

"GUIDE de CRITICITE, PART I,II" (IN FRENCH) CEA-R3114, COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, SACLAY (1967).

GUIDE DE CRITICITÉ

- I - Introduction à la criticité
- II - Règles pratiques

Rapport CEA - R 3114

1967

Ga

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

**DÉPARTEMENT DE L'USINE DE SÉPARATION
DES ISOTOPES DE L'URANIUM**

SERVICE D'ÉTUDES DE CRITICITÉ

GUIDE DE CRITICITÉ

- I. — INTRODUCTION A LA CRITICITÉ**
- II. — RÈGLES PRATIQUES**

Rédigé par un Groupe d'Ingénieurs

FÉVRIER 1967

Ce document est destiné aux ingénieurs chargés des études ou de l'exploitation des installations mettant en œuvre des matières fissiles. Bien que relativement volumineux il reste incomplet et devra faire l'objet de mises à jour périodiques. Il s'inspire des documents similaires publiés aux U.S.A. et en Angleterre ; cependant on trouvera des différences et des compléments dans la présentation des résultats. Son but est de fournir les éléments permettant de trouver rapidement une solution à des problèmes qui en ont généralement plusieurs ; afin de ménager la modestie des auteurs et de dégager leur responsabilité, les utilisateurs voudront bien le considérer essentiellement (comme le titre les y invite à dessein) comme un guide et non comme un oracle qui ne les dispense en aucun cas de s'entourer de l'avis des spécialistes et des organismes compétents et responsables.

Ce guide est l'œuvre commune de plusieurs ingénieurs et techniciens travaillant sous l'égide de la Sous-Commission des Masses critiques, toutefois le plus gros effort de synthèse revient au comité de rédaction constitué de MM. LECLERC, MOUGNIOT et PENET.

D. BRETON,
CEN-Saclay, mai 1964.

TABLE DES MATIÈRES PREMIÈRE PARTIE

	Pages		Pages
CHAPITRE I. NOTIONS DE NEUTRONIQUE.....	9		
I. La fission - Milieux multiplicateurs.....	9		
II. Notion de K infini.....	9	CHAPITRE III. METHODE GENERALE DE CONTROLE DE LA CRITICITE	27
III. Phénomènes physiques influençant le K infini	10	I. Notions de contrôle de K effectif.....	27
IV. Paramètres agissant sur le K infini.....	11	II. Sécurité de l'unité isolée.....	30
V. Formule des quatre facteurs	14	III. Sécurité d'un ensemble.....	33
VI. Milieux finis - Notion de K effectif.....	15		
VII. Paramètres agissant sur le K effectif.....	15	CHAPITRE IV. NATURE ET CONSÉQUENCES D'UN ACCIDENT DE CRITICITE	35
VIII. Particularités des milieux rapides.....	18	I. Position du problème.....	35
CHAPITRE II. MILIEUX MULTIPLICATEURS EN INTER- ACTION	21	II. Grandeurs caractérisant un accident de criticité	35
I. Introduction - Notion de K effectif global.....	21	III. Paramètres influençant les caractéristiques d'une excursion	35
II. Paramètres de position relative : angles solides moyens et fractionnels.....	21	IV. Risques associés à un accident de criticité....	36
III. Méthode de l'angle solide limite.....	22	V. Prévention des conséquences.....	38
IV. Influence de la réflexion sur l'interaction.....	24		
V. Interaction avec les milieux de K infini inférieur à 1	24		
VI. Conclusions	25		

TABLE DES MATIÈRES DEUXIÈME PARTIE

	Pages		Pages
CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉTUDE NUCLÉAIRE D'UNE INSTALLATION ..	39	CHAPITRE III. RÉGLES GÉNÉRALES DE SÉCURITÉ	46
I. Règles d'isolement	39	I. Méthode générale	46
II. Choix des normes : influence des zones de densité	39	II. Restrictions de la méthode de l'angle solide ..	47
III. Choix des normes : influence de l'hétérogé- néité	40	III. Élargissement de la méthode de l'angle solide	48
IV. Principe de la double éventualité. Coefficient de sécurité	41	IV. Règles particulières d'application	50
V. Référence des courbes de normes	42	CHAPITRE IV. APPLICATION A LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS	52
CHAPITRE II. RÉGLES SIMPLES DE SÉCURITÉ	43	I. Définition des paramètres de contrôle	52
I. Sécurité totale d'unités effectivement isolées	43	II. Définition des zones	53
II. Sécurité d'un ensemble d'unités contrôlées cha- cune par un seul paramètre	44	III. Définition des densités	53
III. Sécurité limitée d'une unité effectivement isolée	45	IV. Définition des unités	53
		V. Définition de l'implantation	54
		APPENDICE : Mise en place des alarmes de criticité	56

TABLE DES MATIÈRES DES ANNEXES

ANNEXE I. CALCUL DES ANGLES SOLIDES GÉOMÉTRIQUES	57	ANNEXE III. RÉDUCTION DES FORMES GÉOMÉTRIQUES - ÉCRANS MODÉRATEURS ET INTERACTION	68
I. Formules	57	I. Formes équivalentes d'une unité	68
II. Règle à calcul	59	II. Sécurité des unités proches	69
III. Tables	60	III. Écrans modérateurs et interaction	71
IV. Abaques	61	ANNEXE IV. CORRECTIONS DE DENSITÉ	72
V. Simplification des calculs pour un ensemble d'unités	62	I. Exposé général du problème	73
VI. Programmes de calcul	63	II. Détermination de la concentration C_0 limitant les domaines de corrections	75
ANNEXE II. CALCUL DES PROBABILITÉS DE FUITE ET DES K EFFECTIFS	65	III. Utilisation des normes dans les domaines de corrections	75
I. Unités de forme simple	65	IV. Utilisation des normes dans le cas où le solvant est de l'eau	76
II. Unités de forme complexe	67		
III. K effectif global d'une zone	67		

I - Introduction à la Criticité

CHAPITRE I

NOTIONS DE NEUTRONIQUE

I. LA FISSION - MILIEUX MULTIPLICATEURS

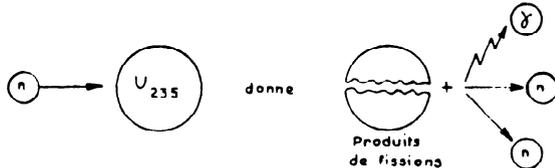
La fission est l'éclatement d'un noyau lourd (^{235}U , ^{239}Pu , etc.) en plusieurs fragments. Ce phénomène s'accompagne d'un dégagement de chaleur important.

Les fragments comprennent :

1° Ce qu'il est convenu d'appeler les **produits de fission** : ce sont des noyaux divers, radioactifs β et γ , en général au nombre de deux par fission ;

2° Un certain nombre de neutrons de haute énergie : 2,5 en moyenne pour le ^{235}U , 2,9 pour le ^{239}Pu .

De plus, un rayonnement γ , dit instantané, accompagne le phénomène de la fission.



I.1. Fission induite et fission spontanée

La fission d'un noyau est presque toujours induite par l'interaction d'un neutron incident avec ce noyau.

Mais ces noyaux peuvent parfois subir la fission sans cause extérieure : c'est ce qu'on appelle la **fission spontanée**.

I.2. Fission et multiplication

Le fait que la fission émette plus de neutrons qu'elle n'en absorbe (2,5 ou 2,9 pour 1) rend possible l'existence d'une réaction en chaîne dans un milieu contenant des matériaux fissiles. Un tel milieu sera dit **multiplicateur**.

Remarquons que seules les fissions induites jouent un rôle essentiel dans la réaction en chaîne, tandis que les fissions spontanées ne font qu'initialiser les chaînes. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

II. NOTION DE K_{∞} (K INFINI) D'UN MILIEU MULTIPLICATEUR

Considérons le milieu fictif suivant : un milieu multiplicateur infini. Dans la pratique, ce pourra être un récipient de grandes dimensions contenant par exemple une solution de plutonium ou d'uranium ; nous préciserons par la suite ce qu'on peut entendre par grandes dimensions.

Considérons à un instant donné n_1 neutrons "naissants", c'est-à-dire issus à cet instant même de fissions ; la question se pose de savoir combien de neutrons nouveaux, soit n_2 , naîtront de fissions ultérieures provoquées par ces n_1 neutrons. Le **coefficient de multiplication** k_{∞} est précisé-

ment par définition le rapport $\frac{n_2}{n_1}$.

Si chaque neutron "naissant" était sûr de provoquer ultérieurement une nouvelle fission, ce rapport serait tout simplement égal au nombre moyen de neutrons produits dans une fission, appelé ν (2,5 pour l'uranium 235, par exemple). En réalité, d'autres phénomènes physiques vont le solliciter durant sa "vie" et il se peut qu'il soit absorbé par certains noyaux du milieu avant d'avoir pu provoquer une fission ; en conséquence, le coefficient de multiplication est toujours nettement inférieur à ν .

Bien entendu, les n_2 neutrons naissants produiront à leur tour n_3 neutrons naissants et ainsi de suite, et l'on peut écrire :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = \frac{n_4}{n_3} = \dots = k_{\infty}$$

Si $k_{\infty} > 1$, la réaction en chaîne va se développer jusqu'à ce qu'un phénomène physique vienne l'arrêter : le milieu est **sur-critique**.

