



**PHYSIQUE DES MILIEUX MULTIPLICATEURS SOUS-CRITIQUES
ET VALIDATION EXPERIMENTALE**

**M. SALVATORES
CEA - DRN
Journées SATURNE
30-31 Janvier 1996
RAMATUELLE**

1. INTRODUCTION

Le principe du couplage d'un accélérateur de particules, d'une cible de spallation et, éventuellement, d'un milieu multiplicateur sous-critique a été proposé dans les années '50 et plusieurs applications (et les études conceptuelles associées) ont été proposées (Réf. 1, 2, 3, parmi beaucoup d'autres ; voir aussi réf. 4 pour une vue d'ensemble).

L'analyse physique du potentiel de tels systèmes a fait aussi l'objet de nombreuses études. En particulier, les études des références 5, 6 et 7 concernent le rôle de ces systèmes (ici appelés "hybrides") dans le contexte de la transmutation des déchets radioactifs à vie longue.

Ces études font ressortir le rôle tout à fait essentiel joué par les caractéristiques physiques du milieu multiplicateur.

La présente note rappelle rapidement quelques idées de base concernant les caractéristiques du bilan énergétique dans un système hybride, puis, sur la base de quelques considérations physiques simples, indique la possibilité de validation expérimentale des propriétés des milieux multiplicateurs sous-critiques dans la maquette MASURCA du CEA-Cadarache, jusqu'ici consacrée aux études expérimentales sur la physique des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Les résultats d'une expérience exploratoire effectuée en décembre 1995, sont aussi évoqués.

Les activités, décrites ici, sont effectuées au CEA dans le cadre du programme ISAAC (Investigations sur les systèmes Sous-critiques Alimentés par Accélérateur).

2. QUELQUES RAPPELS PHYSIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DES HYBRIDES

Un système hybride peut être représenté de façon schématique comme indiqué dans la figure 1.

Il est intéressant de remarquer qu'on peut présenter le principe de fonctionnement d'un système hybride de deux façons équivalentes :

- 1 - On injecte W_0 watts (sous forme d'un faisceau de protons, par exemple) et on produit W watts dans le milieu sous-critique. On "amplifie" l'énergie avec un gain G :

$$G = \frac{W}{W_0}$$

- 2 - On produit une source externe de neutrons qu'assure le bilan neutronique dans un système sous-critique.

Pour pousser l'analyse plus loin, on se servira des résultats présentés dans la réf. 5. Dans cette référence, on rappelle que pour un système sous-critique ($K_{eff} < 1$), la condition pour avoir un système stationnaire s'exprime de la façon suivante :

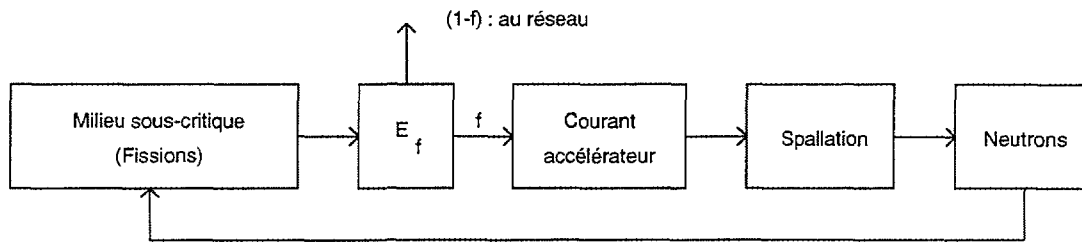
$$S_{ext} + v = \frac{v}{K_{eff}}$$

où v : nombre de neutrons prompts/fission
 S_{ext} : source externe de neutrons (n/fission)
 K_{eff} : facteur de multiplication du système sous-critique

Par exemple, dans un système hybride, on peut exprimer S_{ext} de la façon suivante :

$$S_{ext} = \Gamma \cdot f$$

où : Γ = nombre de neutrons qui reviennent au milieu sous-critique si **toute** l'énergie de fission E_f est transformée en courant de protons selon le schéma suivant :



et f = fraction de E_f utilisée pour alimenter l'accélérateur

Pour évaluer quantitativement un ordre de grandeur pour Γ , on peut faire les simples considérations suivantes :

