

Réact. Nucl. - Codes

Philippe JACQUET
Ingénieur Consultant
ALTRAN

2, rue Paul Dautier
78457 Vélizy-Villacoublay

philippe.jacquet@altran.com

Déroulement des 1^{ère} séances

I. Démarrage

1. Programme des séances
2. Intro. au cours de codes appliqués à l'étude des réacteurs nucléaires
3. Prise en main de deux codes de neutronique

II. Physique du cœur : Echelle assemblage

1. Grandeurs usuelles caractéristiques de la neutronique
2. Grandeurs usuelles caractéristiques de la physique des réacteurs
3. Comparaison Déterministe / Stochastique

III. Physique du cœur : Echelle cœur de réacteur

1. Grandeurs usuelles caractéristiques
2. Notions de dimensionnement
3. Comparaison Déterministe / Stochastique

IV. Etude pratique d'un cœur de réacteur (Projet Noté)

1. Dimensionnement « monocritère » et « multicritère »
2. Comparaison Déterministe / Stochastique

L'étude des réacteurs et du cycle

❑ L'amont du cycle

- Extraction du combustible : aspects de radioprotection
- Enrichissement et fabrication du combustible : aspects chimiques, thermique, de radioprotection, et de criticité
- Fabrication du combustible : aspects thermique, de radioprotection, et de criticité

