Les incertitudes expérimentales lors des mesures de sections efficaces de diffusion.

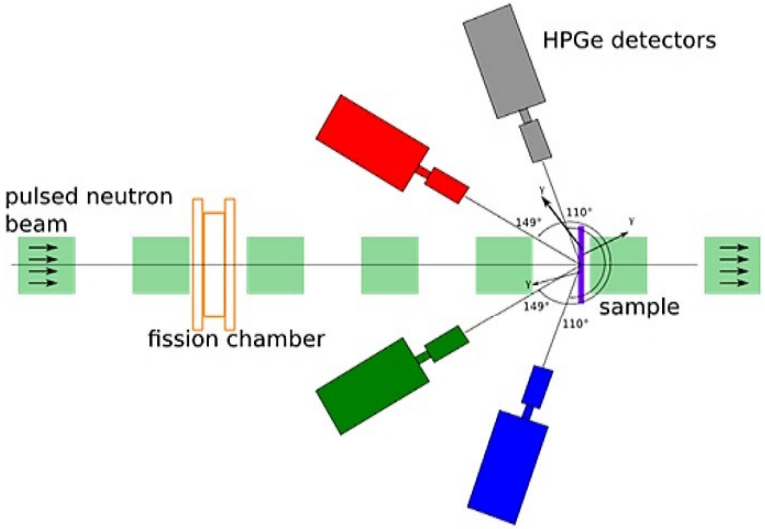
Greg Henning, *IPHC*

Pour la collaboration EEDIN.

Détermination des sections efficaces (n, xn γ)

Dispositif expérimental

- GRAPhEME, à GELINA (JRC-Geel)
- à 30 m de la source de neutrons.
- Chambre à fission pour la détermination du flux,
- 4-6 détecteurs HPGe autour de la cible à étudier.

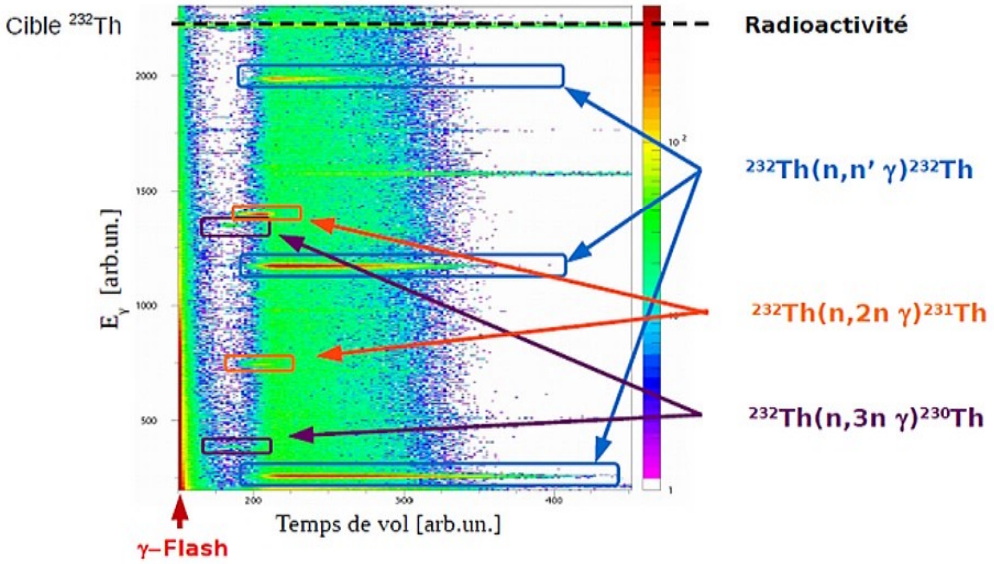


Détermination des sections efficaces (n, *x*n γ)

Dispotif expérimental

Méthode d'analyse

- Identification des noyaux et transitions par leur énergie γ
- Suivi du nombre de γ détectés en fonction du temps (et donc de l'énergie du neutron incident par temps de vol).
- $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, E_n) = \frac{1}{4\pi}\frac{N_\gamma(\theta,E_n)}{N_f(E_n)}\frac{\epsilon_{FC}}{\epsilon_\gamma}\frac{\zeta_{FC}}{\zeta_\gamma}\sigma_{(n,f)}(E_n)$
- Section efficace totale par méthode de Gauss / polynôme de Legendre.



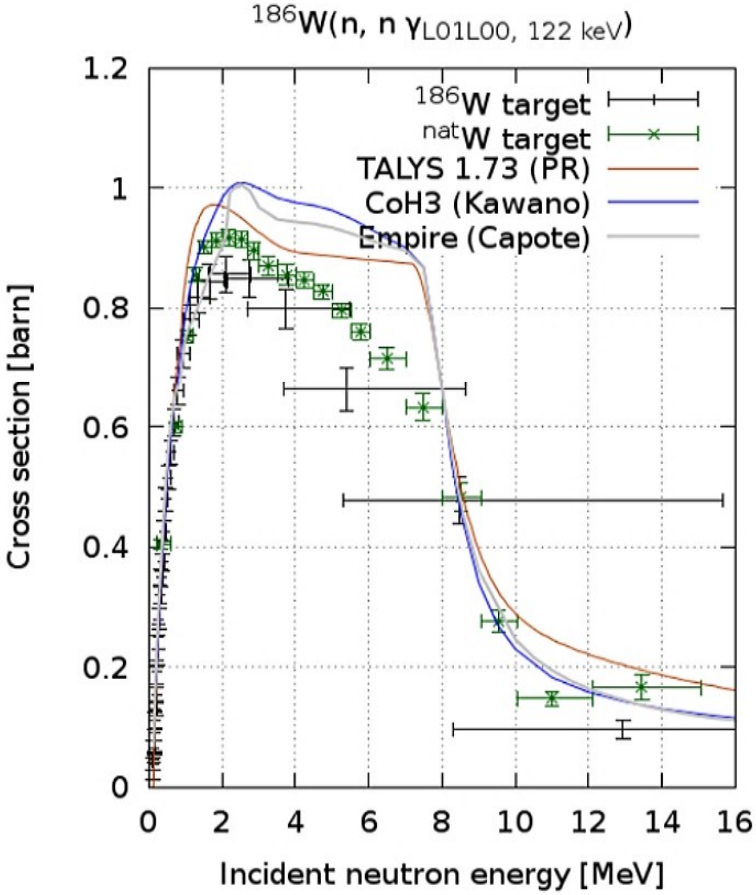
Détermination des sections efficaces (n, *x*n γ)

Dispotif expérimental

Méthode d'analyse

Confrontation aux théories

- Sections efficaces calculées avec TALYS, EMPIRE, CoH3
- Sensibles à la distribution en spin, au BR, ..



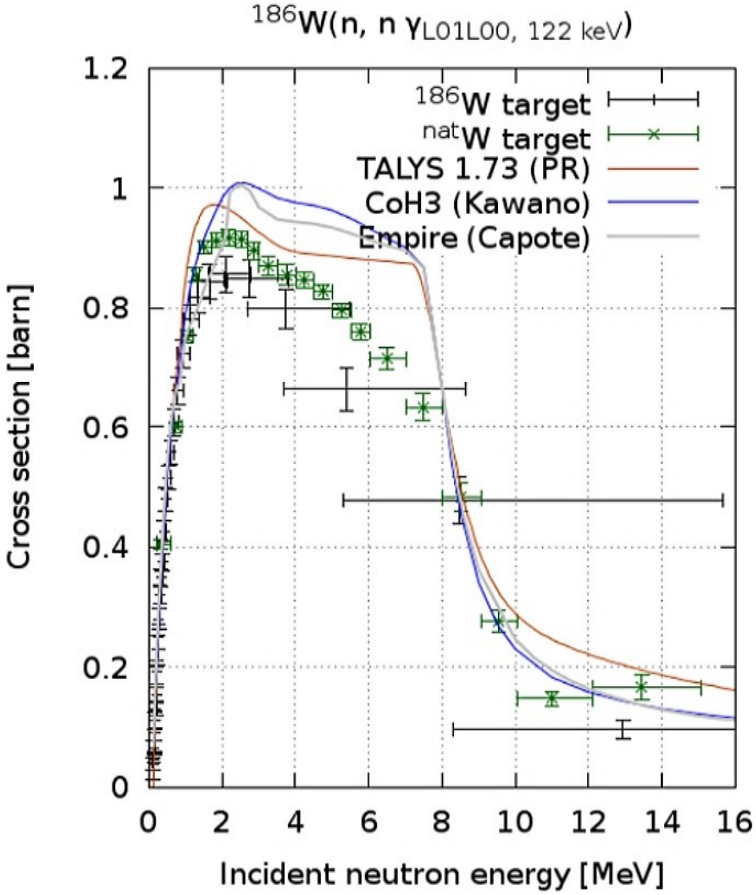
Détermination des sections efficaces (n, xn γ)

Dispotif expérimental

Méthode d'analyse

Confrontation aux théories

- Sections efficaces calculées avec TALYS, EMPIRE, CoH3
- Sensibles à la distribution en spin, au BR, ..



Une bonne maîtrise des incertitudes est nécessaire pour contraindre efficacement les modèles.

Détermination des incertitudes: Méthodes analytique *vs.* Monte-Carlo

Détermination des incertitudes: Méthodes analytique *vs.* Monte-Carlo

Approche analytique

- Sources d'incertitudes: nombre de γ, masse de la cible, flux, empilement.
- $\sigma_f^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial a_j}\right)^2 \sigma_{a_j}^2$
- En supposant aucune corrélations, l'incertitude se simplifie en
  $\left(\frac{u_{\sigma\theta}}{\sigma_\theta}\right)^2 = \left(\frac{u_{N_\theta}}{N_\theta}\right)^2 + \left(\frac{u_\phi}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{u_{N_T}}{N_T}\right)^2 + \left(\frac{u_{\epsilon_{FC}}}{\epsilon_{FC}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\epsilon_\theta}}{\epsilon_\theta}\right)^2$
  (se développe, par exemple: $\frac{u_{\sigma\theta}}{\sigma_\theta}$).