Si $k_{\infty} = 1$, la réaction en chaîne se maintient d'elle-même : le milieu est **critique**.

Si $k_{\infty} < 1$, la réaction en chaîne ne peut se développer, le milieu est **sous-critique**.

De deux milieux différents, celui qui a le plus grand coefficient de multiplication est appelé le **plus réactif**.

Effet d'une source constante de neutrons

La présence d'une source constante de neutrons, par exemple les fissions spontanées, aura un double effet :

- amorcer la réaction en chaîne ;
- superposer un apport constant de neutrons par seconde à la loi de variation, exponentielle en temps (croissante ou décroissante) due à la réaction en chaîne.

Si le milieu est sur-critique, la loi de variation exponentielle l'emporte et masque rapidement tout effet dû à la source.

Si le milieu est critique, les fissions induites produisent autant de neutrons qu'elles n'en absorbent, et il subsiste seule une loi de croissance linéaire en temps, due à l'apport constant de la source.

Si, enfin, le milieu est sous-critique, il s'établit un équilibre entre la source qui produit des neutrons et la réaction en chaîne qui en absorbe plus qu'elle n'en produit ; le résultat de cet équilibre est le maintien d'une population constante de neutrons.

Mais il faut bien remarquer qu'en aucun cas une source n'agit directement sur la loi exponentielle, donc sur le coefficient de multiplication, qui est une **propriété intrinsèque du milieu infini considéré**.

III. PHÉNOMÈNES PHYSIQUES INFLUENÇANT LE k_{∞}

Les deux types d'interactions qui sollicitent le neutron à partir de sa "naissance" sont la diffusion et l'absorption ; par diffusion, on entend toute interaction qui "réémet" le neutron incident, accompagné ou non d'autres particules ; l'absorption comprend alors les autres interactions, soit celles où aucun neutron n'est réémis, soit celles conduisant à une fission. On voit que la fission est en compétition avec d'autres phénomènes.

Après avoir examiné plus en détail ces deux interactions, nous verrons quels sont les paramètres agissant sur le k_{∞} .

III.1. Diffusion

Un neutron dans un milieu possède toujours au moins l'énergie cinétique d'agitation thermique ; on l'appelle dans ce cas "neutron thermique" ; mais nous avons vu qu'un neutron produit dans une fission possédait une grande énergie cinétique, de beaucoup supérieure à l'énergie thermique.

Un type d'interaction possible entre ce neutron et les noyaux du milieu est la diffusion, élastique (grossièrement analogue au choc de deux boules de billard), ou inélastique.

La diffusion est dite élastique si l'énergie cinétique totale est conservée, auquel cas le neutron perd une partie de son énergie au profit du noyau-cible : on conçoit que la fraction d'énergie perdue sera d'autant plus grande que la masse du noyau-cible est voisine de celle du neutron, et en particulier elle sera maxima pour l'hydrogène ; si par contre, la cible est un noyau lourd comme l'uranium ou le plutonium, le neutron conservera pratiquement la même énergie avant et après collision.

La diffusion peut être aussi inélastique ; dans ce cas, l'énergie cinétique totale n'est pas conservée et d'autres particules peuvent être émises conjointement avec le neutron ; ce dernier perd toujours une partie de son énergie, très variable suivant les cas.

III.1.1. Libre parcours moyen d'un neutron

C'est la succession des différents chocs, élastiques et inélastiques, qui aura tendance à répandre (ou diffuser) les neutrons dans le volume offert : ceci nous permet de préciser ce qu'on peut entendre par grande dimension, c'est-à-dire une dimension grande par rapport à la distance moyenne parcourue par le neutron entre deux chocs successifs (libre parcours moyen).

Nous verrons plus loin (§ IV.4) que ce libre parcours moyen nous permettra également de préciser la notion d'hétérogénéité.

III.1.2. Ralentissement des neutrons Groupe rapide et groupe thermique

C'est aussi la succession des diffusions qui va provoquer plus ou moins rapidement la diminution de l'énergie du neutron initial, c'est-à-dire sa "modération", jusqu'à ce qu'il atteigne l'énergie thermique. Bien entendu, plus les noyaux modérateurs rencontrés seront légers, moins grand sera le nombre de chocs nécessaires pour atteindre l'énergie thermique.

Il est tout à fait usuel en neutronique de distinguer deux groupes dans la population des neutrons ; les neutrons

thermiques qui, comme nous l'avons vu, sont ceux qui possèdent l'énergie thermique, et les neutrons rapides qui sont par définition tous les autres, c'est-à-dire aussi bien ceux d'énergie élevée que ceux d'énergies intermédiaires, qui sont en cours de ralentissement.

Les noyaux modérateurs habituels sont l'hydrogène, le deutérium, le carbone ; nous rencontrerons en criticité tout particulièrement l'hydrogène, c'est-à-dire l'eau et tous les composés hydrogénés (solvants organiques, huiles, paraffine, polyéthylène, etc.), et nous utiliserons le rapport de modération

$\frac{H}{^{238}\text{U}}$ ou $\frac{H}{^{239}\text{Pu}}$, rapport du nombre de noyaux d'hydro-

gène au nombre de noyaux fissiles dans la même unité de volume.

On utilise aussi le rapport $\frac{H}{\text{U}_r}$ ou $\frac{H}{\text{Pu}_r}$: rapport du

nombre de noyaux d'hydrogène au nombre de tous les noyaux isotopes d'uranium ou de plutonium présents dans la même unité de volume.

En conclusion, la diffusion intervient pour l'expansion et le ralentissement des neutrons ; nous verrons plus loin qu'elle joue un rôle important dans le bilan neutronique de la réaction en chaîne.

III.2. Absorption

Le deuxième type d'interaction qui guette le neutron naissant est l'absorption par les noyaux rencontrés.

Si le noyau cible est fissile, cette absorption peut donner lieu à une fission, ce qui joue positivement dans le bilan de la réaction en chaîne. Cette probabilité de fission dépend de l'énergie du neutron incident ; en pratique, ce sont de loin les neutrons thermiques qui réagissent le mieux avec les noyaux fissiles habituels (^{235}U , ^{239}Pu) ; toutefois, certaines fissions pouvant avoir lieu avec des neutrons rapides, soit avec ces mêmes noyaux, soit avec d'autres comme l'uranium 238 par exemple, ces "fissions rapides" seront également à prendre en considération dans la réaction en chaîne.

Mais l'absorption peut ne donner lieu qu'à une émission α , β ou γ , même si le noyau est fissile, et dans ce cas le neutron est perdu pour la réaction en chaîne. Par la suite, c'est ce phénomène qui sera plus particulièrement appelé capture, par opposition à la fission. Là encore, la probabilité de capture dépend de l'énergie du neutron : certains noyaux ont une nette préférence pour les neutrons thermiques tandis que d'autres sont susceptibles de capturer de façon particulièrement intense des neutrons rapides d'énergies bien déterminées (énergies de résonance pour le ^{238}U par exemple, ou le ^{240}Pu).

Quels sont d'autre part les absorbants rencontrés généralement ? Ce sont tout d'abord les noyaux fissiles eux-mêmes qui peuvent capturer des neutrons sans subir la fission : dans ce cas, la capture défavorise le bilan neutronique en abaissant le nombre moyen de neutrons produits par un noyau fissile, par neutron absorbé. Ce nombre, appelé η , est relié à ν de la façon suivante :

$$\eta = \nu \cdot \frac{\text{fission}}{\text{fission} + \text{capture}} = \nu \cdot \frac{\text{fission}}{\text{absorption}}$$

Ce peut être des noyaux isotopes des premiers, comme par exemple l'uranium 238 présent dans l'uranium naturel

ou enrichi, ou encore le plutonium 240 ; ce peut être d'autres noyaux tels que le chlore, l'azote et l'hydrogène en particulier. Ce peut être enfin certains noyaux très avides de neutrons thermiques (bore, cadmium), appelés "poisons".

Dans tous ces derniers cas de "capture", l'absorption défavorise encore le bilan neutronique en jouant le rôle de "pièges" dans la vie du neutron entre sa naissance par fission jusqu'à son absorption dans un noyau fissile.

III.3. Milieux rapides et milieux thermiques

On conçoit qu'un milieu possédant une proportion suffisante de noyaux ralentisseurs (hydrogène...) vis-à-vis des noyaux absorbants (noyaux fissiles, noyaux capturant aux énergies de résonance, modérateurs, poisons) aura une prédominance de fissions induites par les neutrons thermiques ; en effet, nous avons vu que la probabilité de capture est en moyenne plus faible pour un neutron rapide que pour un neutron thermique ; il en est de même pour la probabilité de fission avec les noyaux fissiles habituels (^{235}U , ^{239}Pu) ; un neutron naissant aura donc plus de chance d'être ralenti avant d'être absorbé. Un tel milieu est dit "milieu thermique".

Si par contre le milieu ne contient proportionnellement que très peu de noyaux ralentisseurs, le nombre de diffusions nécessaires pour ralentir le neutron jusqu'à l'énergie thermique sera très grand et le neutron naissant aura plus de chance d'être absorbé avant d'être ralenti : il y a prédominance des fissions induites par les neutrons rapides ; dans ce cas, on parlera de "milieu rapide".

