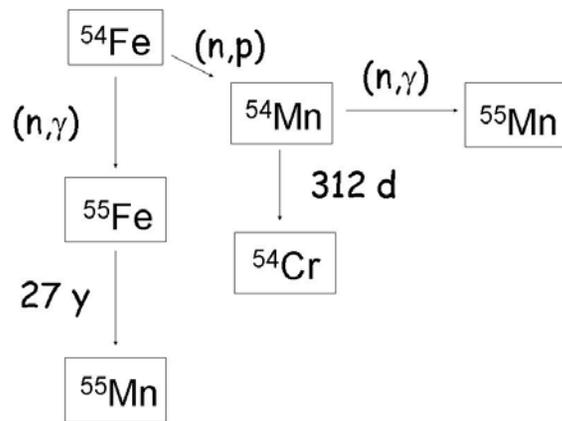
X: section multigroupe échantillonnée

Schéma de principe

Schematic diagram



Cas traité



Préparation pour des calculs activation
→ MENDEL, données nucléaires, pré et post traitement

Conclusions & perspectives



Développement TREND

lecture/écriture évaluation

reconstruction

TP

nouvelles représentations mg

Variances / covariances

traitement

intégration et utilisation

Vérification cohérence et corrections évaluations

^1H : Transfert gr 30 vers gr 26