Si l'énergie des protons accélérés est $E_p \approx 1 \div 2$ GeV et pour des cibles telles que :

$$Z = \text{neutrons/proton} \approx 40 \div 50$$

on a que :

$$\Gamma = Z \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot \frac{E_f}{E_p} \Rightarrow 1 \div 1.5 \text{ neutrons/fission}$$

(avec l'hypothèse sur les rendements $\eta_e \approx 0.4$, $\eta_p \approx 0.5$)

En ce qui concerne la relation entre les 2 "points de vue" évoqués plus haut (amplification d'énergie et production d'une source externe de neutrons), il est clair que l'"amplification" et l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'accélérateur, sont liées de la façon suivante :

$$G = \frac{W}{W_0} = \frac{1}{f}$$

$$\text{Par ailleurs : } \Gamma f + v = \frac{v}{K_{eff}} \Rightarrow f = \frac{v(1 - K_{eff})}{\Gamma K_{eff}}$$

Dans le but d'avoir des ordres de grandeur représentatifs de f (et de G), on peut considérer les valeurs suivantes :

$$v \approx 3$$

$$\Gamma \approx 1.5$$

$$K_{eff} \approx 0.95$$

Dans ce cas, on a : $f \approx 10\%$ (donc $G = 10$).

Cela peut être interprété comme une amplification de l'énergie par un facteur 10, ou bien comme une consommation de 10 % de l'énergie pour alimenter le système sous-critique.

Il est utile de rappeler quelques conséquences physiques des relations simples présentées plus haut :

- Si toute l'énergie produite par le réacteur sous-critique est utilisée pour alimenter l'accélérateur, on peut être très sous-critique (ex. $k_{\text{eff}} \simeq 0.7$).
- Puisque la source externe $S_{\text{ext}} = \Gamma f$ et Γ a une valeur fixée par E_p et le type de cible, S_{ext} sera d'autant plus importante par rapport à v ($\approx 2.5 \div 3$) que le système est sous-critique ($f \Rightarrow 1$, $S_{\text{ext}}^{\text{max}} \Rightarrow 1 \div 1.5$).
- Si $f \simeq 10 \div 20\%$, l'apport de neutrons/fission est de $0.3 \div 0.4$ neutrons/fission (à $k_{\text{eff}} \simeq 0.9$).
- En ce qui concerne le courant I de l'accélérateur :

$$I = \frac{\Gamma f}{Z} W \frac{1}{E_f} \quad \Rightarrow \quad I \simeq 20 \div 50 \text{ mA/GWth} \quad (W \text{ étant la puissance du milieu multiplicateur en watt})$$

(et ceci pour le cas $f = 0.2$, $Z = 30 \div 50 \text{ n/p}$)

Cette relation indique que I sera d'autant plus faible que le système est proche de la criticité et que la puissance du réacteur sous-critique sera faible. Par exemple : $k_{\text{eff}} = 0.95$, $W = 300 \text{ MWth}$, $I \simeq 5 \text{ mA}$.

3. PHYSIQUE DES MILIEUX SOUS-CRITIQUES

La validation expérimentale des caractéristiques physiques du milieu multiplicateur (sous-jacentes à la relation qui donne le bilan énergétique) est essentielle pour valider l'intérêt et la faisabilité des différents systèmes proposés.

Une démarche de validation analytique est souhaitable pour séparer les différents effets et les valider séparément. Le découplage (du moins partiel) entre la source externe (à valider séparément) et le milieu multiplicateur, permettrait pour ce dernier milieu d'utiliser les installations et les méthodes expérimentales utilisées pour la validation expérimentale de la physique des réacteurs critiques.