Détermination des incertitudes: Méthodes analytique *vs.* Monte-Carlo

Approche analytique

- Sources d'incertitudes: nombre de γ, masse de la cible, flux, empilement.
- $\sigma_f^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial a_j}\right)^2 \sigma_{a_j}^2$
- En supposant aucune corrélations, l'incertitude se simplifie en $\left(\frac{u_{\sigma\theta}}{\sigma_\theta}\right)^2 = \left(\frac{u_{N_\theta}}{N_\theta}\right)^2 + \left(\frac{u_\phi}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{u_{N_T}}{N_T}\right)^2 + \left(\frac{u_{\epsilon_{FC}}}{\epsilon_{FC}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\epsilon_\theta}}{\epsilon_\theta}\right)^2$
  (se développe, par exemple: $\frac{u_{\sigma\theta}}{\sigma_\theta}$).

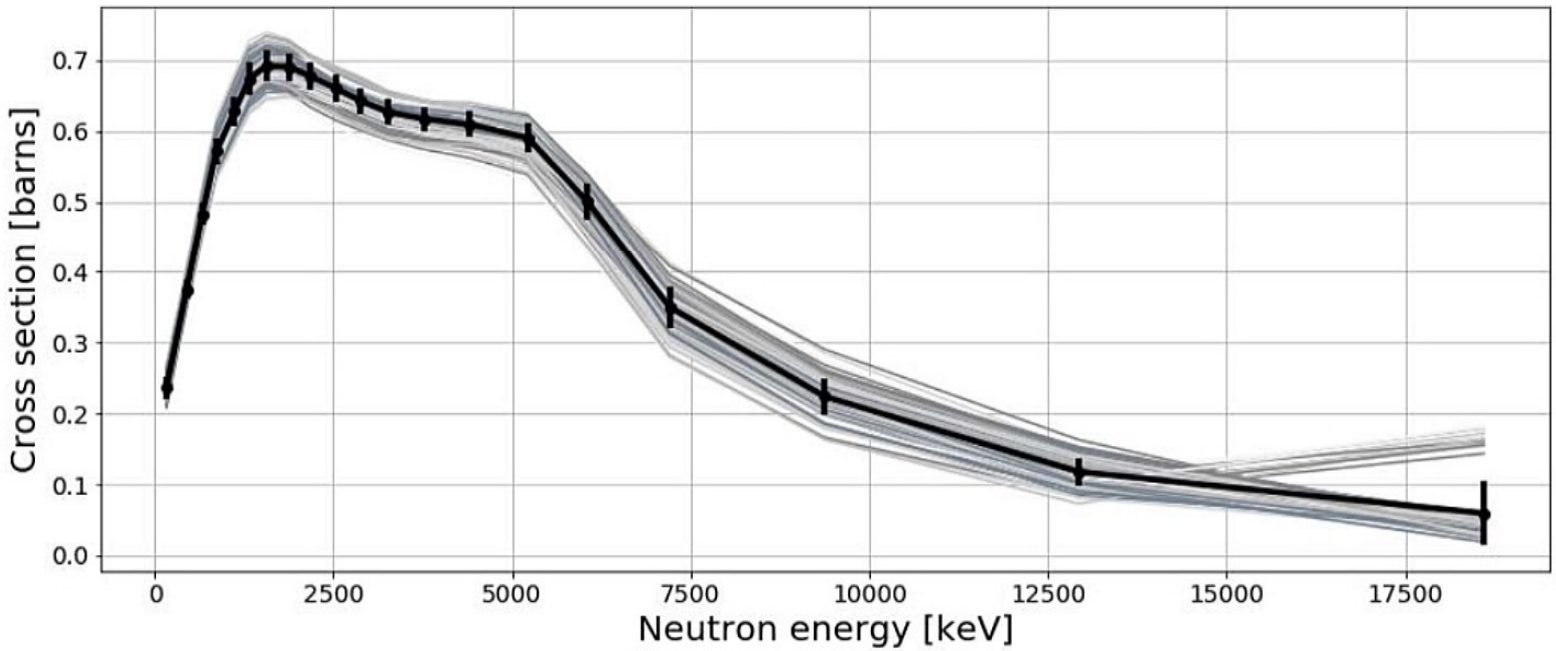
Approche Monte Carlo

- Indentifier tous les paramètres avec leur incertitudes (Efficacité, masse la cible, ...) et leur forme (Gauss, plateau, ...)
- Variation aléatoire des paramètres et extraction d'une section efficace associée.
- Traitement de la collection de sections efficaces pour produire une valeur moyenne, un écart type et les covariances.

Approche Monte Carlo

A partir de la collection de sections efficaces (gris) pour chaque réalisation, on calcule une valeur moyenne (noir) et un écart type.

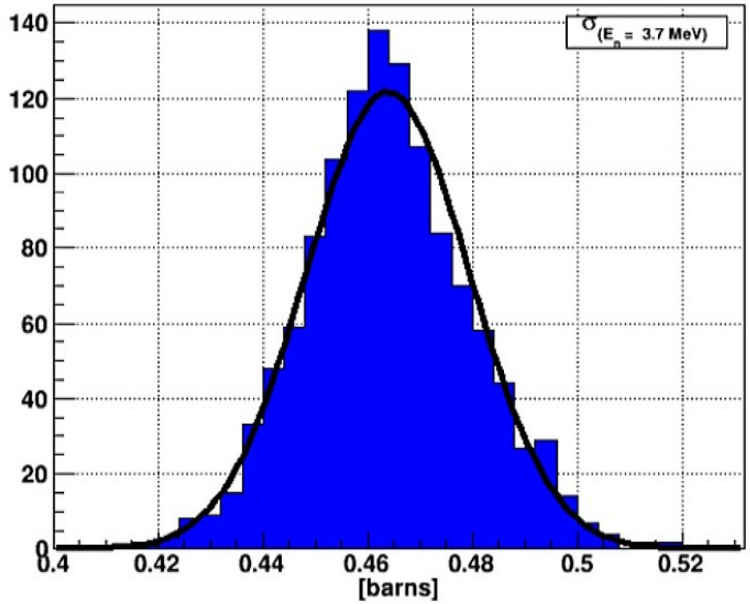
Exemple pour la transition de 111 keV dans 184W(n,n')



Approche Monte Carlo

A partir de la collection de sections efficaces (gris) pour chaque réalisation, on calcule une valeur moyenne (noir) et un écart type.

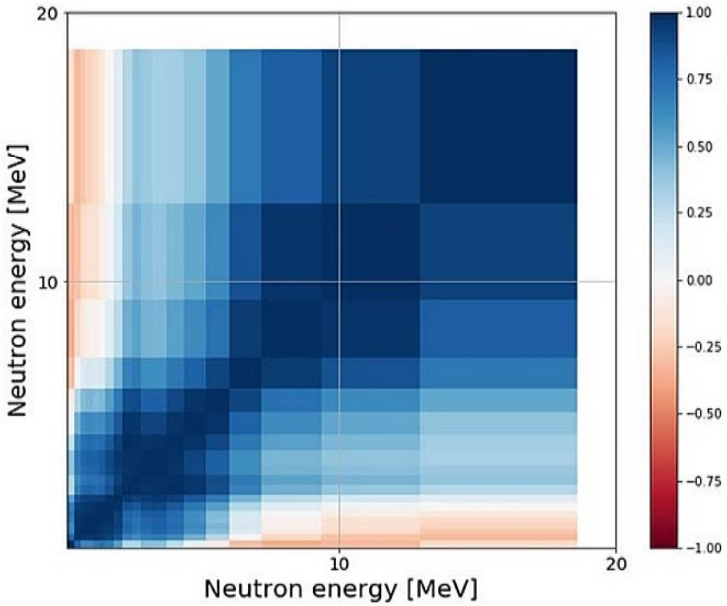
La distribution des réalisations permet d'étudier la forme de l'incertitude.



Approche Monte Carlo

A partir de la collection de sections efficaces (gris) pour chaque réalisation, on calcule une valeur moyenne (noir) et un écart type.

Les covariances sont obtenues de la même façon.



Approche analytique

- Intérêts:
  - Exacte
  - Indépendante de paramètres extérieurs (nombre d'itérations, ...)
- Inconvénients:
  - Formule mathématique longue et compliquée (source d'erreur à la dérivation, retranscription).
  - Suppose des incertitudes linéaires.
  - Certaines incertitudes sont difficiles à prendre en compte (*p. ex.* temps).