En pratique, les solutions même concentrées sont des milieux thermiques (H/X supérieur à 20 environ, où X désigne les substances fissiles) ; les métaux purs, les alliages, les sels secs ou légèrement humides (H/X inférieure à 10 environ), sont des milieux rapides.

Les raisonnements qui vont suivre s'appliqueront implicitement à des milieux thermiques ; nous verrons en fin de chapitre (§ VIII) les particularités importantes des milieux rapides, dont les propriétés se distinguent sensiblement de celles d'un milieu thermique.

IV. PARAMÈTRES AGISSANT SUR LE K INFINI

IV.1. La modération

La présence de noyaux modérateurs dans une réaction en chaîne influence considérablement cette dernière en faisant appel à la fois à la diffusion et à l'absorption.

En ralentissant les neutrons de haute énergie issus des fissions, un modérateur joue dans un sens favorable à la réaction en chaîne, puisqu'il les rend beaucoup plus capables ainsi d'induire de nouvelles fissions lorsqu'ils seront arrivés à l'énergie thermique.

Mais un modérateur a aussi un certain pouvoir de capture, qui va jouer en sens contraire, en détruisant des neutrons.

La véritable efficacité d'un modérateur se mesure donc en quelque sorte au rapport $\frac{\text{ralentissement}}{\text{capture}}$ et, dans ce sens, l'eau lourde par exemple peut être meilleur modérateur que l'eau légère bien que l'hydrogène soit meilleur ralentisseur que le deutérium.

Un modérateur agit directement sur le spectre des neutrons en énergies : plus il sera efficace, plus il aura ten-

dance à "fabriquer" des neutrons thermiques et plus ces derniers seront nombreux vis-à-vis des neutrons rapides.

En criticité, sauf dans des cas très spécifiques, on considérera l'hydrogène comme étant le modérateur le plus efficace, donc le plus pessimiste, car il est, parmi les modérateurs usuels, le plus fréquemment rencontré.

IV.1.1. Influence du rapport de modération H/X

Nous avons vu qu'en première approximation, les phénomènes de capture pouvaient se résumer de la manière suivante : un neutron, au cours de sa vie, peut être capturé, soit lorsqu'il possède certaines énergies de résonance, c'est-à-dire lorsqu'il est encore dans le groupe rapide, et en général par des noyaux assez lourds (^{235}U , ^{239}Pu), soit lorsqu'il est arrivé dans le groupe thermique, en particulier par les atomes modérateurs.

La capture du premier type est désignée souvent par le mot "trappes" dans le groupe rapide, tandis que celle du second type intervient dans ce qu'on appelle l'utilisation thermique (nous verrons au paragraphe V une définition précise de ce terme).

Supposons à présent que dans un milieu multiplicateur, il y ait une forte proportion de noyaux modérateurs par rapport aux noyaux-trappes (H/X grand) ; les neutrons en cours de ralentissement auront beaucoup plus de chance de rencontrer des noyaux modérateurs que des noyaux trappes, donc échapperont facilement à ces trappes ; par contre, dans le groupe thermique, ces mêmes noyaux modérateurs qui deviennent absorbants vont disputer sévèrement les neutrons aux noyaux fissiles et défavoriser ainsi le bilan de la réaction en chaîne : l'utilisation thermique est mauvaise. Si maintenant il y a peu de modérateur (H/X petit), l'utilisation thermique sera bonne mais le ralentissement des neutrons sera plus difficile, car ils rencontreront relativement peu de noyaux ralentisseurs et auront ainsi plus de chance d'être capturés par les noyaux-trappes.

En conclusion, l'influence du rapport H/X sur le k_{∞} dépend de l'importance relative de la capture dans le groupe rapide et le groupe thermique.

IV.1.2. Remarque importante : concentration et rapport de modération

La concentration en élément fissile est un paramètre plus maniable en pratique que le rapport H/X : en fait, ils dépendent étroitement l'un de l'autre, pour un modérateur donné et pour un composé donné d'uranium ou de plutonium.

Avant toute étude de criticité, il sera nécessaire de connaître cette relation : ce point sera repris au chapitre III.

IV.2. L'empoisonnement

On utilise souvent en criticité des corps appelés poisons, tels que le cadmium et le bore, qui capturent considérablement les neutrons thermiques.

La présence des poisons abaisse le k_{∞} puisqu'ils constituent une capture supplémentaire.

IV.3. L'enrichissement

L'enrichissement se définit comme le rapport de la masse des noyaux fissiles sur la masse totale de tous les isotopes présents ; dans la pratique, ce rapport est très voisin du rapport des nombres de noyaux correspondants.

Par exemple, en négligeant les autres isotopes — plus rares — l'uranium enrichi à 90 % contiendra 90 atomes d'isotope 235 pour 10 atomes d'isotope 238.

A rapport $H/^{235}\text{U}$ constant, un enrichissement plus élevé, en diminuant le rapport $\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}$, diminue la proportion des

trappes de l'uranium 238, donc augmente le k_{∞} . Il est vrai que la présence d'uranium 238 permet un léger gain dû aux fissions qu'il peut subir sous l'action des neutrons de haute énergie ("fissions rapides"), mais cet effet est compensé le plus souvent par celui des trappes.

Le raisonnement est analogue pour le mélange ^{239}Pu , ^{241}Pu .

IV.4. L'hétérogénéité

IV.4.1. Définitions

Les définitions que nous allons poser pourront s'éloigner sensiblement des notions habituelles : il faut en effet noter que nous ne nous intéressons qu'aux causes influençant notablement la réactivité d'un système. Par exemple, un réseau de plaques d'uranium dans l'eau est un ensemble physiquement hétérogène ; cependant, si ces plaques sont suffisamment minces pour qu'un neutron puisse en traverser plusieurs épaisseurs sans subir de chocs, nous le considérerons comme homogène. Pour décider de la nature d'un milieu du point de vue neutronique, il convient donc de comparer la taille de ses constituants au libre parcours moyen des neutrons.

Par ailleurs remarquons qu'un effet d'hétérogénéité physique n'aura une répercussion sensible sur la réactivité d'un ensemble que si cette hétérogénéité caractérise aussi les propriétés multiplicatrices de ses constituants ; les concentrations en isotopes fissiles doivent être suffisamment différentes pour chaque type de composants.

IV.4.1.1. Milieux continus

Un milieu multiplicateur est dit continu si sa concentration en isotopes fissiles (CgX/cm^3) varie de façon continue lorsque l'on se déplace au sein du milieu (cas idéal). Cependant, si les discontinuités de cette concentration ont

une largeur inférieure au cinquième du libre parcours moyen ou une amplitude inférieure à $3,2 \text{ gX/cm}^3$, le milieu sera encore considéré comme continu (cas réel) en ce qui concerne sa réactivité.

1) Milieux homogènes continus (type C_1)

Un milieu continu est dit homogène si tout cube ayant pour côté le libre parcours moyen, prélevé dans le milieu, a, quelle que soit sa position, même composition atomique moyenne. Ex. : solutions de UO_2F_2 , mélanges homogènes de PuO_2 , paraffine.

2) Milieux hétérogènes continus (type C_2)

Tout milieu continu non homogène est dit hétérogène. Ex. : de tels milieux apparaissent couramment lors de la précipitation d'un sel ou par centrifugation d'une suspension d'oxydes insolubles.

IV.4.1.2. Milieux (hétérogènes) discontinus

Un milieu multiplicateur dont la concentration possède des discontinuités de largeur supérieure au cinquième du libre parcours moyen et d'amplitude supérieure à $3,2 \text{ gX/cm}^3$ est appelé milieu hétérogène discontinu.

Milieux discontinus réguliers

Un milieu discontinu est régulier lorsque ses discontinuités sont périodiques.

Classification physique des milieux discontinus :

De tels milieux sont constitués par une ou plusieurs phases de forte densité (solides) contenant des matériaux fissiles à une concentration supérieure à $3,2 \text{ gX/cm}^3$, dispersées au sein d'une phase modératrice de faible densité (souvent liquide). Cette dernière peut aussi être multiplicatrice mais sa concentration ne doit pas dépasser 3 gX/cm^3 .

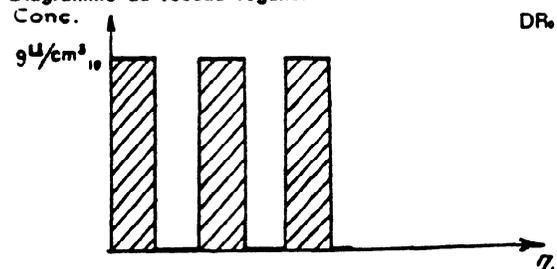
La classification des milieux discontinus se fait en liaison avec la nature de leur phase de faible densité.