En effet, puisque après $1 \div 2$ chocs, les neutrons perdent "mémoire" de la différence de distribution en énergie entre neutrons de fission et neutrons issus de spallation, on peut envisager d'étudier le comportement du milieu sous-critique à l'aide d'une source externe, avec un spectre parfaitement connu. De façon intuitive, ce fait est mis en évidence pour une simple investigation des spectres des neutrons issus de spallation (spectre d'"évaporation") et d'un spectre typique de milieu multiplicateur (voir fig. 2).

Par ailleurs, le flux neutronique dans le milieu multiplicateur avec source est solution de l'équation de Boltzman inhomogène :

$$A \underline{\Phi} = M \underline{\Phi} + \underline{S}$$

Opérateur de "disparition"
Opérateur de multiplication par fission
Source externe

La solution peut être représentée ainsi :

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_S + \alpha \underline{\Phi}_O \quad (1)$$

où $\underline{\Phi}_S$ est la solution "sans fission" :

$$A \underline{\Phi}_S = \underline{S} \quad (2)$$

et $\underline{\Phi}_O$ est la solution du système sous-critique équivalent :

$$A \underline{\Phi}_O = \frac{1}{K_{eff}} M \underline{\Phi}_O \quad (3)$$

α est donnée par :

$$\alpha = \frac{K_{eff}}{1 - K_{eff}} \cdot \frac{\langle \underline{\Phi}_O^* M \underline{\Phi}_S \rangle}{\langle \underline{\Phi}_O^* M \underline{\Phi}_O \rangle}$$

où $\underline{\Phi}_O^*$ est la solution du système adjoint de (3).

L'expression de α et la représentation formelle de $\underline{\Phi}$:

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_S + \frac{K_{eff}}{1 - K_{eff}} \frac{\langle \underline{\Phi}_O^* M \underline{\Phi}_S \rangle}{\langle \underline{\Phi}_O^* M \underline{\Phi}_O \rangle} \underline{\Phi}_O$$

mettent en évidence que pour des faibles sous-criticités, ($1 - K_{eff} \rightarrow 0$), la forme (en espace et énergie) du flux est dominée par le flux "sans source" $\underline{\Phi}_O$.

Inversement, à forte sous-criticité ($1 - K_{eff} \rightarrow \sim 0,5$), la source est la contribution dominante.

Donc, dans les cas d'intérêt pour les applications (sous-criticités relativement faibles), les caractéristiques du milieu multiplicateur peuvent être étudiées indépendamment (en première approximation) des caractéristiques de la source.

Par ailleurs, à partir de ces considérations, on peut aussi vérifier que la "vrai" relation de bilan n'est pas simplement :

$$\Gamma f + v = \frac{v}{k_{eff}}$$

mais que cette relation (où on a fait l'hypothèse que les neutrons de la source et les neutrons de fission ont la même importance) doit être écrite :

$$\Gamma f \varphi^* + \bar{\nu} = \frac{\bar{\nu}}{k_{\text{eff}}}$$

φ^* (= efficacité de la source externe) étant un facteur en général $\neq 1$.

En effet, on peut écrire l'équation de Boltzman pour le système sous-critique avec source :

$$A\Phi = \chi(E) \int \nu \Sigma_f(E', r) \Phi(E', r) dE' + S_p(r, E) \cdot f \int \Sigma_f(E', r) \Phi(E', r) dE'$$

où on a explicité les termes $M\Phi$ et S de l'équation de Boltzman.

La source externe S_p est définie en énergie et en espace :

$$S_p(E, r) = \chi_s(E) P(r)$$

$$(\text{normalisation : } \int S_p(E, r) dr dE = \int P(r) dr = \Gamma \text{ neutrons / fiss})$$

Le même système sous-critique peut être décrit par :

$$A\Phi_0 = \frac{\chi(E)}{k_{\text{eff}}} \int \nu \Sigma_f(E', r) \Phi_0(E', r) dE'$$

ou par le système adjoint :

$$A^* \Phi_0^* = \frac{\nu \Sigma_f(E)}{k_{\text{eff}}} \int \chi(E') \Phi_0^*(E', r) dE'$$