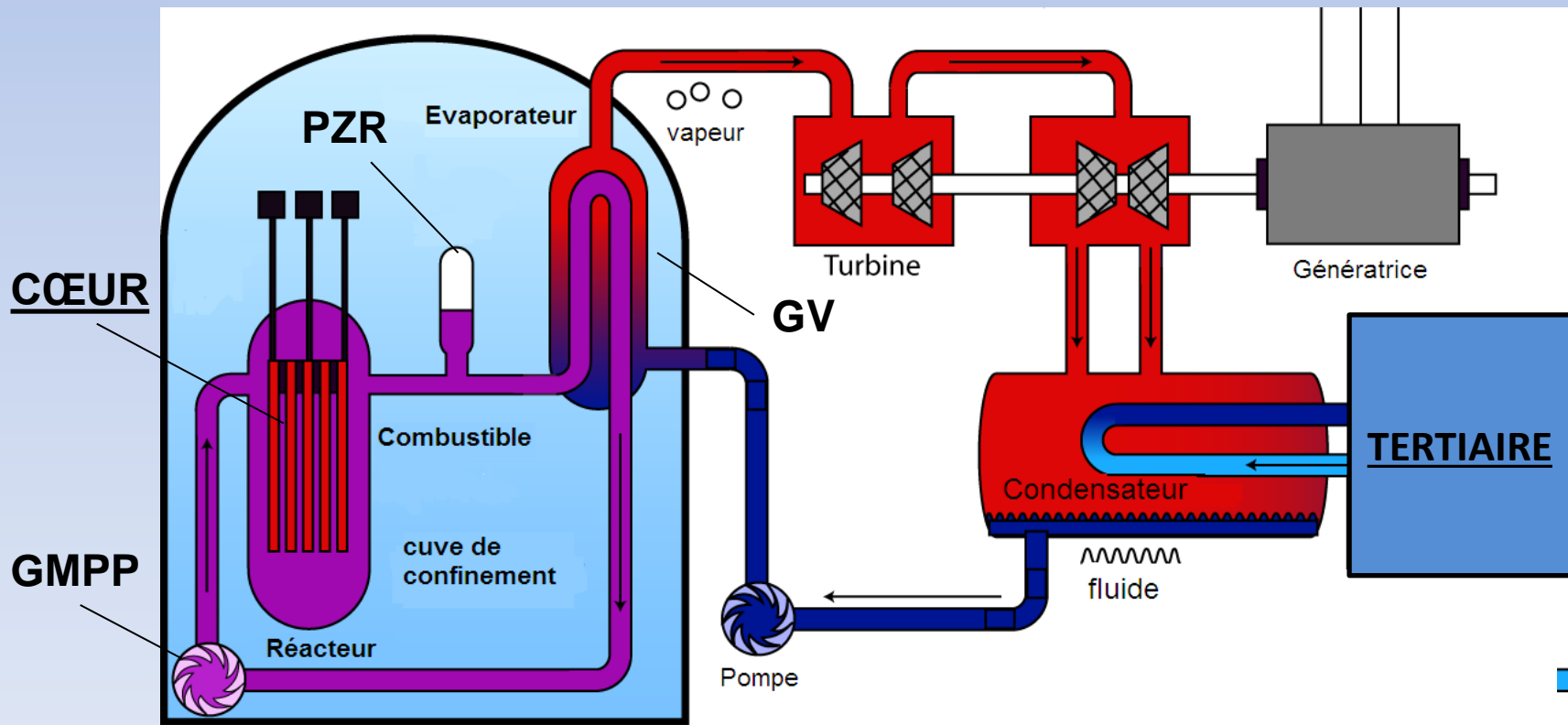
❑ L'aval du cycle

- Traitement et recyclage du combustible : aspects chimiques, d'évolution à longs termes de l'inventaire en radionucléides, de radioprotection, et de criticité
- Démantèlement : aspects de radioprotection

L'étude des réacteurs et du cycle

❑ Le réacteur : un système complexe

- Etude du combustible : aspects thermiques et chimiques
- Etude du cœur : aspects **neutroniques** et thermohydrauliques
- Etude du système (1aire, 2aire, I&C) : thermohydraulique



Codes de Neutronique

□ L'équation du transport des neutrons

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = & \underbrace{-\text{div}[\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)]}_{\text{déplacements}} - \underbrace{\Sigma_{tot}(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)}_{\text{chocs}} \\
 & + \underbrace{\int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dv' [\Sigma_d(\vec{r}, (v', \vec{\Omega}') \rightarrow (v, \vec{\Omega}), t) \phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t)]}_{\text{transferts}} + \underbrace{S(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)}_{\text{sources}}
 \end{aligned}$$

□ Deux familles de codes

- Codes Déterministes: Réduction de l'équation du transport à un problème pouvant être résolu par des méthodes numériques classiques
- Codes Stochastiques: Traitement de l'équation du transport par une méthode strictement statistique

Codes Déterministes

❑ Quelques noms connus

- APOLLO et CRONOS : CEA
- ECCO et ERANOS : CEA
- SMART : AREVA
- COCCINELLE : EDF
- DONJON et DRAGON : Polytechnique de Montreal
- PARCS : Purdue Univ.
- CASMO : Studsvik
- ...

❑ A retenir:

- Approximations par « modélisations physiques » des différents phénomènes qui ne peuvent être résolus explicitement par méthodes numériques : autoprotection et hétérogénéité de l'assemblage
- Temps de calcul court
- Généralement bien équipés pour approfondir les études physiques
- Nombreux modèles physiques paramétrables = difficiles à maîtriser

Codes Stochastiques

❑ Quelques noms connus

- TRIPOLI : CEA
- MCNP : LANL (Los Alamos)
- ...

❑ A retenir:

- Approximations réduites au minimum
- Temps de calcul long (à pondérer compte tenu d'une bonne propension à la parallélisation massive)
- Généralement moins bien équipés pour approfondir les études physiques
- Peu de modèles physiques paramétrables = facile à prendre en main

Pause 'Neutronique : les bases'

□ L'équation du transport des neutrons intégro-différentielle

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = -\text{div}[\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)] - \Sigma_{tot}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \\ + \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^{\infty} dE' [\Sigma_d(\vec{r}, (E', \vec{\Omega}') \rightarrow (E, \vec{\Omega}), t) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t)] + Q_f(\vec{r}, E, t)$$

$$Q_f(\vec{r}, E, t) = \frac{1}{4\pi} \chi(\vec{r}, E, t) \int_0^{\infty} dE' \left[v \Sigma_f(\vec{r}, E') \int_{4\pi} d\vec{\Omega} [\phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}, t)] \right]$$

□ Traitement de la variable temporelle : équation stationnaire avec introduction de la notion de criticité

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \rho Q_f(\vec{r}, E) \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$$

$$0 = -\text{div}[\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})] - \Sigma_{tot}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ + \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^{\infty} dE' [\Sigma_d(\vec{r}, (E', \vec{\Omega}') \rightarrow (E, \vec{\Omega})) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}')] + \frac{1}{K_{eff}} Q_f(\vec{r}, E)$$

