# NORME INTERNATIONALE

# ISO 10645

Première édition
1992-03-01

## Énergie nucléaire — Réacteurs à eau légère — Calcul de la puissance résiduelle des combustibles nucléaires

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

*Nuclear energy — Light water reactors — Calculation of the decay heat power in nuclear fuels*

ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992

NORME ISO

Numéro de référence
ISO 10645:1992(F)

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

La Norme internationale ISO 10645 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 85, *Énergie nucléaire*, sous-comité SC 3, *Technologie des réacteurs de puissance*.

ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992

L'annexe A fait partie intégrante de la présente Norme internationale.

© ISO 1992
Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

## Introduction

La puissance résiduelle des combustibles nucléaires est la puissance thermique résultant de la décroissance radioactive des produits de fission et d'activation du combustible nucléaire, à la suite de l'arrêt d'un réacteur.

La puissance résiduelle représente une grandeur physique importante, lorsqu'il s'agit de concevoir des systèmes dans lesquels elle doit être considérée comme source de chaleur.

La présente Norme internationale permet de définir la puissance résiduelle locale en fonction de la puissance thermique du combustible pendant le fonctionnement. La distribution spatiale de la transformation de l'énergie en chaleur, par exemple rayonnement gamma, n'est pas prise en compte. Celle-ci pourra, si nécessaire, être évaluée par l'utilisateur.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

La procédure de calcul utilisée présente l'avantage de faciliter le calcul de la puissance résiduelle tout en offrant une exactitude analogue à celle des codes de calcul de sommations.

ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-
c38f76936ec/iso-10645-1992

Pour calculer la puissance résiduelle ou ses composantes individuelles, l'utilisateur a la possibilité de recourir aux méthodes ou aux bases de données de son choix, dans la mesure où la validité de ces dernières est reconnue. Le calcul de la contribution des produits de fission ne peut quant à lui intervenir, que par comparaison avec la présente Norme internationale.

La puissance générée par les neutrons retardés et les structures actives n'est pas prise en considération.

Page blanche

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992

# Énergie nucléaire — Réacteurs à eau légère — Calcul de la puissance résiduelle des combustibles nucléaires

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale définit les bases de calcul de la puissance résiduelle du combustible nucléaire non recyclé des réacteurs à eau légère. Les différentes composantes à prendre en compte dans le calcul sont les suivantes:

— la contribution des produits de fission issus de la fission nucléaire;

— la contribution des actinides;

— la contribution des isotopes résultant de la capture des neutrons dans les produits de fission.

La présente Norme internationale s'applique aux réacteurs à eau légère (à eau pressurisée ou à eau bouillante) chargés avec un mélange de combustibles nucléaires constitué de $^{235}U$ et $^{238}U$. Elle ne peut en aucun cas s'appliquer au combustible nucléaire recyclé.

Les procédures de calcul s'appliquent à des périodes de décroissance comprises entre 0 et $10^9$ s.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/eb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992

## 2 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent.

**2.1 puissance résiduelle des combustibles nucléaires:** La puissance thermique résultant de la décroissance radioactive des produits de fission et d'activation du combustible nucléaire, à la suite de l'arrêt d'un réacteur à fission.

**2.2 temps d'exploitation:** Toute la période allant du chargement initial du réacteur en combustible jusqu'à l'arrêt définitif considéré.

**2.3 temps de décroissance:** La période de temps qui succède au temps d'exploitation.

**2.4 histogramme de puissance:** Histogramme qui rend compte approximativement de la variation réelle de la puissance dans le temps, subdivisé en intervalles correspondant chacun à une composition et à une puissance utile constantes du combustible considéré.