Des opérations simples (et typiques des algorithmes des perturbations) permettent de réécrire l'équation de bilan :

$$\left(1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}}\right) \bar{\nu} + \bar{\mu} = 0$$

$$\text{où : } \bar{\mu} = \mu \varphi^* \quad \mu = f\Gamma$$

$$\text{et : } \boxed{\varphi^* = \bar{S}_p^* / \bar{\chi}^*} \quad (\text{en général } \varphi^* \neq 1)$$

Dans cette expression, le numérateur et le dénominateur sont donnés par :

$$\bar{S}_p^* = \frac{\int dr \langle \Phi_0^*, S_p \rangle}{\int dr \langle S_p \rangle} \quad \Leftarrow \text{"importance" des neutrons de la source}$$

$$\bar{\chi}^* = \frac{\int dr \langle \Phi_0^*, \chi \rangle \cdot \langle \Sigma_f, \Phi \rangle}{\int dr \langle \Sigma_f, \Phi \rangle} \quad \Leftarrow \text{"importance" des neutrons de fission}$$

où on a utilisé la notation suivante : $\langle \rangle = \int dE$.

4. LE PROGRAMME EXPERIMENTAL MUSE

Dans le cadre de ISAAC, un programme expérimental a démarré à MASURCA. Ces expériences (MUSE : Multiplication avec Source Externe) permettent de mesurer G et ϕ^* , à partir d'une source connue S . En effet :

$$G = \frac{W}{W_0} = \frac{W\Gamma}{S} \quad (S = \Gamma W_0 = \Gamma(n/\text{fission}), W_0 \text{ (fissions/sec)})$$

$$G = \frac{W\Gamma}{S} = \frac{1}{f} = \frac{\Gamma\phi^*}{v} \left(\frac{k_{\text{eff}}}{1 - k_{\text{eff}}} \right)$$

$$\frac{\phi^*}{v} = \frac{W(\text{watts}) \times 3.1 \times 10^{10} \left(\frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} \right)}{S(n/\text{sec})}$$

S étant connue, on mesure W et $\rho = \frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}}$.

Le programme expérimental permet aussi de mesurer les distributions de flux ϕ dans le milieu sous-critique, avec \underline{e} sans source extérieure.

Pour ces expériences, la maquette critique MASURCA à Cadarache, est bien adaptée et présente une grande flexibilité pour la réalisation de milieu multiplicateurs ("coeurs") de compositions et géométries variables. En effet, les différents constituants du coeur à étudier sont contenus dans des réglettes à base carrée (sodium, matériaux fertiles, matériaux de structure) ou circulaires (matériaux fissiles) de 1/2 pouce de côté ou de diamètre et de 4 ou 8 pouces de hauteur.

Les réglettes du coeur sont assemblées dans des tubes à section carrée de 4 pouces de côté et d'environ 3 mètres de hauteur. Ces tubes sont suspendus verticalement côté à côté à une plaque horizontale d'acier supportée par une structure en béton armé.

Des coeurs d'un volume allant jusqu'à 6 000 litres peuvent être réalisés. La conception de MASURCA permet des mesures performantes :

- des détecteurs d'irradiations peuvent être placés dans le réseau (entre les réglettes),
- deux canaux radiaux perpendiculaires situés à proximité du plan médian du coeur et autant de canaux axiaux que nécessaire permettent l'introduction de chambres à fission, de détecteurs par activation, de TLD (mesures d'échauffement γ),
- de nombreux compteurs distribués dans le coeur permettent de suivre l'évolution du flux neutronique tant pour la détermination par méthodes statiques (multiplication de source) que dynamiques (cinétique inverse) des variations de réactivité et en particulier du niveau de sous-criticité.

Une première expérience (MUSE-1) a été effectuée à MASURCA en décembre 1995. Le but de cette première expérience a été principalement la mise au point des techniques de mesure.

En pratique, un coeur critique déjà présent dans MASURCA (combustible $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$, structures en acier, caloporteur simulé sous forme de réglettes de sodium), a été rendu sous-critique, par élimination d'éléments à la périphérie du coeur (voir fig. 3 où une coupe au plan médian du coeur est présentée).