Pause 'Neutronique : les bases'

- Traitement de la variable énergétique : équation du transport stationnaire multigroupe

Soit $g = [E_g; E_{g+1}]$, on suppose $X(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = X_g(\vec{r}, \vec{\Omega})$

$$0 = -\text{div}[\vec{\Omega} \phi_g(\vec{r}, \vec{\Omega})] - \Sigma_{g_{tot}}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \phi_g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ + \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \sum_{g'} \Sigma_{g' \rightarrow g_d}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi_{g'}(\vec{r}, \vec{\Omega}') + \frac{1}{K_{eff}} Q_{g_f}(\vec{r})$$

$$Q_{g_f}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \chi_g(\vec{r}) \sum_{g'} \nu \Sigma_{g'_f}(\vec{r}) \int_{4\pi} d\vec{\Omega} [\phi_{g'}(\vec{r}, \vec{\Omega})]$$

- Limite de cette approximation : le phénomène physique d'autoprotection doit être modélisé

Pause 'Neutronique : les bases'

- ❑ **Traitement de la variable angulaire : approches classiques**
 - Méthode P_n : projection sur la base des harmoniques sphériques
 - Méthode S_n : projection sur des ordonnées discrètes
- ❑ **Traitement de la variable spatiale: nombreuses méthodes numériques classiques (différences finies, méthodes nodales ou éléments finis, etc)**
- ❑ **D'autres formes de l'équation du transport existent:**
 - Forme intégrale : traitement par méthode des probabilités de collisions ou par méthode des caractéristiques
 - Forme variationnelle

Pause 'Neutronique : les bases'

- ❑ L'autoprotection: les effets quantiques régissant la stabilité du noyau conduisent à une structure résonante des sections efficaces
 - La largeur des résonances des sections efficaces décroît avec l'énergie
 - On distingue
 - le domaine des résonances résolues
 - le domaine des résonances non-résolues
 - le continuum