IV.4.1.3. Classification des milieux multiplicateurs

Structure du milieu multiplicateur	Continue		Discontinue		
	homogène	hétérogène	Modératrice (H_2O)	Modératrice et multiplicatrice (Solution)	
Nature de la phase à faible densité			homogène	homogène	hétérogène
Structure de la phase à faible densité				continue	continue
Type	C_1	C_2	D_0	D_1	D_2
Exemple	Solution de concentration constante	Solution avec gradients de concentration	Métal dans l'eau	Métal dans solution de concentration constante	Métal en cours de dissolution

IV.4.1.4. Exemples de milieux discontinus

Type D_0 : Réseaux de barreaux d' UO_2 fritté dans l'eau. Diagramme du réseau régulier

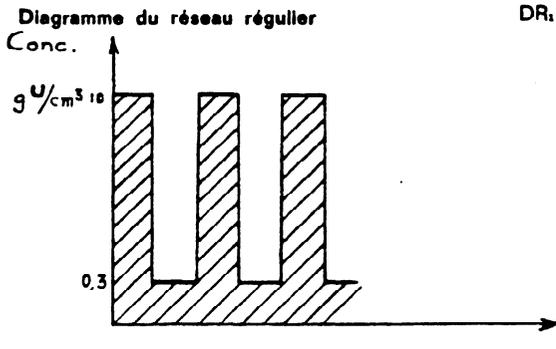


Terminologie

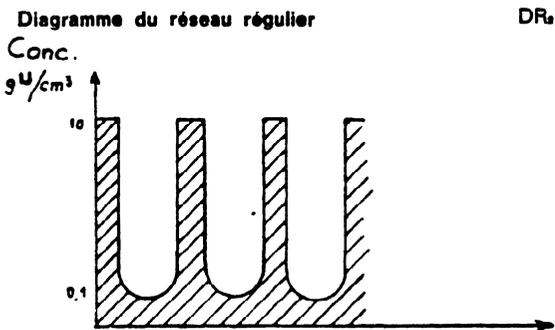
- C_1 = Milieu homogène continu
- C_2 = Milieu hétérogène continu
- D_0 = Milieu discontinu à phase modératrice homogène
- D_1 = Milieu discontinu à phase multiplicatrice homogène
- D_2 = Milieu discontinu à phase multiplicatrice hétérogène continue.

Les milieux multiplicateurs réguliers seront caractérisés par la lettre R (DR_0 , DR_1 , DR_2).

Type D₁: Réseau de barreaux UO₂ fritté dans une solution de (NO₂)₂UO₂ à 300 g/l.



Type D₂: Même réseau de barreaux en cours de dissolution dans NO₂H.



IV.4.1.5. Influence de l'énergie des neutrons sur l'hétérogénéité d'un système :

Les définitions précédentes sont liées au libre parcours des neutrons dans un système donné. Or ce libre parcours est fonction de la vitesse des neutrons : il est en effet plus grand pour les neutrons "rapides" que pour les neutrons "thermiques".

On conçoit donc qu'un système pourra (dans certains cas) être considéré comme discontinu pour les neutrons lents et continu pour les neutrons rapides.

Nous n'étudierons dans ce guide que les effets d'hétérogénéité s'appliquant aux milieux "thermiques".

IV.4.1.6. Conclusion

Le type d'un milieu multiplicateur ayant une influence notable sur sa réactivité, il convient, lors de l'étude d'un système, de dégager les différentes structures qu'il peut acquérir au cours de son évolution.

Remarque : Simplification de la terminologie

Par la suite et sauf mention contraire les termes "Milieux homogènes" et "Milieux hétérogènes" désigneront respectivement des milieux de type C₁ ou D₂.

Une partie importante de cet ouvrage est consacrée à l'étude des milieux de type C₁ et DR₂ ; la recherche de conditions optima pour les milieux de type C₂ est abordée au paragraphe VII.9.

Enfin certains problèmes plus complexes faisant intervenir plusieurs structures (comme celui de la dissolution : D₂, C₂) sont traités au tome IV.

IV.4.2. Influence de l'hétérogénéité sur le K_∞

Plusieurs milieux (homogènes ou hétérogènes du type DR₂) ayant même composition globale (donc même rapport de modération, même enrichissement, même empoisonnement), peuvent avoir un k_∞ très différent suivant qu'ils sont homogènes ou hétérogènes, et dans ce dernier cas suivant le pas de leur réseau.

Nous allons, pour fixer les idées, raisonner sur un exemple qui reflète assez bien la plupart des cas pratiques rencontrés : des barreaux d'uranium plus ou moins enrichi régulièrement espacés dans l'eau, et nous allons comparer le k_∞ de ce milieu à celui d'un milieu homogène de référence qui aurait même composition globale.

Nous verrons que, du point de vue de la réaction en chaîne, l'hétérogénéité a un effet favorable lié à l'absorption des neutrons rapides (trappes, fissions rapides), et un effet défavorable dû à l'absorption des neutrons thermiques.

IV.4.2.1. Capture des neutrons rapides

Remarquons tout d'abord que la diffusion élastique des neutrons dans les barreaux n'entraîne pas pour eux de perte d'énergie appréciable puisque les noyaux qu'ils y rencontrent sont tous des noyaux lourds.

Les neutrons de haute énergie naissent dans les barreaux et ne peuvent être par la suite ralentis que dans l'eau ; parmi ces neutrons d'énergies intermédiaires trouvés dans l'eau figurent ceux qui possèdent les énergies de résonance de capture de l'uranium 238. Si un neutron d'énergie intermédiaire pénètre dans un barreau, il aura toute chance d'être capturé dans les couches externes s'il possède exactement une énergie de résonance. Dans le cas contraire, il traversera le barreau sans changement d'énergie, donc sans être inquiété par les trappes.

Il y aura donc proportionnellement très peu de neutrons d'énergies de résonance dans les couches centrales des barreaux : en moyenne dans l'espace, la proportion des noyaux trappes rencontrés vis-à-vis des noyaux modérateurs sera donc pour ces neutrons plus faible que dans le cas du milieu homogène de référence : l'hétérogénéité a augmenté le k_∞.

Un autre effet favorable, plus faible que le précédent, est dû à ce que, si les intervalles entre barreaux ne sont pas trop petits, un neutron de haute énergie sorti d'un barreau aura quelques chances de ne pas rencontrer d'autre barreau avant d'avoir atteint les énergies inférieures au domaine des résonances, et d'échapper ainsi complètement aux noyaux-trappes.

IV.4.2.2. Fissions rapides

Les neutrons de haute énergie, naissant des fissions, sont produits dans les barreaux où ils seront donc proportionnellement plus nombreux que dans l'eau. Or, ce sont eux qui peuvent induire quelques fissions supplémentaires, sur les noyaux d'uranium 238 en particulier. En moyenne dans l'espace, il s'ensuit que la proportion des noyaux d'uranium 238 rencontrés vis-à-vis des noyaux modérateurs sera pour ces neutrons plus forte que dans le cas du milieu homogène de référence et que l'hétérogénéité a augmenté légèrement le k_∞.

IV.4.2.3. Absorption des neutrons thermiques

Les neutrons thermiques sont, comme ceux d'énergie intermédiaire, "produits" dans l'eau et, comme eux, ont plus de chance d'être absorbés dans les couches externes des barreaux que dans les couches internes. Il s'ensuit également un appauvrissement relatif en neutrons thermiques vers le centre des barreaux et, pour les neutrons thermiques, la proportion de noyaux d'uranium 235 rencontrés vis-à-vis des noyaux modérateurs sera plus faible que dans le cas du milieu homogène de référence ; mais cette fois, l'effet en est défavorable puisque l'utilisation thermique est moins bonne ; l'hétérogénéité a diminué le k_{∞} .

IV.4.2.4. Conclusion

En conclusion, l'hétérogénéité agit de manière complexe sur le k_{∞} , dépendant de l'importance relative des absorptions des neutrons rapides et thermiques.

Si l'enrichissement est voisin de 100 %, on conçoit que, la proportion des noyaux-trappes d'uranium 238 étant faible, l'effet des trappes est faible également, et c'est l'absorption des neutrons thermiques qui entraîne que le milieu hétérogène est moins réactif ; si, par contre, l'enrichissement est faible, l'effet des trappes devient important et le milieu hétérogène peut être plus réactif.

En pratique, pour des enrichissements inférieurs à 10 % environ, le milieu hétérogène peut être plus réactif (k_{∞} supérieur), donc moins sûr que le milieu homogène de référence ; pour des enrichissements supérieurs, c'est le milieu homogène qui est plus réactif, donc le moins sûr.

A titre d'exemple, l'uranium naturel ne peut donner de réaction en chaîne qu'en milieu hétérogène.

V. FORMULE DES QUATRE FACTEURS

Cette formule résume de façon synthétique l'influence des différents phénomènes, absorption et production par fission, capture, sur le k_{∞} .

Considérant toujours un milieu multiplicateur infini, avec un modérateur, le schéma suivant permet de suivre l'évolution de n_1 neutrons naissant des fissions, jusqu'à la production d'une nouvelle génération n_2 de neutrons naissants. Chaque rectangle désigne un groupe de neutrons qui procède du groupe de gauche immédiatement supérieur.

Explication des différents facteurs

— du groupe I au groupe II : p représente la probabilité pour les neutrons d'échapper aux trappes du groupe rapide ; c'est le facteur anti-trappe.

— du groupe II au groupe III : f représente la probabilité pour les neutrons thermiques d'être absorbés par un noyau fissile plutôt que par les autres noyaux ; c'est l'utilisation thermique.