## 3 Symboles et indices

### 3.1 Symboles

| Symbole | Grandeur | Unité |
|---|---|---|
| $A(t)$ | Facteur à appliquer à la puissance résiduelle $P_S$ des produits de fission pour le calcul de la contribution $P_A$ des actinides (autres que $^{239}U$ et $^{239}Np$) | — |
| $f_i(t)$ | Puissance résiduelle des produits de fission au temps $t$ après une fission nucléaire unique du nucléide fissile $i$ | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission}}$ |
| $\Delta f_i(t)$ | Écart-type de $f_i(t)$ | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission}}$ |
| $F_i(t_k, T_k)$ | Puissance résiduelle des produits de fission du nucléide fissile $i$ au temps $t_k$ après un intervalle de temps d'irradiation $T_k$ correspondant à une fission par seconde | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission/s}}$ |
| $\Delta F_i(t_k, T_k)$ | Écart-type de $F_i(t_k, T_k)$ | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission/s}}$ |

| Symbole | Grandeur | Unité |
|---|---|---|
| $H(t)$ | Facteur à appliquer à la puissance résiduelle des produits de fission $P_S$ pour le calcul de la contribution $P_E$ résultant de la capture des neutrons dans les produits de fission (autres que $^{133}Cs$) | — |
| $P_k$ | Puissance thermique totale du combustible pendant le $k^{ième}$ intervalle de temps $T_k$ | 1) |
| $P_{ik}$ | Contribution du nucléide fissile $i$ à la puissance thermique du combustible pendant le $k^{ième}$ intervalle de temps $T_k$ | 2) |
| $P_N(t,T)$ | Puissance résiduelle totale au temps $t$ à la fin du temps d'exploitation $T$ | 2) |
| $P_S(t,T)$ | Puissance résiduelle totale calculée sur la base des décroissances des produits de fission | 2) |
| $\Delta P_S(t,T)$ | Écart-type de $P_S(t,T)$ | 2) |
| $P_{Si}(t,T)$ | Contribution du nucléide fissile $i$ à la puissance résiduelle $P_S(t,T)$ | 2) |
| $\Delta P_{Si}(t,T)$ | Écart-type de $P_{Si}(t,T)$ | 2) |
| $P_E(t,T)$ | Contribution à la puissance résiduelle, due à la capture des neutrons dans les produits de fission (autres que $^{133}Cs$) | 2) |
| $P_B(t,T)$ | Contribution des actinides $^{239}U$ et $^{239}Np$ à la puissance résiduelle | 2) |
| $P_A(t,T)$ | Contribution des actinides (autres que $^{239}U$ et $^{239}Np$) à la puissance résiduelle | 2) |
| $P_{Cs}(t,T)$ | Contribution du $^{134}Cs$ à la puissance résiduelle | 2) |
| $Q_i$ | Énergie thermique totale libérée à la suite d'une seule fission nucléaire du nucléide fissile $i$ | $\frac{\text{MeV}}{\text{fission}}$ |
| $\Delta Q_i$ | Écart-type de l'énergie thermique libérée à la suite d'une seule fission nucléaire du nucléide fissile $i$ | $\frac{\text{MeV}}{\text{fission}}$ |
| $t$ | Temps de décroissance (voir 2.3 et figure 1) | s |
| $t_k$ | Temps suivant la fin du $k^{ième}$ intervalle de temps $T_k$ dans l'histogramme de puissance (voir figure 1) | s |
| $T$ | Temps d'exploitation (voir 2.2 et figure 1) | s |
| $T_k$ | Durée du $k^{ième}$ intervalle de temps dans l'histogramme de puissance (voir figure 1) | s |
| $T_{eff}$ | Temps d'exploitation moins les intervalles d'arrêt | s |
| $\alpha_{ij}$ | Coefficient utilisé pour exprimer la puissance résiduelle des produits de fission en tant que sommation de 24 fonctions exponentielles | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission}}$ |
| $\beta_{ij}$ | Coefficient utilisé pour exprimer l'écart-type[3] de la puissance résiduelle des produits de fission en tant que sommation de 24 fonctions exponentielles | $\frac{\text{MeV/s}}{\text{fission}}$ |
| $\lambda_{ij}$ | Exposant utilisé pour exprimer la puissance résiduelle des produits de fission et ses écarts-types en tant que sommation de 24 fonctions exponentielles | $s^{-1}$ |

1) Toute unité de puissance peut être utilisée.

2) La même unité que $P_k$.