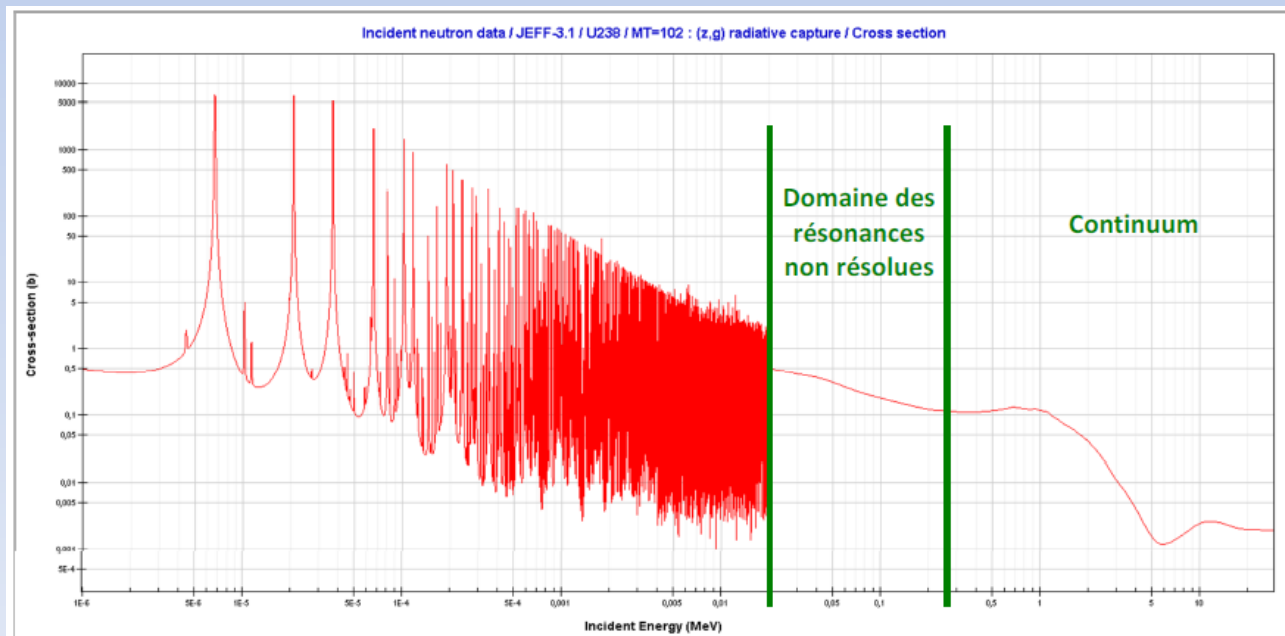


Figure 2: section efficace de capture de l'Uranium 238

Pause 'Neutronique : les bases'

- ❑ L'autoprotection: les effets quantiques régissant la stabilité du noyau conduisent à une structure résonante des sections efficaces
 - La largeur des résonnances des sections efficaces décroît avec l'énergie
 - On distingue
 - le domaine des résonnances résolues
 - le domaine des résonnances non-résolues
 - le continuum
 - Les résonnances sont des pièges pour le neutron qui est thermalisé par chocs discrets : le flux est fortement déprimé très localement
- ❑ Les méthodes de prise en compte de l'autoprotection classiques:
 - Méthode de Livolant-Jeanpierre et utilisation de section de dilution
 - Méthode des tables de probabilités

Pause 'Neutronique : les bases'