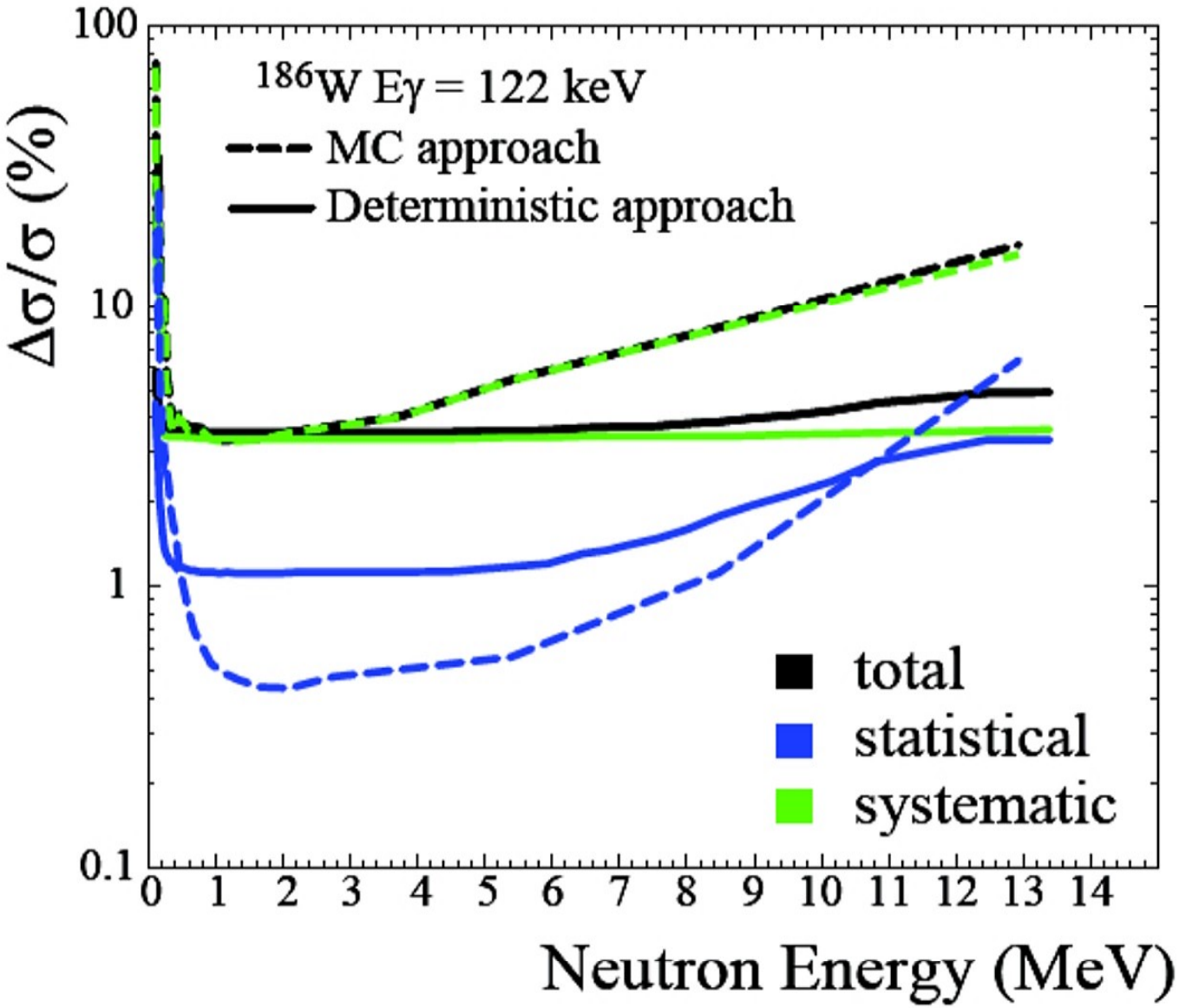
Approche analytique

- Intérêts:
  - Exacte
  - Indépendante de paramètres extérieurs (nombre d'itérations, ...)
- Inconvénients:
  - Formule mathématique longue et compliquée (source d'erreur à la dérivation, retranscription).
  - Suppose des incertitudes linéaires.
  - Certaines incertitudes sont difficiles à prendre en compte (*p. ex.* temps).

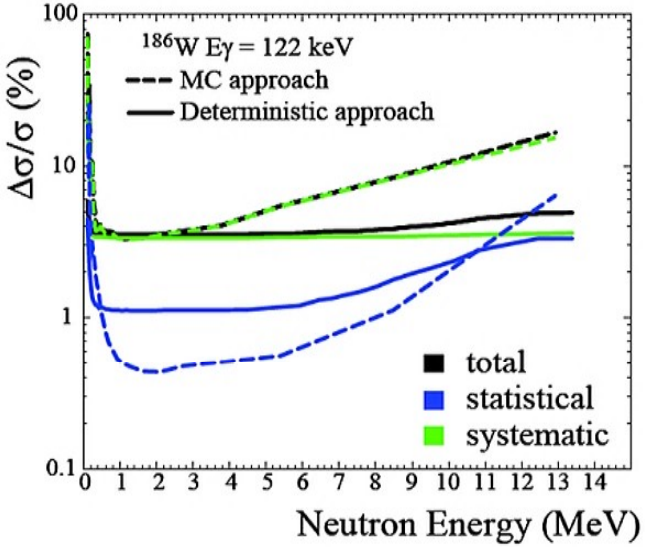
Approche Monte Carlo

- Intérêts:
  - Toutes les corrélations sont prises en compte *automatiquement*.
  - Des incertitudes complexes sont prises en compte (*p. ex.* temps).
  - Possibilité d'extraire la distribution des résultats.
- Inconvénients:
  - Convergence.
  - Fonctionnement en *boite noire*.
  - Utilise une bibliothèque externe pour les calculs de valeurs moyennes, écart type, covariances.

Détermination des incertitudes: Méthodes analytique contre Monte-Carlo

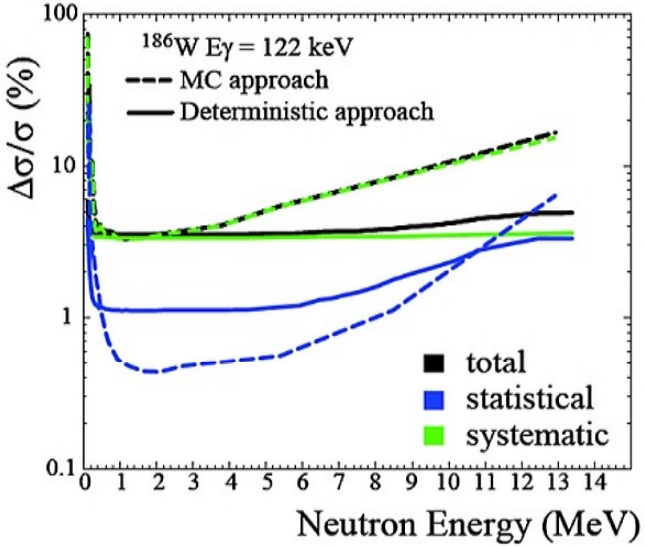


Détermination des incertitudes: Méthodes analytique contre Monte-Carlo



- l'approche MC a des incertitudes plus importantes (plus de sources prises en compte).
- Différence dans la répartition *statistique*/*systématique*.

Détermination des incertitudes: Méthodes analytique contre Monte-Carlo



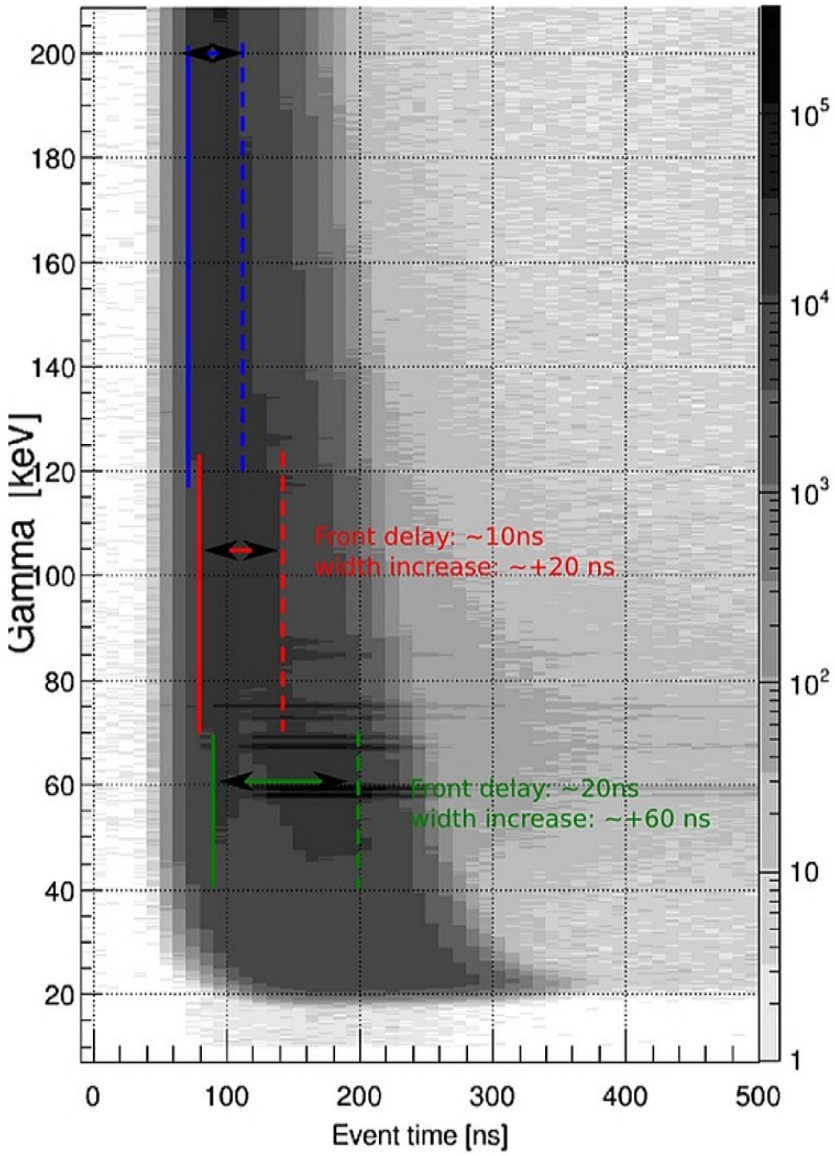
- l'approche MC a des incertitudes plus importantes (plus de sources prises en compte).
- Différence dans la répartition *statistique/systématique*.

Nature des sources *statistiques, systématiques* ?