3) Pour le $^{241}Pu$, cette valeur a été estimée à 5 %.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992

## 3.2 Indices

$i$ désigne les nucléides fissiles $^{235}U$, $^{238}U$, $^{239}Pu$, $^{241}Pu$

$j$ exprime la puissance résiduelle sous forme d'une sommation de fonctions exponentielles

$k$ dénombre les différents intervalles de temps indiqués dans l'histogramme de puissance

$m$ indique le nombre d'intervalles de temps $T_k$ figurant dans l'histogramme de puissance

## 4 Calcul de la puissance résiduelle

### 4.1 Généralités

Pour calculer la puissance résiduelle, il faut tenir compte des différentes composantes suivantes:

— contribution des produits de fission issus de la fission nucléaire des quatre nucléides, à savoir $^{235}U$, $^{238}U$, $^{239}Pu$ et $^{241}Pu$ (pour les autres nucléides fissiles, se référer à $^{235}U$);

— contribution des actinides;

— contribution des nucléides résultant de la capture des neutrons dans les produits de fission.

Les procédures de calcul s'appliquent à des temps de décroissance $t$ compris entre 0 et $10^9$ s.

La puissance résiduelle générée par les neutrons retardés et les structures actives n'est pas prise en considération dans la présente Norme internationale. L'évaluation de celle-ci incombe à l'utilisateur qui doit l'inclure dans toute analyse de puissance résiduelle.

### 4.2 Histogramme de puissance

En règle générale, la composition et la puissance utile du combustible considéré varient au cours du temps d'exploitation. Ce phénomène peut être pris en compte dans le calcul de la puissance résiduelle, en subdivisant le temps d'exploitation en intervalles correspondant chacun à une puissance et à une composition constantes de nucléides fissiles (composition approchée, voir figures 1 et A.1). Il faut veiller à ce que l'erreur systématique induite par cette approximation reste faible par rapport à l'erreur statistique résultant du calcul de la puissance résiduelle. Ce but peut être atteint en faisant la meilleure approximation possible de la puissance du combustible à la fin du temps d'exploitation. L'erreur introduite dans l'histogramme par l'approximation de la puissance décroît rapidement lorsque le temps de décroissance augmente; la précision de l'approximation dans chaque intervalle peut diminuer en augmentant la longueur $t_k$ de l'intervalle $k$ à partir de l'instant de décroissance considéré. Étant donné qu'une variation de la contribution de chaque nucléide fissile influe moins sur la puissance résiduelle qu'une variation de la puissance d'exploitation, une approximation grossière s'avèrera souvent suffisante.

Il convient de veiller à ce que, dans chaque intervalle de temps de l'histogramme, l'intégrale de la puissance totale et de la puissance de chaque nucléide fissile soit conforme à la valeur correspondante de l'histogramme.

### 4.3 Contribution des produits de fission

La contribution $P_S(t,T)$ des produits de fission à la puissance résiduelle se calcule à partir des contributions $P_{Si}(t,T)$ des quatre isotopes fissiles, en utilisant la formule suivante:

$$P_S(t,T) = \sum_{i=1}^{4} P_{Si}(t,T) \qquad \ldots (1)$$

Chaque contribution $P_{Si}(t,T)$ est elle-même constituée de la somme des puissances résiduelles des intervalles de temps $m$ de l'histogramme de puissance et est calculée comme suit:

$$P_{Si}(t,T) = \sum_{k=1}^{m} P_{Si}(t_k,T_k) = \sum_{k=1}^{m} \frac{P_{ik}}{Q_i} F_i(t_k,T_k) \qquad \ldots (2)$$

où

$P_{ik}$ est la puissance thermique libérée par fission;

$Q_i$ est l'énergie thermique totale libérée par une seule fission (voir tableau 1);

$P_{ik}/Q_i$ donne le taux de fission du nucléide fissile $i$.