□ L'autoprotection

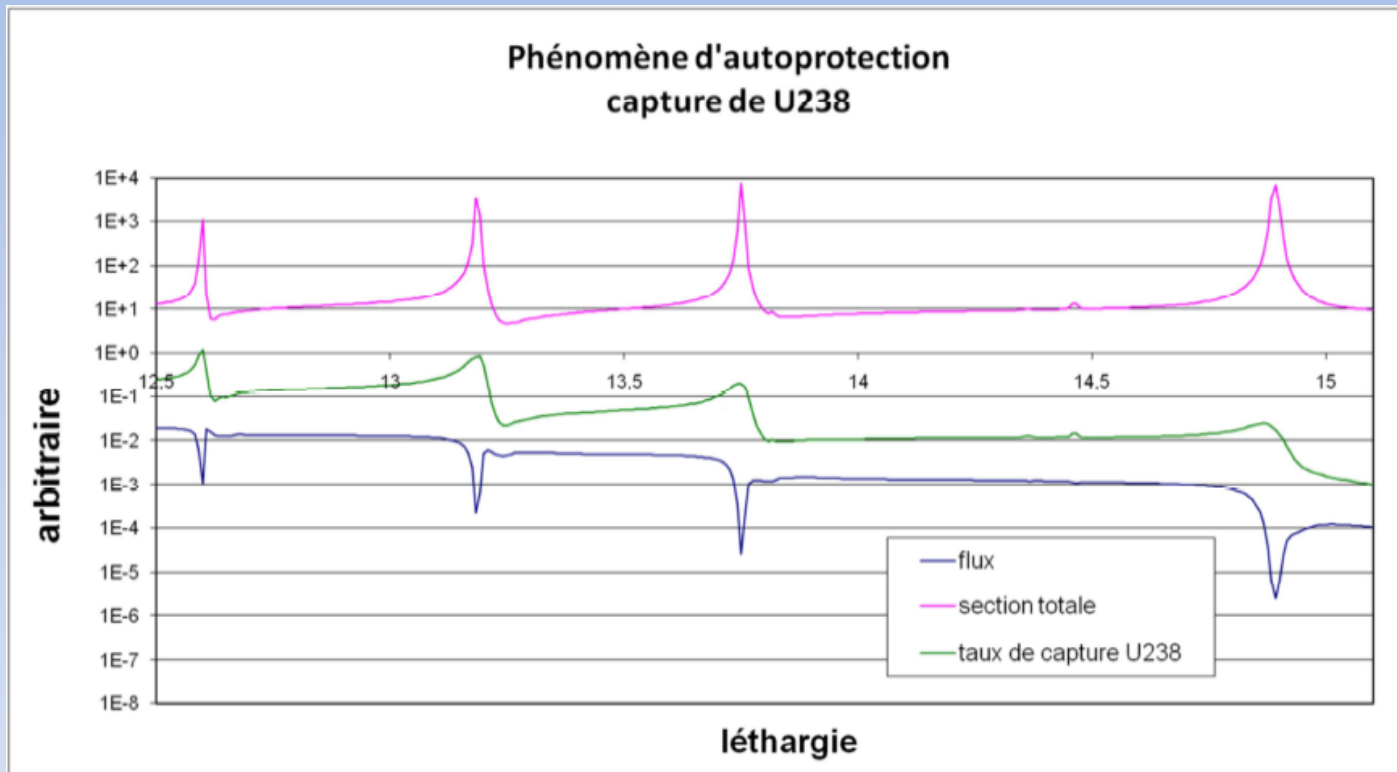


Figure 3 : phénomène d'autoprotection sur les 4 premières résonances de l'Uranium 238 - cellule rapide

□ Les méthodes de prise en compte de l'autoprotection classiques:

- Méthode de Livolant-Jeanpierre et utilisation de section de dilution
- Méthode des tables de probabilités

Pause 'Neutronique : les bases'

- ❑ L'hétérogénéité spatiale : un autre problème d'échelle
 - Libre parcours moyen d'un neutron thermique : plusieurs mm
 - La distribution des neutrons est fortement perturbée dans la pastille
 - La géométrie d'un cœur est de l'ordre du m
 - ⇒ Un traitement explicite ferait intervenir $\approx 1000^3$ mailles de calcul !!!
- ❑ Hétérogénéité + Autoprotection, la solution: schéma de calcul à 2 niveaux
 - Niveau « réseau » ou « assemblage » : modélisation fine des crayons avec des conditions limites de répétition infinie + modélisation approchée des fuites axiales et radiales + modélisation de l'autoprotection avec des groupes très fins (plusieurs centaines de groupes)
 - Etape de transition (allègement numérique des données) :
 - Condensation énergétique: les sections sont « moyennées » sur une dizaine de groupes larges
 - Homogénéisation spatiale : la cellule ou l'assemblage est homogénéisé et les sections sont ainsi moyennée pour le représenter
 - Niveau « cœur » : les sections condensées et homogénéisées sont utilisées pour représenter le cœur entier.

Pause 'Neutronique : les bases'

❑ Le coefficient de multiplication effectif (solution de l'eq. : valeur propre)

$$k_{eff} = 1.00000 \rightarrow \text{milieu critique}$$

$$k_{eff} < 1.00000 \rightarrow \text{milieu sous-critique}$$

$$k_{eff} > 1.00000 \rightarrow \text{milieu sur-critique}$$

$$k_{eff} > 1 + \beta_{eff} \approx 1.00650 \rightarrow \text{milieu prompt-critique}$$

❑ Le flux $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ (solution de l'eq. : vecteur propre)

– Flux scalaire :
$$\phi(\vec{r}, E) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

– Courant neutronique :
$$\vec{J}(\vec{r}, E) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \vec{\Omega} \cdot \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

En Pratique

Cas A : la sphère critique

❑ Géométrie (décrite par une seule variable)

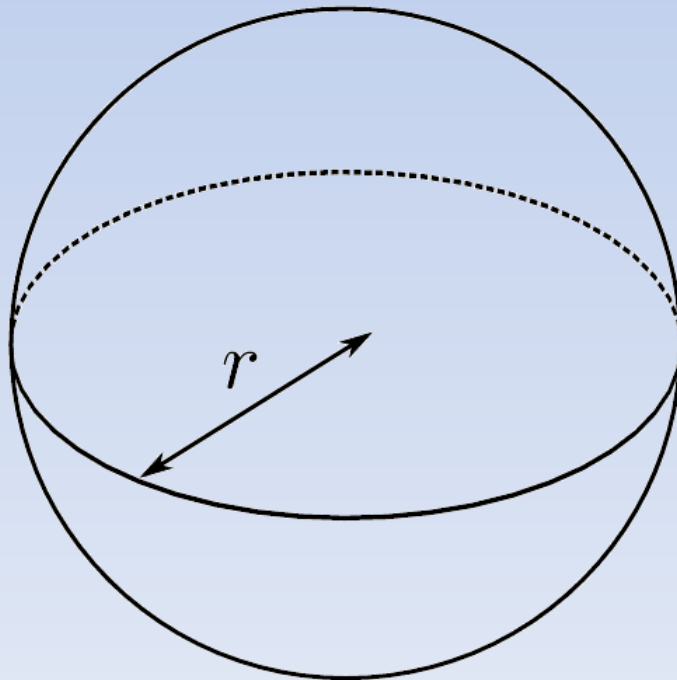
– r : rayon de la sphère

❑ Composition (décrite par deux variables)