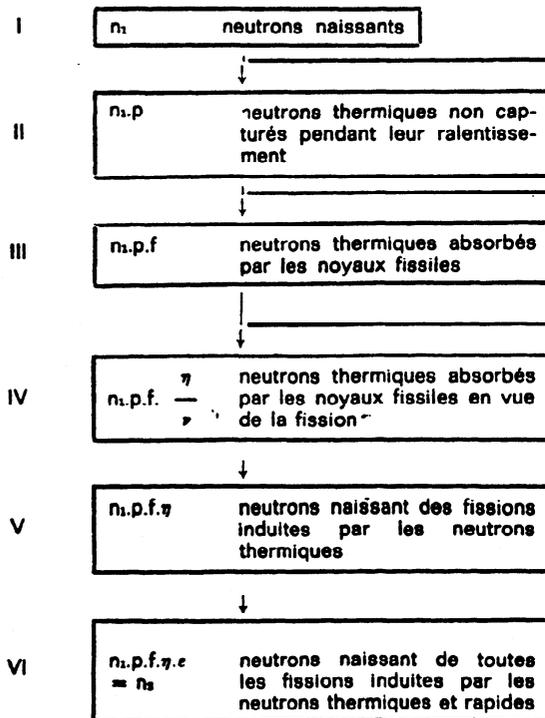
— du groupe III aux groupes IV et V : ν est le nombre moyen de neutrons produits dans une fission, tandis que η est le nombre moyen de neutrons produits pour un neutron

absorbé dans un noyau fissile ; $\frac{\eta}{\nu}$ représente ainsi la probabilité pour un neutron thermique absorbé dans un noyau fissile d'échapper à la capture, donc de produire une fission.

— du groupe V au groupe VI : ϵ est le facteur de fission rapide : les neutrons de haute énergie ayant une certaine probabilité d'induire eux aussi des fissions, ϵ est un facteur correctif légèrement supérieur à 1, qui tient compte globalement de cet effet.

η , ϵ , f et p sont les facteurs de base du k_{∞} ; les différents paramètres envisagés au paragraphe IV agissent chacun sur un ou plusieurs de ces facteurs.

NEUTRONS MAINTENANT LA CHAÎNE



NEUTRONS PERDUS POUR LA CHAÎNE

$$\frac{n_2}{n_1} = K_{\infty} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \quad (1.1)$$

VI. MILIEUX FINIS - NOTION DE K EFFECTIF (K_{eff})

Nous avons considéré jusqu'à présent des milieux multiplicateurs infinis. Dans la pratique, bien entendu, nous avons affaire à des milieux finis ; ceci introduit une nouvelle cause très importante de perte de neutrons dans le bilan de la réaction, qui est leur fuite possible en dehors des récipients.

En effet, si un milieu multiplicateur fini est entouré de vide (en pratique, l'air), tout neutron qui franchit la frontière est irrémédiablement perdu pour la réaction en chaîne (du moins, si le milieu ne présente pas de concavité) puisqu'il ne rencontrera pas de noyaux susceptibles de le diffuser vers le milieu d'origine. Si, au lieu du vide, il se trouve un milieu tel que l'eau, ou un métal, cette fois le neutron aura une certaine chance d'être diffusé dans le milieu origine, mais ce n'est qu'une probabilité, et non une certitude. Dans tous les cas, donc, les frontières introduisent des pertes de neutrons.

Considérons à un instant donné dans un récipient fini contenant un milieu multiplicateur, n_1 neutrons naissant à cet instant même de fissions, et reposons-nous la question de savoir combien de neutrons, soit n_2 , naîtront de fissions ultérieures provoquées par ces n_1 neutrons. Le coefficient de multiplication effectif est par définition le rapport :

$$K_{eff} = \frac{n_2}{n_1}$$

Derechef, si chaque neutron était sûr de provoquer ultérieurement une fission, ce coefficient serait égal à ν , le nombre moyen de neutrons produits dans une fission. Une première cause de perte de neutrons, la capture dans les différents noyaux, a été analysée plus haut et nous a montré que le coefficient était ramené, pour des milieux infinis, à la valeur $\frac{n_2}{n_1} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f$. Si maintenant, il se produit des pertes supplémentaires de neutrons aux frontières, on peut définir globalement pour le récipient et le milieu donnés une probabilité de ne pas fuir du récipient (ou tout au moins d'y revenir) dans le temps qui s'écoule entre sa naissance et son absorption ; cette probabilité est appelée probabilité anti-fuite P.

$$P = \frac{n_2}{n_1}$$

Le coefficient final de multiplication est alors :

$$K_{eff} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \cdot P \quad (1.2)$$

où η , ϵ , p , f , ont la signification du paragraphe V.

(On divise habituellement le facteur P en deux autres facteurs U_r et U_t , qui sont les probabilités anti-fuite se rapportant respectivement aux neutrons rapides et thermiques.)

La notion de K effectif est très importante en criticité et une grande partie de la suite de ce guide a pour objet d'exposer les moyens de calculer ce K_{eff} et d'en préciser l'emploi.

VI.1. K_{∞} et K effectif

Imaginons des récipients différents contenant tous un même milieu fissile, homogène par exemple, de composition bien définie.

Chacun de ces récipients possède un k effectif qui peut se mettre sous la forme :

$$K_{eff}(i) = \eta_i \cdot \epsilon_i \cdot p_i \cdot f_i \cdot P_i$$

où P_i est la probabilité anti-fuite relative au récipient i et η_i , ϵ_i , p_i , f_i , les quatre facteurs classiques définis au paragraphe V et s'appliquant au récipient considéré.

En pratique, ces quatre facteurs ne dépendent pas du récipient, et on peut écrire :

$$K_{eff}(i) = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \cdot P_i = K_{\infty} \cdot P_i$$

où K_{∞} n'est autre que le coefficient de multiplication du milieu considéré, supposé infini.

En résumé, le k effectif d'un milieu fini est égal au produit de deux facteurs : l'un de ces facteurs est une propriété intrinsèque du milieu et ne dépend que de sa composition, c'est le facteur de multiplication infini ; le second dépend à la fois de sa composition et des frontières qui lui sont imposées : c'est la probabilité anti-fuite P.

$$K_{eff} = k_{\infty} \cdot P \quad (1.3)$$

Bien entendu, si les frontières sont rejetées à l'infini, le facteur P est égal à 1 et le k effectif est égal au k_{∞} . Remarque. — en toute rigueur, le premier facteur de la formule (1.3) est légèrement modifié par les frontières du milieu, mais cet effet sera toujours négligé dans la pratique.

VI.2. Milieux critiques

On dit encore que :

Si $K_{eff} > 1$, le milieu est sur-critique.

Si $K_{eff} = 1$, le milieu est critique.

Si $K_{eff} < 1$, le milieu est sous-critique.

et les considérations du paragraphe II sur l'effet d'une source extérieure constante de neutrons s'appliquent intégralement.

On dit aussi que, de deux milieux différents, le plus réactif est celui qui a le plus grand K_{eff} .

VII. PARAMÈTRES AGISSANT SUR LE K EFFECTIF

Les différents facteurs qui influencent le K_{eff} sont :

1°) Ceux qui agissent sur K_{∞}

- la modération
- l'empoisonnement
- l'enrichissement
- l'hétérogénéité

2°) Ceux qui agissent sur P

et parmi ceux-ci :

a) ceux qui influencent la probabilité des neutrons d'atteindre les frontières

- les dimensions
- la forme
- la densité
- la température
- la présence de noyaux diffusants

b) Ceux qui influencent la probabilité des neutrons de retourner dans le milieu, une fois en être sortis

- la réflexion
- l'interaction

Si $K_{eff} = 1$, chacun de ces paramètres peut prendre l'épithète de critique.

La distinction opérée ci-dessus n'est pas rigoureuse ; nous verrons que certains paramètres agissent simultanément sur K_{∞} et sur P.

Nous examinerons tout d'abord en détail ceux du deuxième groupe.

VII.1. Les dimensions

Considérons un milieu de composition bien définie, une solution par exemple, dont le K_{∞} est supérieur à 1.

Supposons que l'on remplisse de cette solution des récipients de forme et de proportions définies et dont les dimensions vont en croissant (par homothétie) toutes autres conditions restant inchangées.

On peut définir pour cette solution le trajet moyen parcouru par les neutrons entre leur naissance et leur absorption : ce sera une distance dépendant de leur libre parcours moyen et du nombre moyen de diffusions subies dans ce même temps.

Si les dimensions du récipient sont de l'ordre de grandeur du trajet moyen des neutrons, pratiquement tous les neutrons produits dans le volume auront une certaine chance d'atteindre les frontières et de ne pas revenir, et leur probabilité de fuite, du même ordre de grandeur pour tous, pourra être non négligeable ; le coefficient P sera donc assez petit, le K_{eff} sera inférieur à 1 et le récipient sera sous-critique.

Si les dimensions du récipient deviennent sensiblement plus grandes que ce trajet moyen, on conçoit que seuls les neutrons produits dans une certaine couche externe auront une certaine probabilité individuelle d'atteindre les frontières et de ne pas retourner, probabilité qui pourra être d'ailleurs du même ordre de grandeur que dans le cas précédent. Mais tous les neutrons produits dans les couches internes du récipient n'auront pratiquement aucune chance d'atteindre les frontières et la probabilité anti-fuite P, qui est étendue à tous les neutrons, sera plus grande que dans le premier cas.