$F_i(t_k,T_k)$ est la puissance résiduelle du nucléide fissile $i$ correspondant à une seule fission nucléaire par seconde, pendant un intervalle de temps $T_k$ et un temps de décroissance $t_k$. Elle se calcule à partir de l'énergie $f_i(t)$ libérée par les produits de fission au temps $t$, à la suite d'une fission unique et se formule comme suit:

$$F_i(t_k,T_k) = \int_0^{T_k} f_i(T_k - T' + t_k)\mathrm{d}T' \qquad \ldots (3)$$

$f_i(t)$ se calcule comme suit, en utilisant les coefficients $\alpha_{ij}$ et $\lambda_{ij}$ indiqués dans le tableau 2:

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \alpha_{ij} \mathrm{e}^{-\lambda_{ij}t} \qquad \ldots (4)$$

On obtient alors:

$$F_i(t_k,T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} \left(1 - \mathrm{e}^{-\lambda_{ij}T_k}\right)\mathrm{e}^{-\lambda_{ij}t_k} \qquad \ldots (5)$$

Par conséquent, la contribution $P_S(t,T)$ des produits de fission à la puissance résiduelle est donnée par la formule suivante:

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-
ccb0-9f7d4d/iso-10645-1992

$$P_S(t,T) = \sum_{i=1}^{4} \sum_{k=1}^{m} \left\{ \frac{P_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^{24} \left[ \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \right] \right\} \quad \ldots (6)$$

L'histogramme de puissance représenté à la figure 1 se compose de quatre intervalles de temps correspondant chacun à une puissance du nucléide fissile $i$.

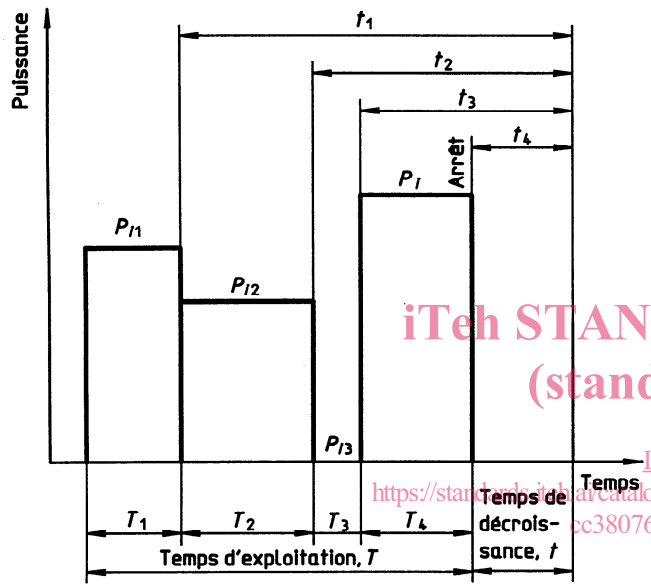


**Figure 1 — Histogramme de puissance**

Ainsi, pour les contributions $P_{Si}(t,T)$, les temps $t_k$ se calculent comme suit:

$$t_m = t$$

$$t_{m-1} = t + T_m$$

$$t_1 = t + \sum_{k=2}^{m} T_k \quad \ldots (7)$$

L'écart-type relatif, $\Delta P_{Si}/P_{Si}$, de la puissance résiduelle des produits de fission se calcule à partir de l'écart-type $\Delta F_i(t_k,T_k)$ et de l'écart-type relatif $\Delta Q_i/Q_i$.

Pour calculer la contribution du nucléide fissile $i$, on utilise la relation suivante:

$$\left(\frac{\Delta P_{Si}}{P_{Si}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right)^2 + \left[\frac{\sum_{k=1}^{m} \frac{P_{ik}}{Q_i} \Delta F_i(t_k,T_k)}{P_{Si}}\right]^2 \quad \ldots (8)$$

Les valeurs de $Q_i$ et $\Delta Q_i$ sont indiquées dans le tableau 1.

Pour un temps de décroissance $t_k \geqslant 1$, l'écart-type $\Delta F_i(t_k,T_k)$ se calcule comme suit:

$$\Delta F_i(t_k,T_k) = \int_0^{T_k} \Delta f_i(T_k - T' + t_k) \mathrm{d}T' \quad \ldots (9)$$

Pour calculer $\Delta f_i(t)$, on utilise une formule comparable à la formule (4) (les coefficients $\lambda_{ij}$, $\beta_{ij}$ sont indiqués dans le tableau 2):

$$\Delta f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \beta_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad \ldots (10)$$

et donc

$$\Delta F_i(t_k,T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\beta_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \quad \ldots (11)$$

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/eb737c49-c0f5-45df-a24e-cc38076926ac/iso-10645-1992