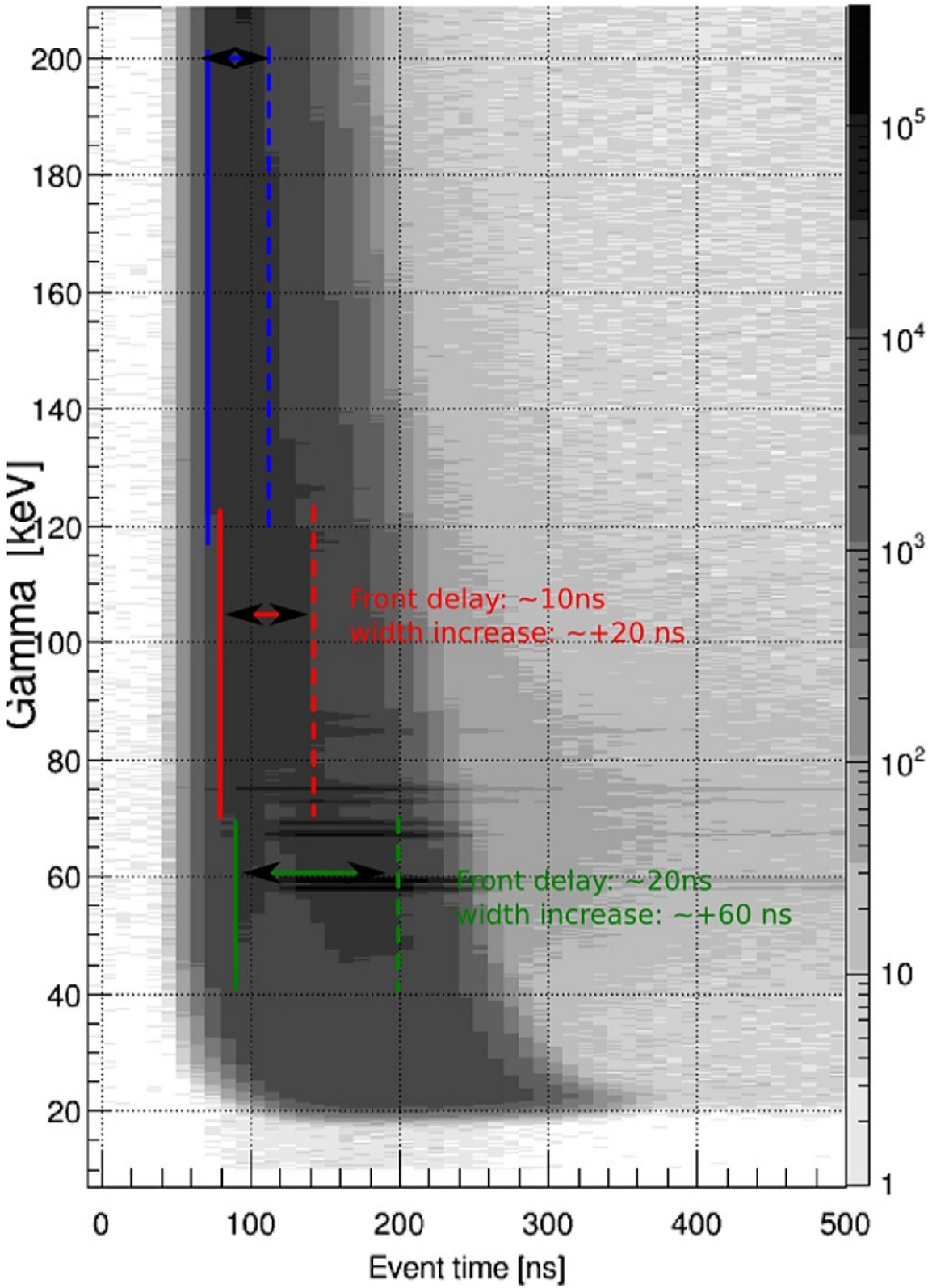
Une incertitude statistique dans une méthode peut-elle être systématique pour l'autre ?

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

Incertitude en temps *vs.* Energie γ



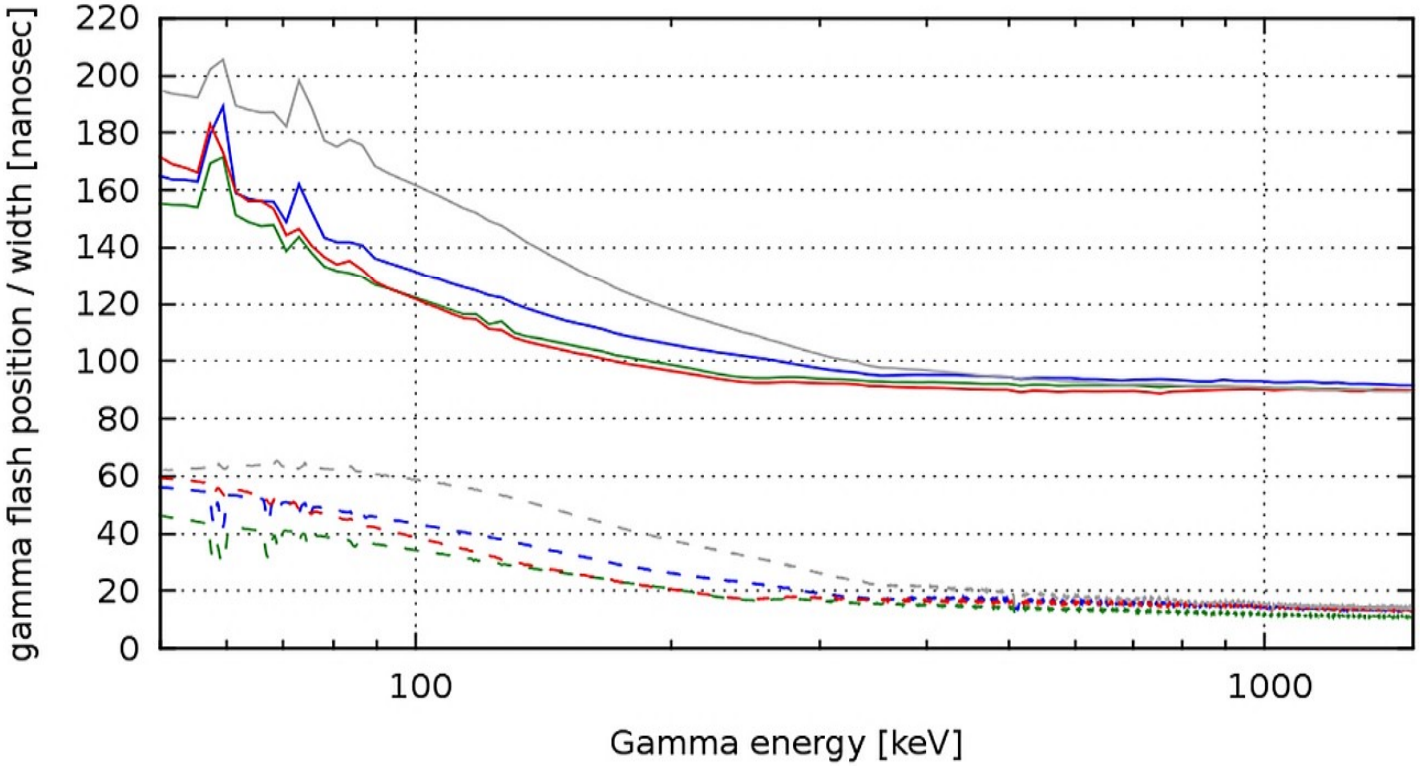
Pour les γ de basse énergie, la résolution en temps des détecteurs HPGe et l'électronique d'acquisition est dégradée.


Front delay: ~10ns
width increase: ~+20 ns
Front delay: ~20ns
width increase: ~+60 ns
Gamma [keV]
Event time [ns]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
100
200
300
400
500
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

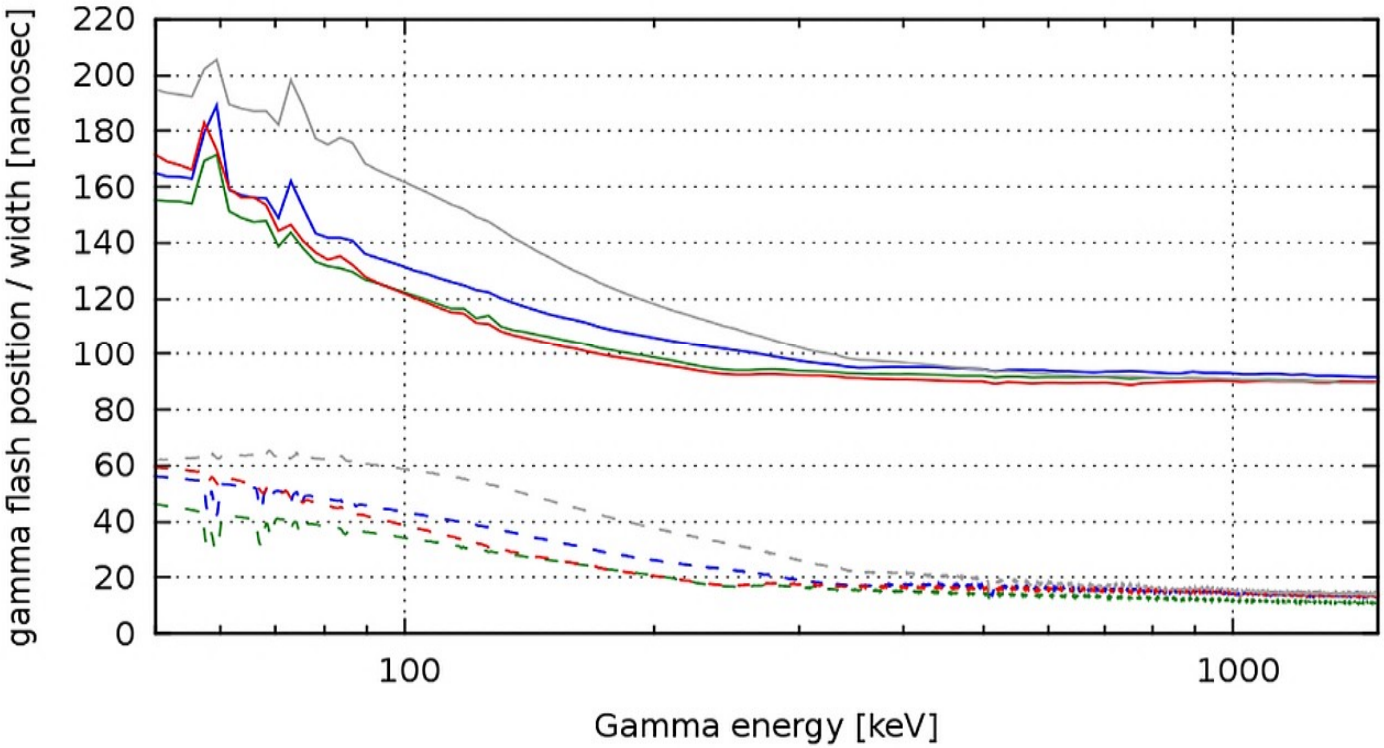
⚠ Evaluation de l'incertitude avec le γ flash.