L'épaisseur de la couche externe ainsi définie dépend du trajet moyen, c'est-à-dire à la fois du libre parcours moyen et de l'absorption des neutrons.

Plus les dimensions augmentent, plus le volume des couches internes devient grand devant celui des couches externes et plus le facteur P augmente.

A la limite, si le récipient devient très grand, les couches externes représentent un volume négligeable devant le volume total et la quasi-totalité des neutrons n'a aucune chance d'atteindre les frontières : le facteur P est égal à 1 et $K_{eff} = K_{\infty} > 1$: le récipient est sur-critique.

Comme P a augmenté régulièrement avec les dimensions des récipients, il existe un récipient pour lequel le produit $K_{\infty} \cdot P$ est égal à 1 ; ses dimensions sont par définition les dimensions critiques, et son volume le volume critique.

Comme le milieu est de composition et de densité bien définies, à ce volume critique correspond une certaine masse totale et une certaine masse de chacun des constituants ; c'est une de ces masses qui est appelée masse critique ; en général, elle se rapporte à la masse de combustible, et même souvent au seul isotope-fissile.

La masse, le volume et les dimensions linéaires sont des grandeurs beaucoup plus accessibles que le K effectif, aussi, en criticité, est-il usuel de remplacer la notion de K effectif par une comparaison à la masse, au volume ou aux dimensions critiques : par exemple, on dira qu'un milieu fini sera sous-critique si sa masse est inférieure à la masse critique.

Retenons toutefois que ces grandeurs de comparaison (masse, volume, ou dimensions critiques) ne sont pas des propriétés intrinsèques d'un milieu de composition donnée, donc de K_{∞} donné.

VII.2. La forme géométrique

Nous avons vu au paragraphe VII.1 que la grandeur du facteur P dépendait de l'importance des couches externes du milieu multiplicateur (d'épaisseur liée au « trajet moyen ») par rapport au volume total, et nous faisons alors varier le volume total.

Comparons à présent deux récipients de même volume, mais de formes différentes : le même raisonnement nous conduit à dire que P sera le plus grand pour le récipient ayant la plus petite surface, autrement dit :

les fuites augmentent avec le rapport $\frac{\text{surface}}{\text{volume}}$

De là découle l'utilité en criticité des formes plates ou allongées, de préférence aux formes massives.

Remarque importante

Ce qui vient d'être dit de l'influence du rapport $\frac{\text{surface}}{\text{volume}}$

sur le K_{eff} suppose implicitement une répartition uniforme des neutrons dans tout le volume et en particulier à la surface ; la réalité étant quelque peu différente de cette hypothèse, il faut se garder de conclure hâtivement sur les différences de réactivité entre formes de même volume et de surfaces voisines.

Il reste que, à volume constant :

- la sphère est la forme la plus réactive de toutes ; elle est donc la forme pessimiste par excellence en criticité car c'est elle qui entraînera la plus petite masse critique, tous autres paramètres étant égaux par ailleurs ;
- l'orthocylindre (de diamètre égal à la hauteur) est le plus réactif de tous les cylindres* ; plus un cylindre est « plat », moins il est réactif ; de même, plus un cylindre est allongé, moins il est réactif ;
- le cube, moins réactif que l'orthocylindre, est le plus réactif de tous les parallélépipèdes.

VII.3. La densité

Plus un milieu de composition définie est dense, plus petit sera le libre parcours moyen des neutrons dans ce milieu, donc aussi leur « trajet moyen ».

Si donc, ce milieu est contenu dans un récipient de forme et de volume définis, on voit que, plus sa densité sera forte, plus faible sera l'importance des couches externes définies plus haut devant le volume total, et plus grande seront la probabilité anti-fuite P et le K_{eff} .

Autrement dit, pour un milieu de composition donnée, à volume constant, le K_{eff} augmente avec la densité ou, ce qui revient au même, le volume critique diminue si la densité augmente. En ce qui concerne la masse critique, produit de ces deux quantités variant en sens inverse, on peut montrer qu'elle diminue si la densité augmente.

Plus précisément, on peut énoncer la loi générale suivante :

La réactivité d'un système comprenant un ou plusieurs milieux définis (tous n'étant pas nécessairement multiplicateurs) est constante si on fait varier toutes les densités dans un certain rapport à condition de faire varier toutes les dimensions linéaires dans le rapport inverse.

Par exemple, pour un récipient nu, de composition et de formes définies, on montre que les dimensions linéaires

* En toute rigueur, le cylindre le plus réactif a un rapport $\frac{\text{diamètre}}{\text{hauteur}}$ très légèrement différent de 1.

du récipient critique sont inversement proportionnelles à la densité ; ainsi, le rayon critique d'une sphère nue varie en raison inverse de la densité du milieu contenu, et sa masse critique en raison inverse du carré de la densité.

VII.4. La température

La température d'un milieu considéré agit tout d'abord en modifiant son volume et sa densité, et cet effet se ramène à ceux étudiés précédemment.

Mais la température agit aussi en modifiant les propriétés intrinsèques de diffusion, et surtout d'absorption des noyaux.

L'influence globale de la température sur le K_{eff} résulte de ces divers effets et son signe dépend des cas particuliers ; mais en général le K_{eff} augmente si la température diminue.

VII.5. La présence de noyaux diffusants (non ralentisseurs)

Pour étudier l'influence séparée de ce paramètre, supposons que, dans un milieu de composition, forme et volume définis, on ajoute, sans changer la densité en atomes fissiles, des noyaux ni absorbants, ni ralentisseurs, autrement dit ne provoquant que des diffusions sans perte d'énergie (du zirconium, par exemple) ; ces noyaux vont augmenter le nombre des changements de direction subis par les neutrons et il en résulte pour la plupart de ces derniers une probabilité plus faible de fuir du milieu ; toutefois, pour les neutrons situés à proximité de la frontière, ces noyaux leur donneront une chance accrue de s'évader.

En conclusion, dans la plupart des cas, ces noyaux augmentent le K_{eff} , donc diminuent la masse critique ; toutefois, dans le cas de formes minces, de quelques centimètres d'épaisseur (plaques, disques), l'effet est inverse et ces noyaux diminuent le K_{eff} .

VII.6. La réflexion

Certains matériaux (eau, bois, etc.) ont la propriété, lorsqu'ils entourent un milieu fissile, de renvoyer une partie des neutrons dans le milieu. Ces matériaux sont des réflecteurs. Ils donnent au neutron une certaine probabilité, une fois la frontière atteinte, de retourner dans le milieu, et augmentent le facteur P. Leur présence va donc augmenter le K_{eff} ou, ce qui est équivalent, diminuer la masse (ou la taille) critique.

Il peut y avoir réflexion partielle sur un récipient, par exemple par un mur, ou une personne s'approchant du récipient.

Si le réflecteur possède aussi un pouvoir modérateur on peut noter qu'il agira quelque peu sur le K_{∞} .

L'effet de réflexion est très important en criticité et doit être pris soigneusement en considération chaque fois qu'il est susceptible de se produire.

VII.7. L'interaction avec les milieux multiplicateurs.

VII.7.1. L'auto-interaction

Si certaines parties de la surface d'un récipient présentent des concavités, un neutron arrivant à la surface, même s'il n'y a pas de réflecteur, peut avoir une certaine probabilité de retour dans le milieu, ce qui peut diminuer la masse critique.

Cet effet de concavité doit être pris en considération dans certaines formes particulières (cylindres annulaires...).

VII.7.2. L'interaction avec les milieux extérieurs. Notion d'isolement

Cette question d'isolement est fondamentale en criticité. Un récipient est dit isolé si aucun neutron provenant de

fissions extérieures à ce récipient ne peut pénétrer à sa surface. C'est le cas par exemple d'un récipient entouré d'une épaisseur suffisante d'eau ou de béton.

Si par contre des neutrons peuvent s'échanger entre divers milieux multiplicateurs, on dit qu'il y a interaction entre ces milieux. Si on considère un des récipients en particulier, il va bénéficier à ses frontières d'un apport de neutrons qui peut même dans certains cas dépasser la production de ses propres fissions internes.

La définition individuelle du K_{eff} donnée au paragraphe VI est toujours valable, mais la formule (1.2) ne s'applique plus. Le K_{eff} du récipient ainsi défini sera supérieur à celui du même récipient supposé isolé, qui est donné par la formule (1.2).

On pourrait considérer plusieurs milieux en interaction comme un tout et rattacher ce phénomène au précédent : en pratique, on préfère ajouter à la réactivité de chaque récipient isolé le gain dont il bénéficie à ses frontières. Ces phénomènes d'interaction sont développés au chapitre II.

VII.8. Influence sur P des paramètres agissant sur K_{∞} .

Tous les facteurs influençant le K_{∞} , influencent par contre-coup le K_{eff} d'un récipient. Mais ils peuvent également agir sur le K_{eff} par l'intermédiaire de la probabilité anti-fuite P.

Le libre parcours moyen des neutrons du groupe rapide est beaucoup plus grand que celui des neutrons thermiques ; il s'ensuit qu'en général le trajet moyen est plus grand pour un neutron rapide que pour un neutron thermique ; ce dernier a donc une probabilité anti-fuite individuelle plus grande qu'un neutron rapide. Tout paramètre agissant sur la distribution des neutrons en énergies, influencera donc la probabilité anti-fuite globale P.