Pour des temps de décroissance $t_k < 1$ s, l'écart-type $\Delta F_i(t_k,T_k)$ est donné par la formule suivante:

$$\Delta F_i(t_k,T_k) = \frac{F_i(t_k,T_k)}{F_i(t_k = 1\ \mathrm{s}, T_k)} \Delta F_i(t_k = 1\ \mathrm{s}, T_k) \quad \ldots (12)$$

L'écart-type, $\Delta P_S$, de la puissance résiduelle de tous les produits de fission se calcule à partir de la formule suivante:

$$|\Delta P_S| = \sum_{i=1}^{4} |\Delta P_{Si}| \quad \ldots (13)$$

## 4.4 Contribution des actinides

### 4.4.1 Contribution de $^{239}$U et de $^{239}$Np

La puissance résiduelle, $P_B(t,T)$, émise par $^{239}$U et $^{239}$Np se calcule comme suit:

$$P_B(t,T) = \sum_{k=1}^{m} \frac{P_k}{Q} [F_U(t_k,T_k) + F_{Np}(t_k,T_k)] \quad \ldots (14)$$

$P_k/Q$ est le taux de fission total pendant l'intervalle de temps $k$, et correspond dans la formule (14) à

$$\frac{P_k}{Q} = \sum_{i=1}^{4} \frac{P_{ik}}{Q_i} \qquad \ldots (15)$$

Dans la sommation de la formule (14), seuls les 20 derniers jours de l'histogramme de puissance devront être pris en compte. Les termes $F_U(t_k,T_k)$ et $F_{Np}(t_k,T_k)$ dans la formule (14) sont calculés à partir des formules suivantes:

$$F_U(t_k,T_k) = E_U R\left(1 - e^{-\lambda_U T_k}\right)e^{-\lambda_U t_k} \qquad \ldots (16)$$

$$F_{Np}(t_k,T_k) = \\ = E_{Np} R\left[\frac{\lambda_U}{\lambda_U - \lambda_{Np}}\left(1 - e^{-\lambda_{Np} T_k}\right)e^{-\lambda_{Np} t_k} - \right. \\ \left. - \frac{\lambda_{Np}}{\lambda_U - \lambda_{Np}}\left(1 - e^{-\lambda_U T_k}\right)e^{-\lambda_U t_k}\right] \qquad \ldots (17)$$

où

$E_U$ (= 0,474 MeV) est l'énergie moyenne de décroissance de $^{239}U$;

$E_{Np}$ (= 0,419 MeV) est l'énergie moyenne de décroissance de $^{239}Np$;

$\lambda_U$ (= $4{,}91 \times 10^{-4}\ s^{-1}$) est la constante de décroissance de $^{239}U$;

$\lambda_{Np}$ (= $3{,}41 \times 10^{-6}\ s^{-1}$) est la constante de décroissance de $^{239}Np$;

$R$ est le rapport du taux de capture des neutrons dans $^{238}U$ au taux de fission total à la fin du temps d'exploitation.

Si l'utilisateur ne dispose pas de valeur pour $R$, il pourra utiliser l'approximation suivante:

$$R = 1{,}18 e^{-0{,}141 a_0} - 0{,}2 + 6{,}2 \times 10^{-3} \mathrm{BU} \qquad \ldots (18)$$

où

$a_0$ est l'enrichissement initial de $^{235}U$, en pourcentage en masse;

BU est le taux de combustion du combustible, en mégawatts jour par kilogramme d'uranium.

Développée pour un spectre de réacteur d'eau ordinaire (LWR) typique, cette formule s'applique à des enrichissements initiaux compris entre 1,9 % et 4,1 %. Les valeurs obtenues à l'aide de cette formule sont relativement élevées.

#### 4.4.2 Contribution des autres actinides

La contribution $P_A(t,T)$ des autres actinides (à l'exception de $^{239}U$ et $^{239}Np$) résultant de la capture des neutrons devra être établie par l'utilisateur.

La formule

$$P_A(t,T) = A(t) P_S(t,T) \qquad \ldots (19)$$

donne des valeurs relativement élevées si l'on utilise les facteurs $A(t)$ indiqués dans le tableau 3, dans la mesure où les conditions aux limites suivantes sont remplies:

— enrichissement initial, en pourcentage en masse, $1{,}9\ \% \leqslant a_0 \leqslant 4{,}1\ \%$;

— taux de combustion, en mégawatts jour par kilogramme d'uranium, $\mathrm{BU} \leqslant 12{,}5 a_0$;

— densité de puissance, en kilowatts par kilogramme d'uranium, $S \geqslant 5 a_0$.