Dans ce coeur, une source de Cf-252 (d'intensité 8×10^7 n/sec) a été introduite dans un canal vertical situé en proximité de l'axe central du coeur.

Cette source a pu être déplacée à trois positions axiales dans le coeur ($z = 0$, $z = + 10$ cm, $z = + 25$ cm).

Pour chaque position de la source, des mesures de traverses radiales et axiales (voir figure 3) de taux de fission de l'U-235 ont été réalisées. Par exemple, sur la figure 4 sont reportées les valeurs expérimentales obtenues sur trois traverses axiales, situées à des distances radiales croissantes par rapport à l'axe central du coeur, la source de Cf-252 étant en position "haute" (+ 25 cm).

On remarque de façon évidente la "distortion" de la distribution axiale du flux près de la source, qui s'estompe après quelques libres parcours moyens des neutrons.

Enfin, la mesure de la sous-criticité a été effectuée, à l'aide de la méthode de "multiplication de source modifiée", développée pour les études expérimentales des coeurs des RNR. La réactivité mesurée (et correspondante à $1 - K_{\text{eff}} = 0,01746$), a été calculée, avec un excellent accord calcul/expérience. Des calculs détaillés sont en cours.

5. CONCLUSIONS

La neutronique des milieux multiplicateurs sous-critiques joue un rôle essentiel pour établir les performances des systèmes hybrides et cela pour tout type d'application (transmutation des déchets, production d'énergie, etc ...).

La validation des méthodes et des données nucléaires associées à ces milieux multiplicateurs sous-critiques peut être faite par des expériences adaptées dans une maquette expérimentale du type de MASURCA. Les premiers résultats obtenus sont encourageants en ce qui concerne la faisabilité et la précision des mesures.

Sur la base de ces indications, il a été proposé un programme d'expériences à MASURCA (programme MUSE en 1996-1997) avec l'objectif de valider les caractéristiques physiques des milieux sous-critiques avec source externe et des méthodes de calculs associés.

Les paramètres à mesurer sont :

- niveau de sous-criticité
- "Gain" ou "Amplification" G en énergie (ou $f = \frac{1}{G}$).
- Importance des neutrons de la source (à différents niveaux de sous-criticité).
- Paramètres cinétiques du milieu sous-critique (ex. : β_{eff}).
- Distributions de flux à différents niveaux de sous-criticité.
- Effet du découplage spatial en situation sous-critique.

et cela en fonction de :

- Position de la source dans le coeur.
- Spectre de la source.
- Milieu ralentisseur autour de la source (acier, plomb, etc ...)
- Composition du coeur et type de combustible.

La poursuite du programme MUSE est donc prévue en 1996 et 1997, et sa définition se fait dans le cadre du GDR GEDEON. Enfin, il faut bien rappeler que ces programmes expérimentaux sont complémentaires aux programmes sur la physique de la spallation, effectués par ailleurs (en particulier au Laboratoire National SATURNE), aussi dans le cadre des activités de GEDEON.

REFERENCES

- [1] C. Bowman et al., Nucl. Instr. Methods, A320, 336 (1992)
- [2] T. Takizuka et al., Specialists Meeting on Accelerator-Driven Transmutation (Stockholm, 24-28 June 1991)
- [3] C. Rubbia et al., CERN Report AT/95-44 (ET) 1995
- [4] Proceedings of the Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation and Technologies, Las Vegas, 25-29 July 1994
- [5] M. Salvatores et al., Nucl. Sci. Eng. 116, 1, 1994
- [6] M. Salvatores et al., Nucl. Sci. Eng. 120, 18, 1995
- [7] M. Salvatores et al., Nucl. Sci. Eng., à paraître en 1996
- [8] G. Van Tuyle et al., BNL Report 52 279 (1991)