– $[U235]$: densité d'atomes de U235

– $[U238]$: densité d'atomes de U238

NB : $E\% = [U235]/([U235]+[U238])$ l'enrichissement atomique en U235



En Pratique

Cas B : le milieu homogène infini

- ❑ Géométrie (décrite par aucune variable)
 - Pas de géométrie
 - ❑ Composition (décrite par deux variables)
 - [U235] : densité d'atomes de U235
 - [U238] : densité d'atomes de U238
- NB : $E\% = [U235]/([U235]+[U238])$ l'enrichissement atomique en U235

En Pratique - TRIPOLI

Cas A : la sphère critique

GEOMETRIE	}	DEFINITION DE LA GEOMETRIE
TITRE SPHERE CRITIQUE		
TYPE 1 SPHERE 8.7407		
VOLU 1 COMBI 1 0 0 0 FINV		
FIN	}	DEFINITION DES COMPOSITIONS
COMPOSITION 1		
PONCTUAL 300 URANIUM 3		
U234 4.9184E-4		
U235 4.4994E-2	}	ASSOCIATION VOLUMES ↔ MILIEUX
U238 2.4984E-3		
FIN_COMPO		
GEOMCOMP		
URANIUM 1 1	}	DEFINITION D'UNE SOURCE INITIALE DE NEUTRONS
FIN_GEOMCOMP		
LIST_SOURCE 1		
SOURCE		
NEUTRON PONCTUAL 0 0 0	}	PARAMETRES DE SIMULATION
ANGULAR_DISTRIBUTION ISOTROPIC		
ENERGETIC_DISTRIBUTION SPECTRE WATT_SPECTRE		
TIME_DISTRIBUTION DIRAC 0		
FIN_SOURCE	}	
FIN_LIST_SOURCE		
SIMULATION		
CRITICITE BATCH 1000 SIZE 1000 EDITION 1000		
ENERGY_INF NEUTRON 1.E-11	}	
PARTICULES 1 NEUTRON		
FIN SIMULATION	}	

En Pratique - TRIPOLI

Cas B : le milieu homogène infini

A vous de jouer

En Pratique - DRAGON

Cas A : la sphère critique

```
LIBMIX := LIB: :: EDIT 0
  NMIX 1   CTRA WIMS
  SUBG
  ANIS 2
  DEPL LIB: DRAGON FIL: DLIB_J2_295
  MIXS LIB: DRAGON FIL: DLIB_J2_295
  MIX 1 300.0
  U234 = 'U234'  4.9184E-4 1
  U235 = 'U235'  4.4994E-2 1
  U238 = 'U238'  2.4984E-3 1 ;
GCELL := GEO: :: SPHERE 1
  R+ VOID  RADIUS 0.0 8.7407
  MIX 1
  SPLTR 15 ;
TRACK := SNT: GCELL ::
  TITLE 'Fuel'
  EDIT 1 MAXR 30
  DIAM 1 SN 16
  SCAT 2
  QUAB 7 ;
LIBMIXS := USS: LIBMIX TRACK :: EDIT 5 ARM ;
SYS := ASM: LIBMIXS TRACK :: ARM ;
FLUX := FLU: SYS LIBMIXS TRACK ::
  TYPE K   EXTE 100 1E-4 THER 5 1E-4 ;
```

DEFINITION DES COMPOSITIONS

DEFINITION DE LA GEOMETRIE
ASSOCIATION VOLUMES ↔ MILIEUX

ANALYSE DE LA GEOMETRIE

AUTOPROTECTION

PARAMETRES DE SIMULATION