### 4.5 Contribution résultant de la capture des neutrons dans les produits de fission

#### 4.5.1 Contribution de $^{134}Cs$

La contribution de $^{134}Cs$, obtenu par la réaction $^{133}Cs + n$, peut, dans certains cas, être très importante, notamment lorsque les temps de décroissance avoisinent $10^8$ s. C'est pour cette raison qu'une étude particulière lui est consacrée.

La formule suivante s'applique:

$$P_{Cs}(t,T) = \frac{P}{Q} F_{Cs}(t,T) \qquad \ldots (20)$$

où

$$\frac{P}{Q} = \sum_{i=1}^{4} \frac{P_i}{Q_i} \qquad \ldots (21)$$

et donc

$$F_{Cs}(t,T) = \lambda_4 E_{Cs} y \left[\frac{1 - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \Phi)T}}{\lambda_4 + \sigma_4 \Phi} + \right. \\ \left. + \frac{e^{-\sigma_3 \Phi T} - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \Phi)T}}{\sigma_3 \Phi - (\lambda_4 + \sigma_4 \Phi)}\right] e^{-\lambda_4 t} \qquad \ldots (22)$$

où

$y$ (= 0,068 3) est le rendement moyen par fission de $^{133}Cs$;

$E_{Cs}$ (= 1,717 MeV) est l'énergie moyenne de décroissance de $^{134}Cs$;

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b237c40a-c8ff-454f-a208-cc38076926ac/iso-10645-1992

$\lambda_4$ $(= 1{,}071 \times 10^{-8}\ s^{-1})$ est la constante de décroissance de $^{134}Cs$;

$\Phi$ est le flux neutronique total, en $cm^{-2} \cdot s^{-1}$;

$\sigma_3$ $(= 10{,}7 \times 10^{-24}\ cm^2)$ est la section efficace de $^{133}Cs$ moyennée sur le spectre $(n, \gamma)$;

$\sigma_4$ $(= 16{,}8 \times 10^{-24}\ cm^2)$ est la section efficace de $^{134}Cs$ moyennée sur le spectre $(n, \gamma)$.

$\sigma_3$ et $\sigma_4$ ont été déterminés pour un spectre de réacteur à eau légère pressurisée (PWR) typique. Appliqués à un réacteur à eau légère bouillante (BWR), ils produisent des valeurs relativement élevées.

Pour élaborer l'histogramme de puissance, il faudra utiliser un temps d'irradiation effectif $T_{eff}$, un flux neutronique effectif $\Phi_{eff}$ et un taux moyen de fission $P/Q$ dans les formules (20) et (22).

Ces différents paramètres seront calculés comme suit:

$$T_{eff} = \sum_{k=1}^{m} T_k \text{ (pour tous les } k \text{ avec } \Phi_k \neq 0) \quad \ldots (23)$$

$$\Phi_{eff} = \frac{1}{T_{eff}} \sum_{k=1}^{m} \Phi_k T_k \quad \ldots (24)$$

$$\frac{P}{Q} = \frac{1}{T_{eff}} \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{4} \frac{P_{ik}}{Q_i} T_k \quad \ldots (25)$$

Si l'on ne connaît pas la valeur du flux neutronique, on pourra utiliser l'approximation suivante:

$$\Phi_k = \frac{S_k}{a_{eff}} \times 2{,}58 \times 10^{13}\ (cm^{-2} \cdot s^{-1}) \quad \ldots (26)$$

où

$S_k$ est la densité de puissance dans le combustible, en kilowatts par kilogramme d'uranium;

$a_{eff}$ est l'enrichissement effectif de la matière fissile, calculé à partir de l'enrichissement initial $a_0$, en pourcentage en masse:

$$a_{eff} = \frac{a_0}{2} + 1{,}0 \quad \ldots (27)$$

Pour des enrichissements et des taux de combustion caractéristiques de réacteurs à eau légère (LWR), $\Phi_k$ utilisé dans la formule (26) fournit des valeurs de $P_{Cs}(t,T)$ pouvant excéder de 5 % les valeurs exactes. Pour des temps d'irradiation plus brefs ($\leqslant$ 25 MWj/kg), la valeur approchée obtenue pour $P_{Cs}(t,T)$ est surévaluée de 15 %.