Fig. 1

Système Hybride

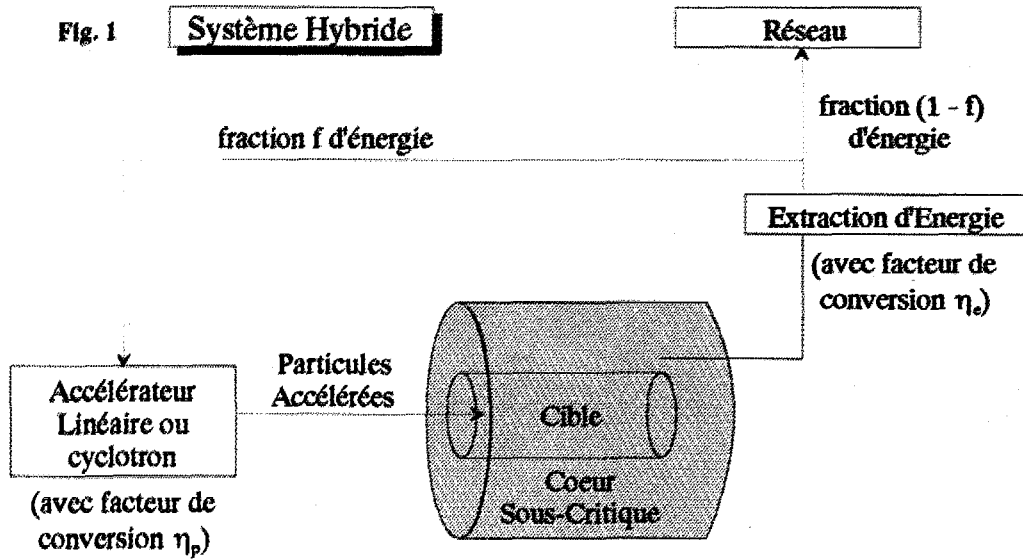


Fig. 2 - Comparison between evaporation spectrum and fission spectrum in the PHOENIX target model (oxide fuel) (Ref. 8)

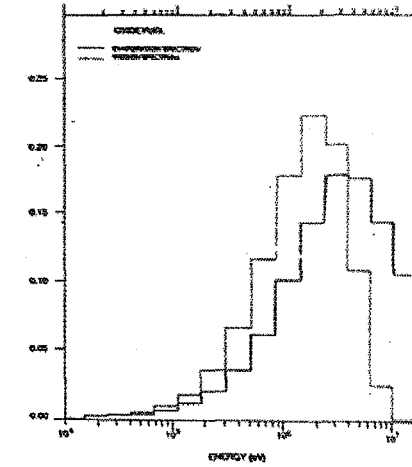


Fig. 3 - Expérience MUSE-1 à MASURCA
Coupe XY au plan médian coeur

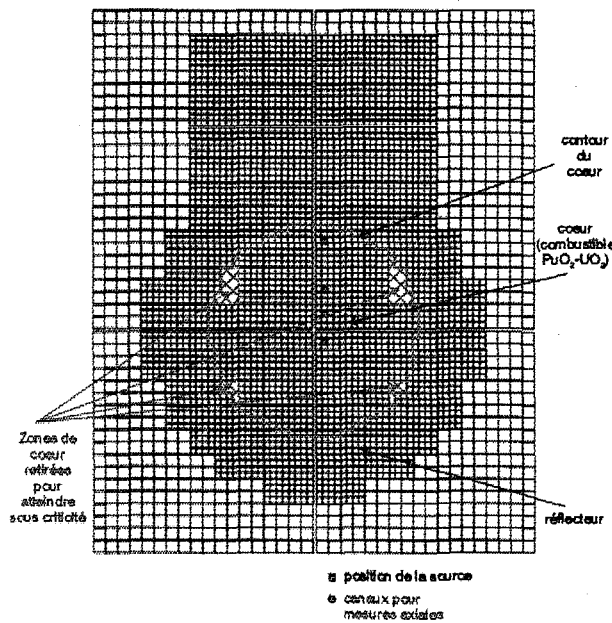


Fig. 4 -