— : Position du γ flash; – – – : largeur du γ flash.



Incertitude en temps *vs.* Energie γ

— : Position du γ flash; – – – : largeur du γ flash.

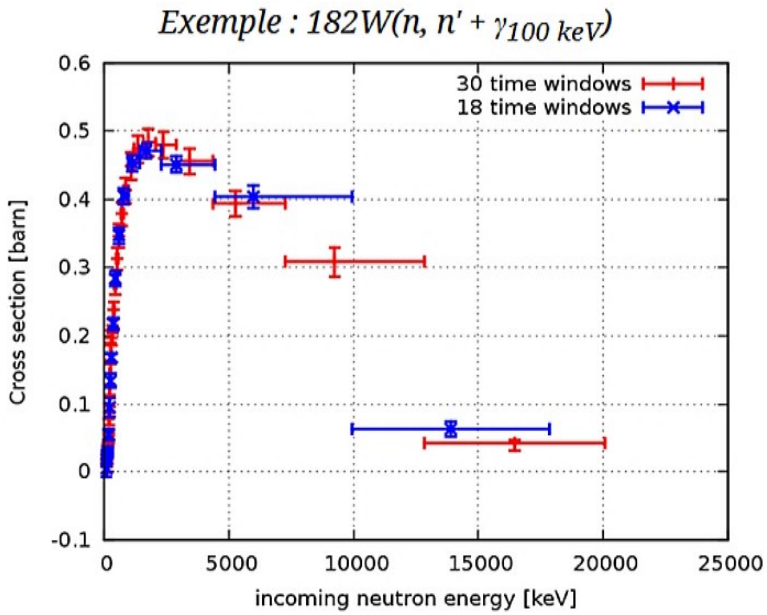


- La position du γ flash se décale d'environ 40 à 60 nanosecondes.
  - Cette dérive est facile à corriger dans le traitement des données.
- La largeur du pic augmente ($E_\gamma \leq 200$ keV) d'un facteur 2.
- $\Rightarrow$ La résolution en énergie est dégradée, sans possibilité de correction.

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

Conséquences:

- Taille minimale pour les fenêtres en temps / énergie du neutron incident

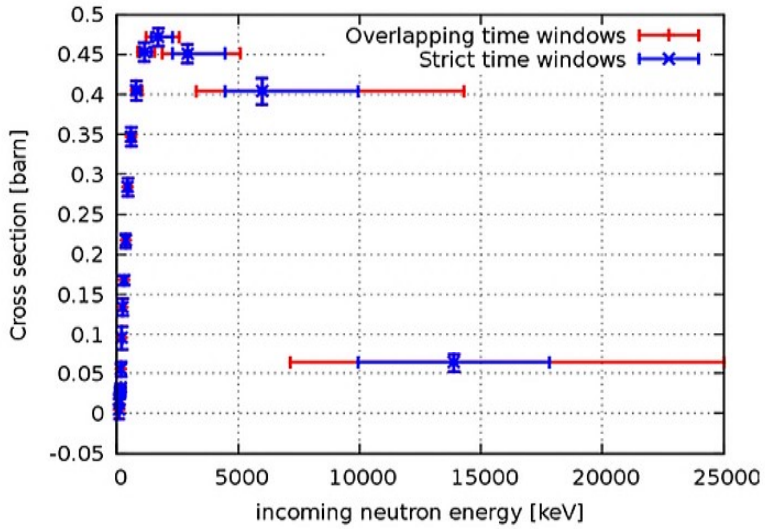


Incertitude en temps *vs.* Energie γ

Conséquences:

- Taille minimale pour les fenêtres en temps / énergie du neutron incident
- Recouvrement des fenêtres en énergie.

Exemple : 182W(n, n' + $\gamma_{100\ keV}$)

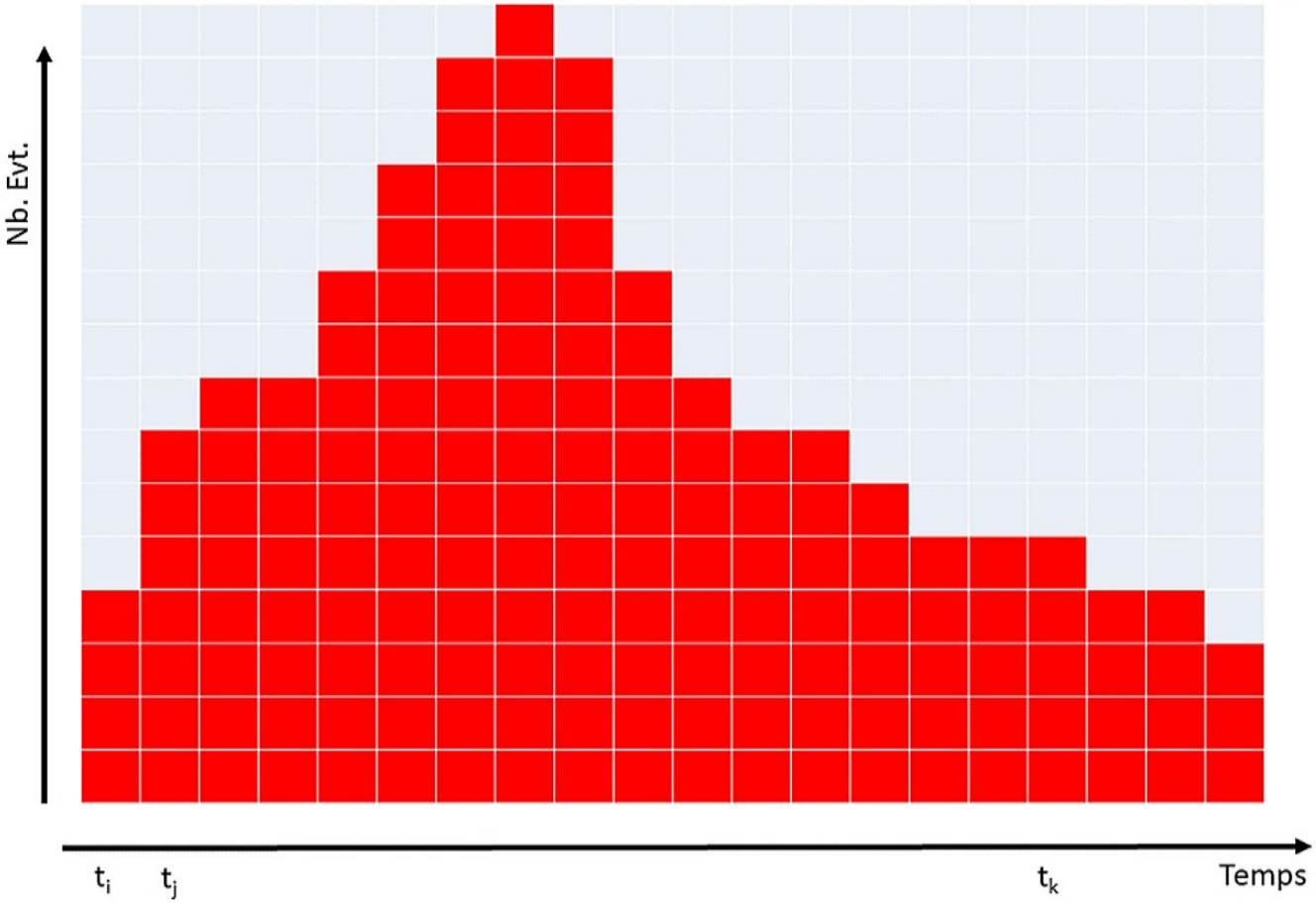


Incertitude en temps *vs.* Energie γ

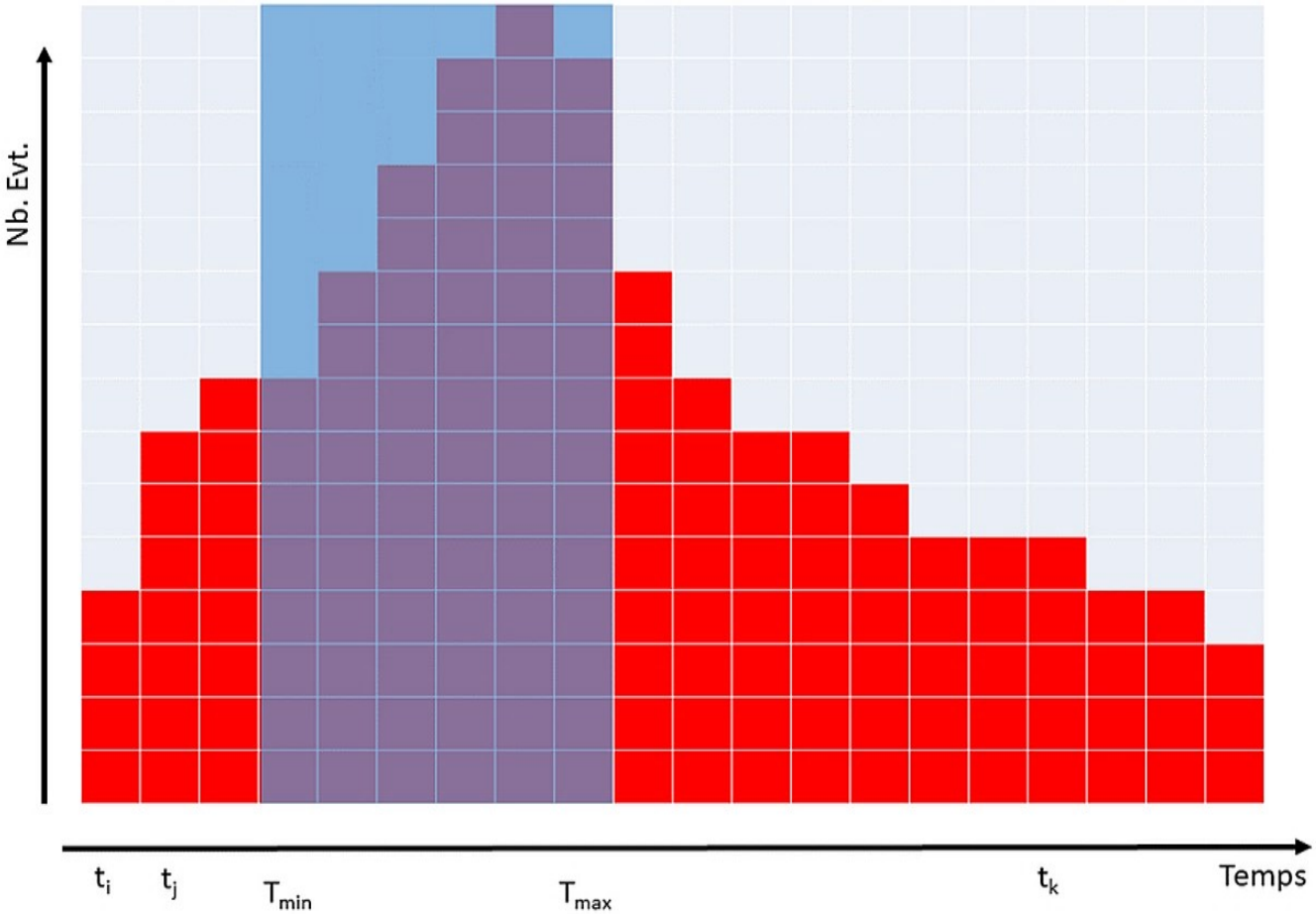
L'analyse Monte Carlo permet de prendre cette incertitude en compte.