#### 4.5.2 Contribution des autres réactions de capture

La contribution $P_E(t,T)$ à la puissance résiduelle par capture des neutrons dans les produits de fission (autres que $^{133}Cs$) doit être établie par l'utilisateur.

La formule

$$P_E(t,T) = H(t) P_S(t,T) \quad \ldots (28)$$

donne des résultats relativement élevés, lorsque l'on utilise les facteurs $H(t)$ indiqués dans le tableau 4, si les conditions aux limites suivantes sont remplies:

— enrichissement initial, en pourcentage en masse, $1{,}9\ \% \leqslant a_0 \leqslant 4{,}1\ \%$;

— taux de combustion, en mégawatts jour par kilogramme d'uranium, BU $\leqslant 12{,}5 a_0$;

— densité de puissance, en kilowatts par kilogramme d'uranium, $S \geqslant 5 a_0$.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d737c49-c05-4546-a24c-cc38676926ac/iso-10645-1992

### 4.6 Puissance résiduelle totale

La puissance résiduelle totale se calcule comme suit:

$$P_N(t,T) = P_S(t,T) + P_B(t,T) + P_A(t,T) + P_{Cs}(t,T) + P_E(t,T) \quad \ldots (29)$$

La marge d'erreur associée $\Delta P_N$ doit être déterminée à partir de l'écart-type $\Delta P_S$ de la formule (13) et de l'incertitude de la puissance thermique $(\Delta P/P)$ pendant l'exploitation:

$$\Delta P_N(t,T) = n \sqrt{[\Delta P_S(t,T)]^2 + \left[P_N(t,T) \times \frac{\Delta P}{P}\right]^2} \quad \ldots (30)$$

où $n$ est le multiple de l'écart-type associé au degré de confiance retenu.

Les autres contributions $P_B$, $P_A$, $P_{Cs}$ et $P_E$ devront être déterminées avec prudence et elles n'entreront pas dans le calcul de la marge d'incertitude. Les méthodes d'approximation exposées dans la présente Norme internationale pour évaluer ces contributions donnent des résultats surestimés. Si l'utilisateur ne dispose pas de valeurs lui permettant de sous-estimer la puissance résiduelle totale obtenue, il pourra prendre $P_N(t,T) = P_S(t,T)$.

**Tableau 1 — Énergie thermique effective totale, $Q_i$, libérée à la suite d'une seule fission nucléaire du nucléide fissile $i$, et écarts-types correspondants, $\Delta Q_i$**

Valeurs en MeV/fission

| $i$ | Nucléide fissile | $Q_{\mathrm{eff},i}$ 1) | $Q_{\mathrm{c},i}$ 2) | $Q_i = Q_{\mathrm{eff},i} + Q_{\mathrm{c},i}$ | $\Delta Q_i$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $^{235}U$ | 193,5 | 8,7 | 202,2 | ± 0,5 |
| 2 | $^{238}U$ | 194,6 | 10,9 | 205,5 | ± 1,0 |
| 3 | $^{239}Pu$ | 199,7 | 11,5 | 211,2 | ± 0,7 |
| 4 | $^{241}Pu$ | 201,8 | 11,9 | 213,7 | ± 0,7 |

1) $Q_{\mathrm{eff},i}$ est l'énergie thermique effective libérée à la suite d'une seule fission nucléaire.

2) $Q_{\mathrm{c},i}$ est l'énergie thermique effective libérée, due à la capture des neutrons n'ayant pas de fission nucléaire pour conséquence. On est parti d'une énergie moyenne caractéristique des réacteurs à eau légère (LWR) de 6,1 MeV par capture. Cette valeur peut, le cas échéant, être modifiée par l'utilisateur en fonction du réacteur.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 10645:1992
https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cb737c49-c0f5-45df-a24c-cc38076926ac/iso-10645-1992