C'est ainsi qu'en particulier une forte modération (H/X grand), en favorisant la population thermique, augmente la proportion des neutrons ayant le moins tendance à fuir, donc augmente la probabilité anti-fuite globale ; P augmente ainsi avec le rapport de modération H/X.

VII.9. Cas particuliers de l'hétérogénéité.

VII.9.1. Milieux hétérogènes discontinus

L'hétérogénéité discontinue de type D₀ agit sur le K_{eff} d'un système par l'intermédiaire de son K_{∞} . L'analyse de cet effet a été présentée au paragraphe IV.4.2.

VII.9.2. Milieux hétérogènes continus (type C₂)

L'importance de ces milieux réside dans le fait que les paramètres critiques d'un système sont assez sensibles à l'existence et à la direction de gradients de concentration au sein de la solution fissile.

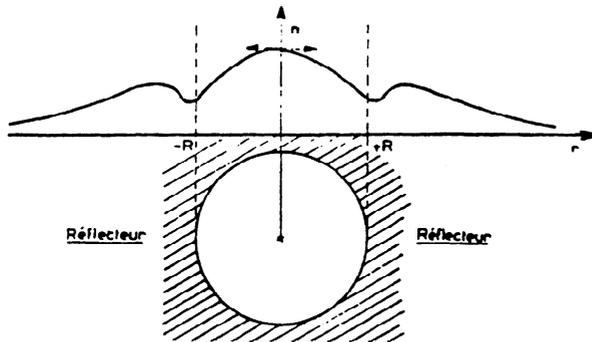
Influence sur la masse critique

Considérons une sphère contenant une solution homogène d'un corps fissile, fortement enrichi, à l'optimum de modération (en ce qui concerne la masse critique) entourée d'un réflecteur d'eau infini.

Dans une telle sphère, la population des neutrons thermiques varie, comme l'indique le schéma ci-après :

Ces neutrons étant moins nombreux à la périphérie qu'au centre de la sphère, on augmentera donc la réactivité du système en transférant le matériau fissile de la surface vers la région centrale. Ce raisonnement peut être aussi appliqué aux couches internes, mais la proportion de

neutrons thermiques allant en croissant lorsqu'on approche du centre, le transfert doit porter sur des masses de plus en plus faibles.



Il faut remarquer que cette opération modifie la distribution des neutrons thermiques au sein de la sphère ; en particulier, la proportion de ces neutrons diminue au centre de la sphère et augmente à sa surface, conformément aux variations du rapport de modération H/X.

Le maximum de réactivité sera obtenu lorsque l'on aura une population de neutrons thermiques uniformes à l'intérieur de la sphère, ce qui correspond à une utilisation optimum du matériau fissile.

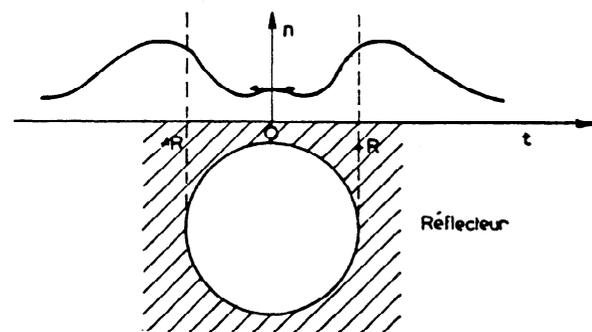
Nous voyons donc qu'une concentration décroissante à partir du centre augmente la réactivité du système (un gradient de concentration opposé contribuerait à diminuer la réactivité du rapport à un gradient nul).

On peut montrer que la diminution maximum de masse critique due à ces phénomènes est de l'ordre de 30 %.

Il convient donc d'en tenir compte dans l'établissement des facteurs de sécurité. Par exemple, dans le cas d'une dissolution d'uranium enrichi à 90 %, on ne prendra pas en considération des effets d'hétérogénéité proprement dite (enrichissement > 5 %), mais il faudra tenir compte de l'établissement possible d'un gradient de concentration, même si ce phénomène n'est que transitoire.

Influence sur la géométrie :

Dans le cas du volume, du diamètre ou de l'épaisseur critique, la modération optimum se rapproche de la limite



des systèmes rapides. La population des neutrons thermiques est alors plus importante aux frontières du milieu qu'en son centre, les neutrons étant en effet thermalisés en grand nombre par le réflecteur.

Un raisonnement analogue au précédent montre qu'on augmente la réactivité du système en concentrant la solution aux limites du récipient ; cet effet est toutefois moins important que dans le cas de la masse critique (5 %).

Remarque. — Dans le cas de milieux faiblement enrichis, l'optimum de modération pour la masse critique se déplace vers les H/U. faibles. Les effets d'hétérogénéité continue sont alors semblables pour la masse et pour la géométrie.

VIII. PARTICULARITÉS DES MILIEUX RAPIDES

Le comportement des milieux rapides est assez différent de celui des milieux thermiques que nous venons d'étudier. En effet les fissions sont alors produites en majorité par les neutrons du groupe rapide. Or l'influence des paramètres classiques sur ce groupe est différente de leurs actions sur le groupe thermique.

Dans le but de faciliter au lecteur l'interprétation de certaines courbes du tome III, dans le domaine des H/X faibles, nous allons faire une étude sommaire des caractéristiques originales des milieux rapides.

VIII.1. k_{∞} des milieux rapides et énergie moyenne des neutrons.

Si nous négligeons les fissions thermiques, le k_{∞} d'un tel milieu peut s'écrire :

$$k_{\infty} = \nu \cdot \frac{P_r}{P_r + P_c} = \nu \cdot \frac{1}{1 + \frac{P_c}{P_r}}$$

où :

- ν désigne le nombre moyen de neutrons émis par fission rapide.
- P_r la probabilité d'induire une fission pour les neutrons du groupe rapide.
- P_c la probabilité de capture des neutrons du groupe rapide.

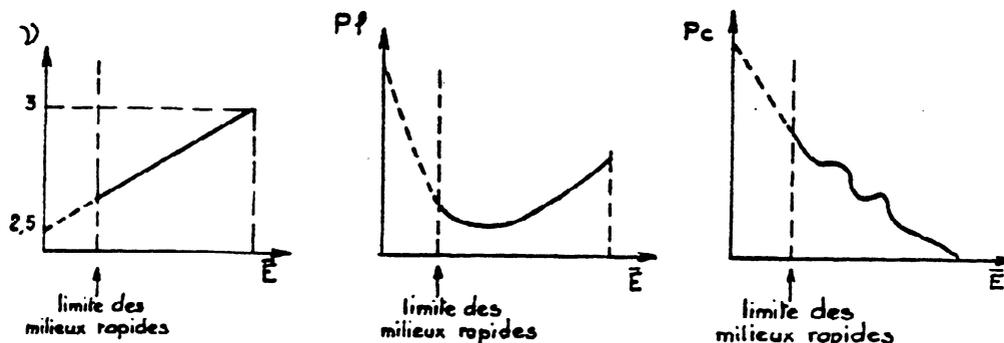
Dans un système rapide le k_{∞} dépend beaucoup de l'énergie moyenne (E) des neutrons du groupe rapide.

En effet :

- ν est une fonction croissante de E.
- P_c est une fonction globalement décroissante de E.
- P_r n'est pas une fonction monotone de E :

Lorsque E augmente à partir de valeurs voisines de l'énergie thermique, P_r commence par diminuer (neutrons thermiques plus efficaces cf. § III.2.) cependant si E augmente dans des proportions importantes, P_r passe par un minimum puis augmente à son tour sans toutefois atteindre des valeurs comparables aux valeurs thermiques.

Les schémas ci-dessous traduisent ces différents comportements :



Le k_{∞} d'un milieu rapide d'enrichissement maximum présente donc des variations du type de celles du schéma suivant :

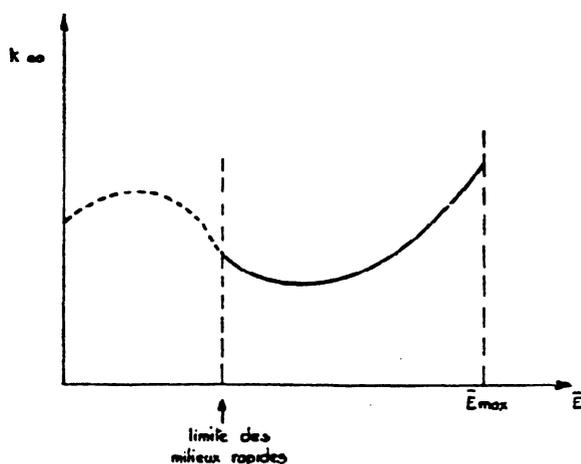


Fig. 1.1

VIII.2. Paramètres affectant le k_{∞}

— Modération

La présence d'hydrogène en petites quantités dans un milieu d'enrichissement maximum diminuant l'énergie moyenne des neutrons diminue aussi son k_{∞} . Bien entendu ceci ne reste vrai que tant que la quantité d'hydrogène mise en jeu demeure suffisamment faible pour que le système reste dans le domaine des milieux rapides. Dans le cas contraire on retrouve le comportement caractéristique des milieux thermiques (parties en pointillés de la figure 1.1). Le k_{∞} du milieu rapide peut être supérieur à celui du milieu thermique à l'optimum de modération (cf. fig. 1.2).