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

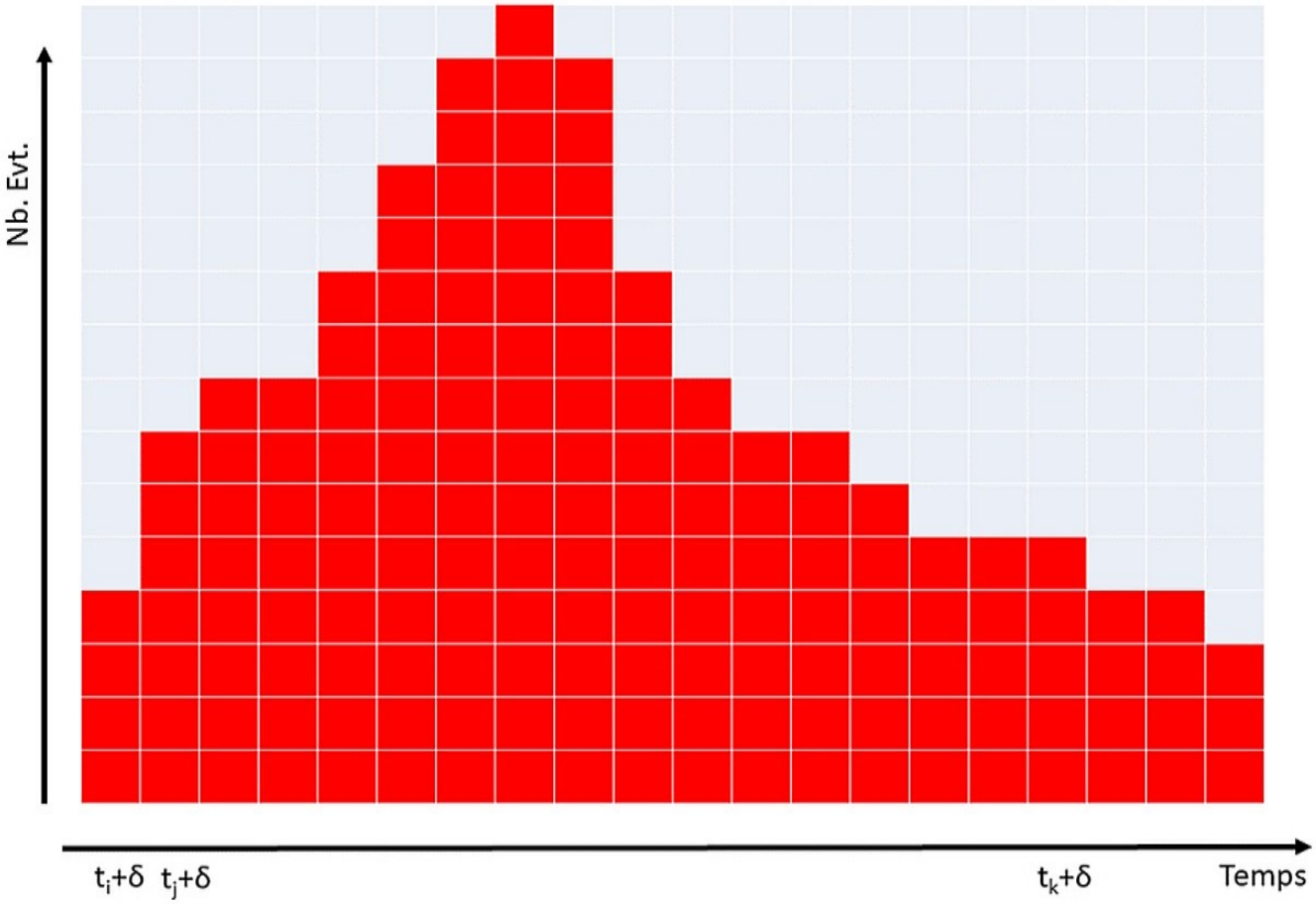
L'analyse Monte Carlo permet de prendre cette incertitude en compte.



Incertitude en temps *vs.* Energie γ

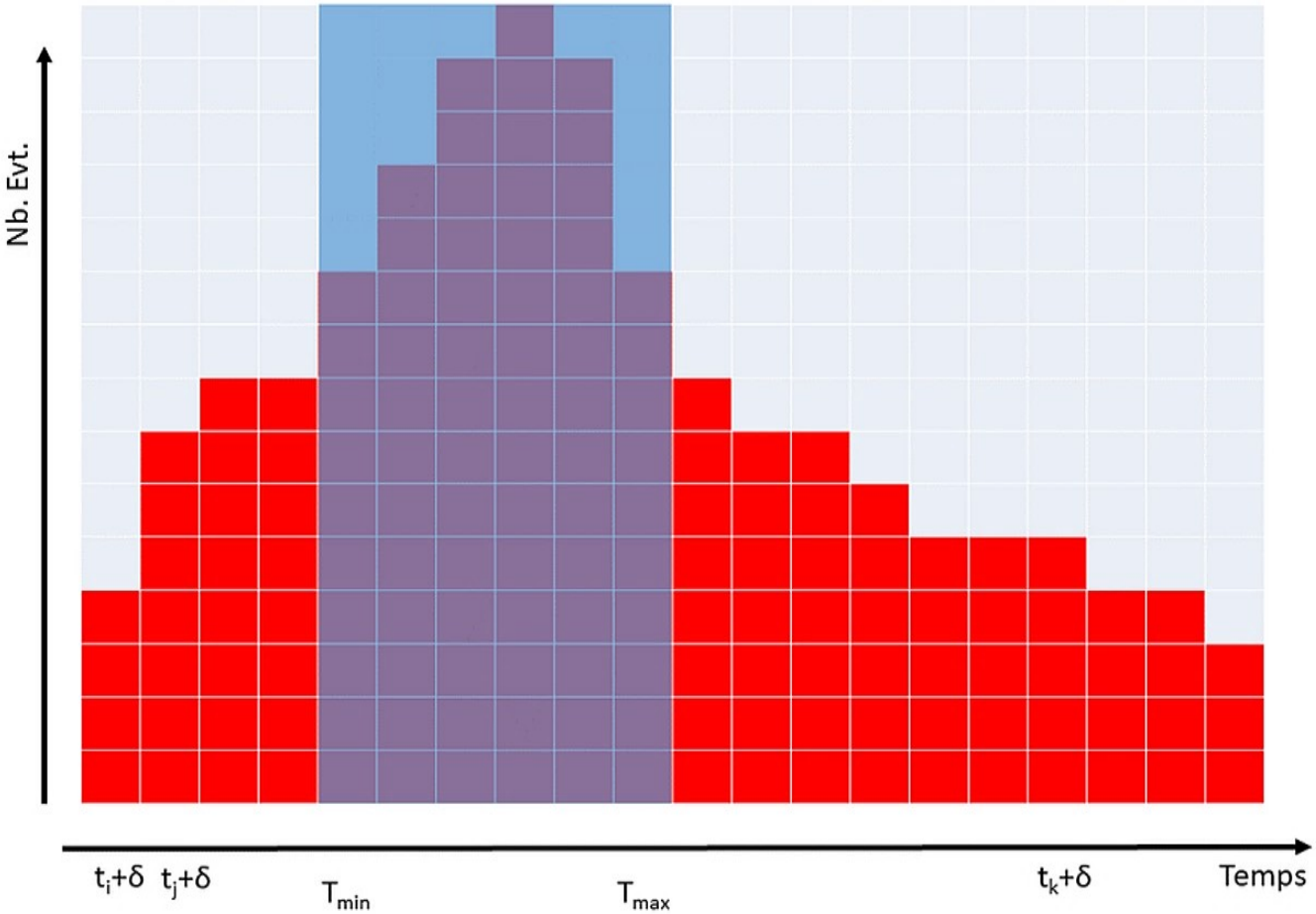


Incertitude en temps *vs.* Energie γ



- A chaque itération, les paramètres en temps sont variés:
  - variation de la correspondance temps/énergie neutron,

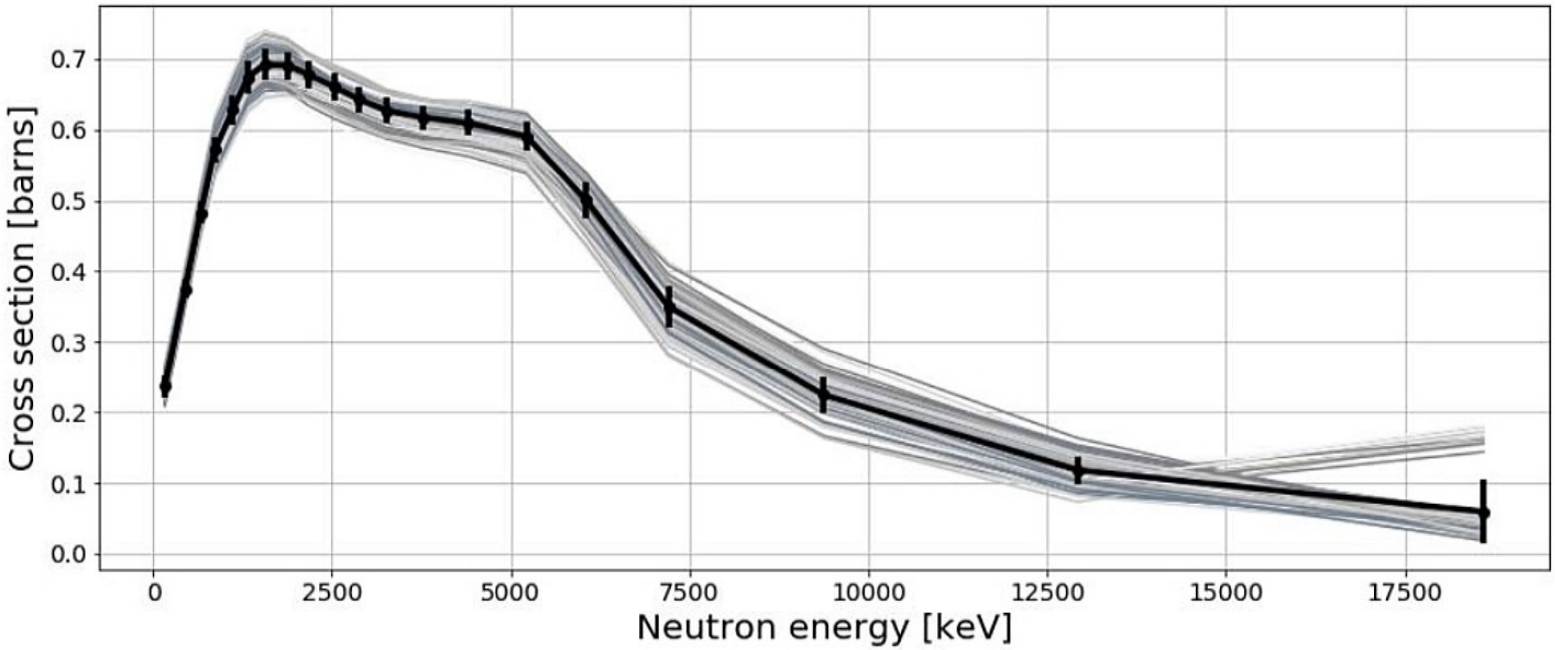
Incertitude en temps *vs.* Energie γ



- variation des bornes des fenêtres en temps → les données correspondantes à une fenêtre varient légèrement d'une itération à l'autre.

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

Exemple pour la transition de 111 keV dans 184W(n,n')

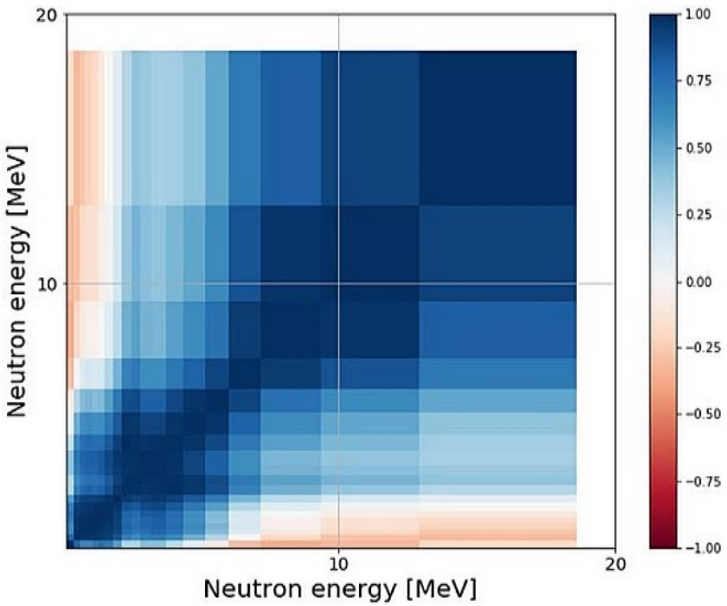


- "saut" en section efficace à la limite : effet de *binning*.

Incertitude en temps *vs.* Energie γ

L'analyse Monte Carlo permet de prendre cette incertitude en compte.

L'alternance positive/négative des corrélations est liée (au moins en partie) à cette variation.

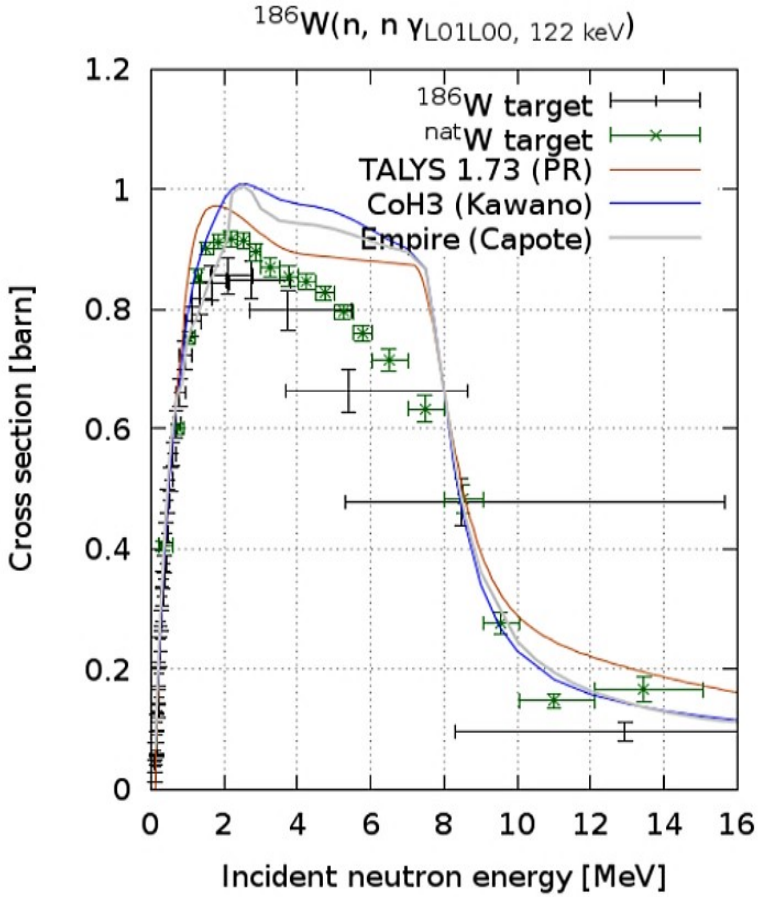


Données et incertitudes pour les évaluateurs

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Confrontation aux théories

- Sections efficaces calculées avec TALYS, EMPIRE, CoH3
- Sensibles à la distribution en spin, au BR, ..



Une bonne maîtrise des incertitudes est nécessaire pour contraindre efficacement les modèles.

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Sensibilité aux rapports d'embranchement des transitions.

- Certains BR inconnus ou avec de larges incertitudes.
- Un ingrédient clef du calcul de section efficace.

Quelles transitions sont le moins sensible à cette incertitude ?

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Sensibilité aux rapports d'embranchement des transitions.

Quelles transitions sont le moins sensible à cette incertitude ?

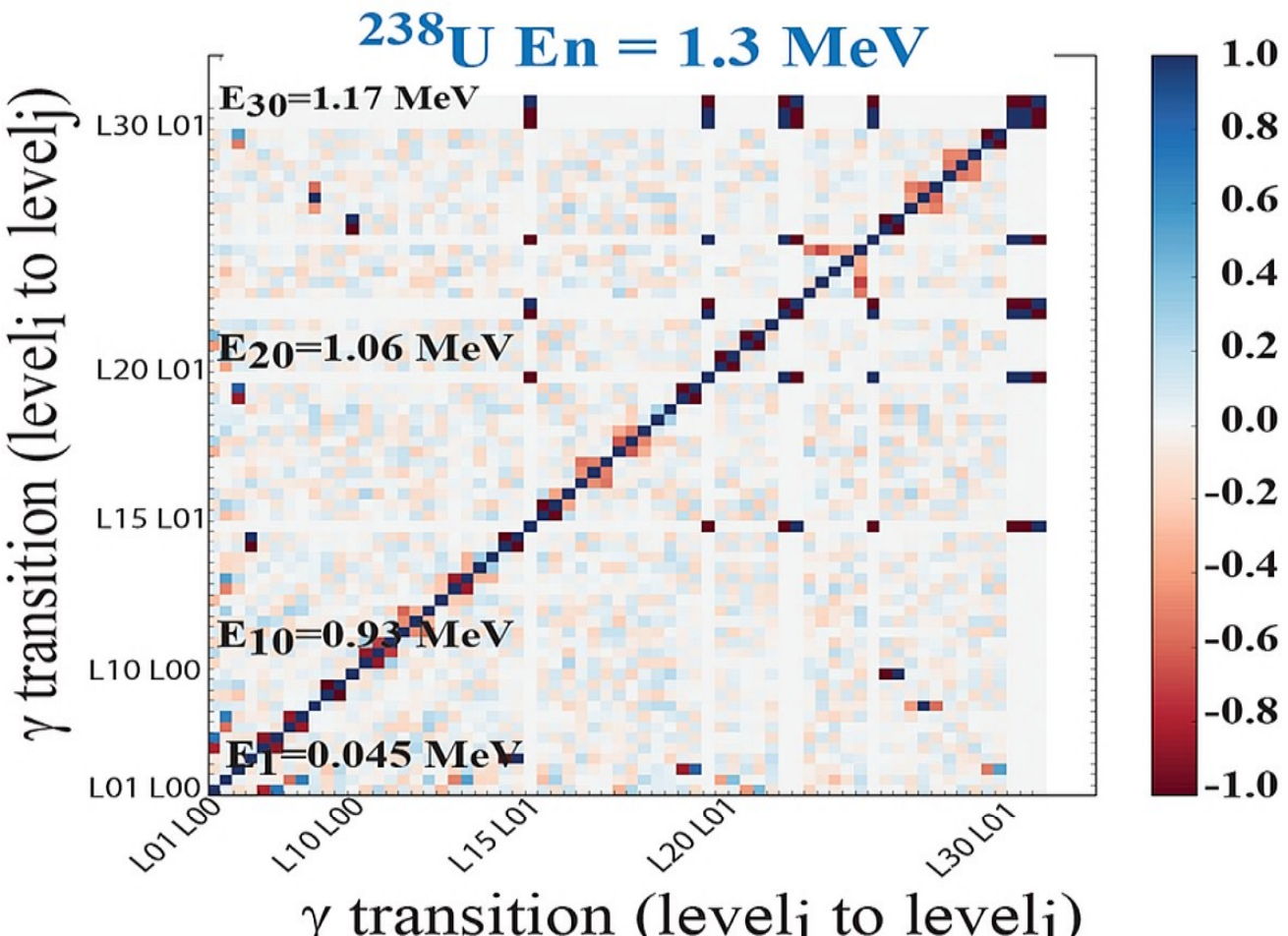
Évaluation des corrélations entre niveaux avec TALYS et des calculs MC en perturbant les BR autour de leur valeur de référence.

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Sensibilité aux rapports d'embranchement des transitions.

Quelles transitions sont le moins sensible à cette incertitude ?

Évaluation des corrélations entre niveaux avec TALYS et des calculs MC en perturbant les BR autour de leur valeur de référence.

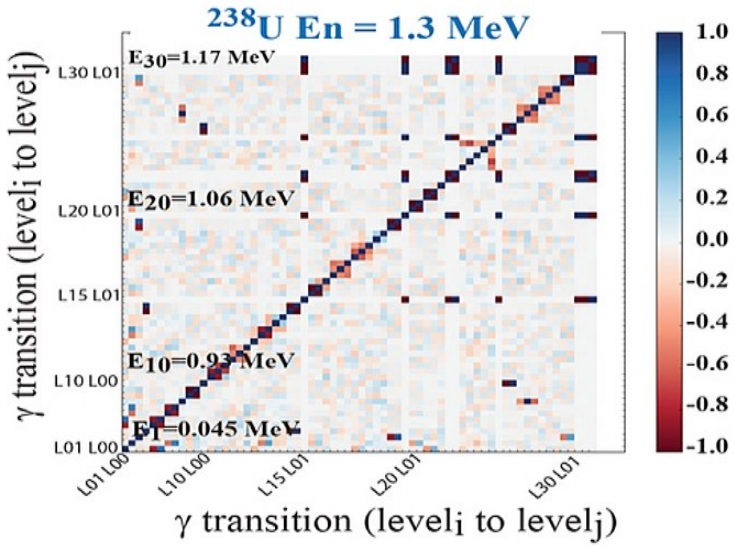


Données et incertitudes pour les évaluateurs

Sensibilité aux rapports d'embranchement des transitions.

Quelles transitions sont le moins sensible à cette incertitude?

Évaluation des corrélations entre niveaux avec TALYS et des calculs MC en perturbant les BR autour de leur valeur de référence.



- Les corrélations reflètent la structure (*level scheme*), mais aussi les processus de désexitation depuis le point d'entrée.
- Les transitions *peu* corrélées avec d'autres sont peu dépendantes des BR et donc de bons outils de comparaison avec les codes.

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Diffusion des résultats.

- Les sections efficaces (σ) sont les quantités physiques d'intérêt (l'*ôbservable*).
- Mais ce résultat final *cache* des ingrédients spécifiques:
  - Section efficace *(n,f)*,
  - Caractéristiques de la cible, des détecteurs,
  - Flux, ...

Ces paramètres sont parfois communs à plusieurs sections efficaces (n, xn γ)
→ **Corrélations.**

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Diffusion des résultats.

- Les sections efficaces (σ) sont les quantités physiques d'intérêt (l'*ôbservable*).
- Mais ce résultat final *cache* des ingrédients spécifiques:

$$\left(\frac{\sigma_{(n,n'\gamma)}}{\sigma_{^{235}U(n,f)}}\right)_{[E_n,E_n']} = \boxed{\frac{N_{^{235}U}}{N_{target}}} \times \frac{\boxed{N_{\gamma[E_n,E_n']}}}{\boxed{N_{fission[E_n,E_n']}}}$$

Specific to a transition

Common to all transitions

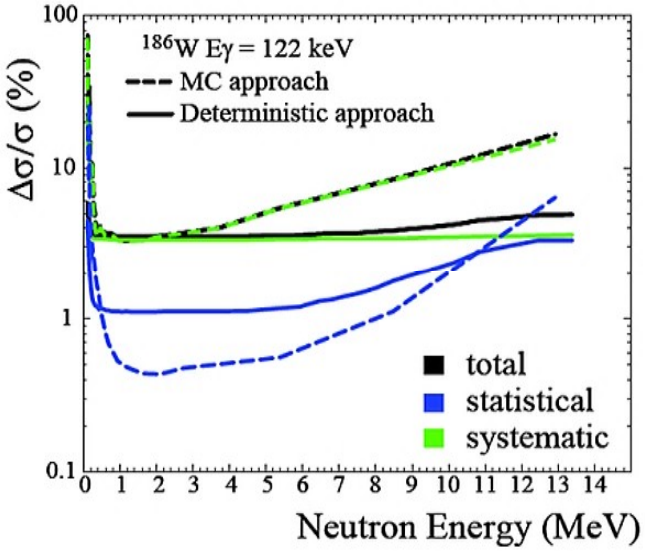
Two *fixed* parameters common to every E_n & transitions

Chacune de ces quantités a sa propre incertitude (écart type, loi de distribution, éventuellement covariances).

Ces informations sont aussi importantes, et devraient aussi être accessibles lors de la publication.

Données et incertitudes pour les évaluateurs

Mais...



Nature des sources *statistiques*, *systématiques* ?

Une incertitude statistique dans une méthode peut-elle être systématique pour l'autre ?

Quelles incertitudes associées à nos résultats ?

- L'approche analytique offre une vraie différentiation entre statistique et systématique.
- L'approche Monte-Carlo prend en compte plus de sources d'incertitude et permet de produire facilement des covariances... au prix de tout *systématiser*.

Conclusions

Conclusions

- **Méthodes de détermination des incertitudes** :
  - Exploration des approches analytique *vs.* Monte-Carlo.
  - Incertitudes totales similaires
  - Mais répartition *syst.*/*stat.* très différente.
  - ❓ Nature des incertitudes.

Conclusions

- **Méthodes de détermination des incertitudes** :
  - Exploration des approches analytique *vs.* Monte-Carlo.
  - Incertitudes totales similaires
  - Mais répartition *syst./stat.* très différente.
  - ❓ Nature des incertitudes.
- **Résolution en temps en fonction de l'énergie des γ** :
  - Dérive du temps pour les γ d'énergie inférieure à $\approx$ 150 keV.
    - Corrigée dans l'analyse des données.
  - Dégradation de la résolution par un facteur 2.
  - Implique des fenêtres en temps de largeur minimales pour l'extraction des sections efficaces
  - Extension et recouvrement des fenêtres en énergie neutron pour rendre compte de cette incertitude.
  - Source d'incertitude prise en compte en Monte-Carlo.

Conclusions

- **Méthodes de détermination des incertitudes** :
  - Exploration des approches analytique *vs.* Monte-Carlo.
  - Incertitudes totales similaires
  - Mais répartition *syst./stat.* très différente.
  - ❓ Nature des incertitudes.
- **Résolution en temps en fonction de l'énergie des γ** :
  - Dérive du temps pour les γ d'énergie inférieure à $\approx$ 150 keV.
    - Corrigée dans l'analyse des données.
  - Dégradation de la résolution par un facteur 2.
  - Implique des fenêtres en temps de largeur minimales pour l'extraction des sections efficaces
  - Extension et recouvrement des fenêtres en énergie neutron pour rendre compte de cette incertitude.
  - Source d'incertitude prise en compte en Monte-Carlo.
- **Diffusion des résultats pour évaluation, exploitation** :
  - Quelles transitions sont le moins sensible aux incertitude de BR ?
  - La valeur finale de la section efficace obtenue *cache* des ingrédients communs (i.e. corrélants).
  - Quelle méthode d'incertitude: analytique (séparation claire stat./syst.) ou Monte-Carlo (covariances) ?

Conclusions

- Méthodes de détermination des incertitudes: Analytique *vs.* Monte Carlo.
  - En lire plus dans `M. Kerveno, et al., proceeding Covariance Workshop 2017`, en attente de publication par EPJ Nuclear Sci. Technol..
- Résolution en temps dégradée à basse énergie γ.
- Diffusion des résultats pour évaluation, exploitation.

Questions ouvertes. Travail en cours.

Conclusions

- Méthodes de détermination des incertitudes: Analytique *vs.* Monte Carlo.
  - En lire plus dans `M. Kerveno, et al., proceeding Covariance Workshop 2017`, en attente de publication par EPJ Nuclear Sci. Technol..
- Résolution en temps dégradée à basse énergie γ.
- Diffusion des résultats pour évaluation, exploitation.

Questions ouvertes. Travail en cours.

Travail d'équipe

La collaboration EEDIN:

- Maëlle Kerveno, Philippe Dessagne, Eliot Party, Greg Henning ; IPHC/CNRS.
- Stéphane Hilaire, Marc Dupuis ; CEA/DAM.
- Cyril de Saint Jean, David Bernard, Pierre Leconte ; CEA/DEN.