— Empoisonnement - Absorption

La capture des noyaux usuels diminuant lorsque l'énergie moyenne des neutrons augmente, il apparaît que les poisons classiques (Cd, B, N, etc.), perdent sinon la totalité tout au moins une grande partie de leur efficacité en ce qui concerne les systèmes rapides.

— Enrichissement

Les isotopes tels que le ^{238}U et ^{240}Pu sont fissiles à haute énergie, cet effet atténué dans une certaine mesure les pertes dues à l'absorption des neutrons par les trappes de

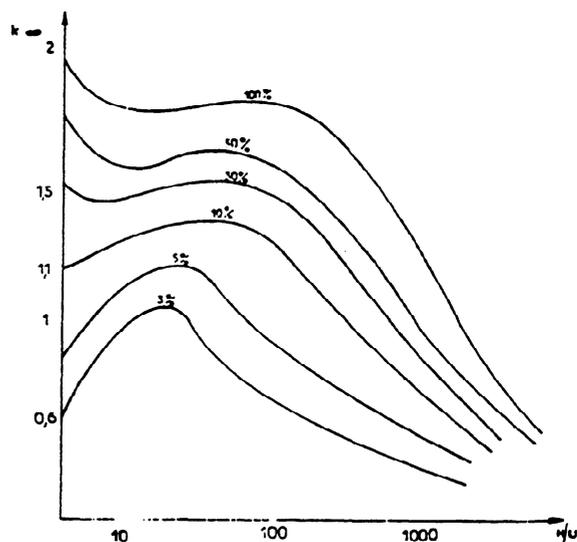


Fig. 1.2

ces matériaux. En particulier le ^{240}Pu peut être assimilé au ^{238}U lorsque sa proportion ne dépasse pas 10 %.

Cas particulier des fortes dilutions par le ^{238}U

Lorsque l'uranium 238 est présent en forte proportion dans un système non modéré ($\text{H/U} \approx 0$), son effet sur le k_{∞} devient très important ; son action est double :

- il ralentit par diffusion inélastique les neutrons de haute énergie ;
- il capture ensuite les neutrons ayant une énergie de résonance.

En les ralentissant, l'uranium 238 dirige donc les neutrons de haute énergie vers ses trappes.

Dans le cas de systèmes peu modérés d'U faiblement enrichi, toute introduction de modérateur augmente le k_{∞} du milieu en permettant à certains neutrons d'échapper aux trappes.

L'influence de l'enrichissement apparaît nettement sur la figure 1.2.

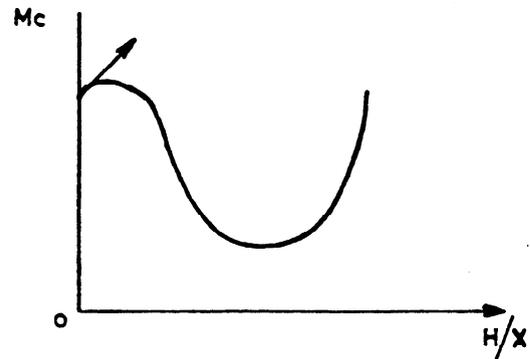
— Hétérogénéité

Certains types d'hétérogénéité peuvent avoir un effet important sur le k_{∞} des milieux rapides. Ces phénomènes sont trop complexes pour qu'il soit possible d'en développer ici la théorie. Nous aurons cependant l'occasion d'en tenir compte dans certains cas.

VIII.3. Paramètres influençant la réactivité du milieu fini

— Densité

La dilution d'un matériau fissile par un corps diffusant ou modérateur diminue sa densité. Cet effet est souvent prépondérant vis-à-vis de ceux dus à la modération ou la diffusion introduite. Ceci explique la pente positive au point $H/X = 0$ des courbes de masse critique en fonction du rapport de modération, dans le cas de matériaux fortement enrichis ; la masse critique augmente en effet lorsque la densité diminue. Si le rapport de modération augmente dans des proportions plus importantes, le système quitte le domaine rapide et la masse critique diminue conformément à l'étude faite précédemment au sujet des milieux thermiques.



— Fuites

La probabilité de fuite des neutrons rapides étant plus importante que celle des neutrons thermiques, les fuites jouent un rôle important dans le cas des milieux rapides ; aussi l'augmentation de la proportion des neutrons s'échappant du milieu lorsque le rapport de modération diminue masque-t-elle souvent l'augmentation simultanée de son k_{∞} .

CHAPITRE II

NOTIONS DE NEUTRONIQUE (Suite)

MILIEUX MULTIPLICATEURS EN INTERACTION

I. INTRODUCTION - NOTION DE K EFFECTIF GLOBAL

Imaginons une sphère isolée critique contenant un certain milieu multiplicateur homogène, son K_{eff} étant donc égal à 1.

Au lieu de considérer cette sphère comme un tout, divisons-la par la pensée en ses deux hémisphères. Chacune de ces moitiés aurait, évidemment, si elle était isolée de l'autre, un K_{eff} inférieur à 1 ; toutefois, il est évident que la réunion de ces deux hémisphères, isolément sous-critiques, a donné lieu à un assemblage critique.

On peut définir un K effectif global pour l'assemblage considéré comme étant le coefficient de multiplication moyen des neutrons d'une génération à l'autre ; de même, un assemblage sera dit critique si son K_{eff} global est égal à 1, et sous-critique s'il est inférieur à 1.

Mécanisme de l'interaction

Chaque hémisphère touche par sa face plane l'autre moitié ; si cet hémisphère était isolé, les neutrons fuyant par cette face plane seraient perdus pour les fissions de cet hémisphère, et nous avons vu que dans ce cas, il serait sous-critique. Mais en réalité, au lieu d'être perdus, ces neutrons vont pénétrer dans le milieu adjacent et auront une certaine probabilité d'être réfléchis dans le milieu initial, et une autre de produire dans le milieu adjacent de nouvelles fissions, autrement dit d'y être multipliés ; au cours de ces multiplications successives, les neutrons produits auront encore une probabilité de retour dans le milieu initial, ce qui fait que le bilan de la réaction en chaîne se trouve ainsi rééquilibré et que cet hémisphère, à cause de la présence du milieu multiplicateur voisin, est devenu critique.

De même qu'un simple milieu réflecteur augmente le K_{eff} d'un récipient isolé, de même la proximité d'un milieu multiplicateur augmente la réactivité de ce récipient, et non plus par le seul effet de réflexion.

Si les deux hémisphères étaient quelque peu écartées, les neutrons fuyant par une face plane ne seraient plus certains d'atteindre l'autre moitié, et l'interaction serait plus faible que dans le premier cas : l'assemblage resterait sous-critique, d'autant plus, d'ailleurs, que l'écartement serait plus grand.

En conclusion, on voit que le phénomène d'interaction dépend :

- de facteurs intrinsèques à chaque récipient : multiplication interne, fuite du récipient ;
- de facteurs géométriques ne dépendant que de la position relative des différents récipients.

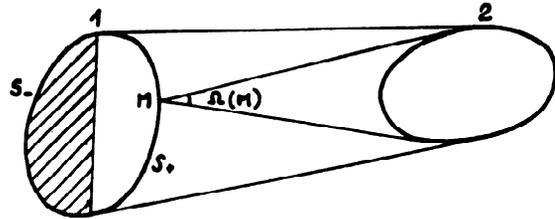
La suite de ce chapitre s'attache à définir des conditions suffisantes entre ces deux types de facteurs pour maintenir un assemblage sous-critique.

II. PARAMÈTRES DE POSITION RELATIVE : ANGLES SOLIDES MOYENS ET FRACTIONNELS.

La probabilité pour un neutron fuyant un milieu multiplicateur d'atteindre un récipient voisin est liée à l'angle solide sous lequel il voit le récipient. Nous allons préciser ces paramètres géométriques très utiles dans les calculs d'interaction. Nous supposerons que tous les récipients envisagés sont nus et plongés dans l'air.

II.1. Cas de deux récipients

Désignons par $\Omega(M)$ l'angle solide sous lequel un point M de la surface du récipient 1 voit le récipient 2.



$\Omega_r(M)$ est appelé angle solide fractionnel $\Omega_r(M) = \frac{\Omega(M)}{2\pi}$

$\Omega(M)$ et $\Omega_r(M)$ seront pris nuls si M est sur la portion S_- de la surface de 1 invisible pour 2.

Si on suppose que l'émission des neutrons à la surface des récipients est isotrope, $\Omega_r(M)$ représente la probabilité pour un neutron sortant en M d'atteindre le récipient 2 (l'expérience montre que cette hypothèse n'entraîne pas d'erreurs incompatibles avec les impératifs de sécurité).

• angles solides moyens

$$\bar{\Omega} = \frac{\int_S \Omega(M) dS}{\int_S dS} = \frac{\int_{S_+} \Omega(M) dS}{\int_S dS}$$

est l'angle solide moyen sous lequel le récipient 2 est vu de 1.

$$\bar{\Omega}_r = \frac{\int_{S_+} \Omega_r(M) dS}{\int_S dS} = \frac{\bar{\Omega}}{2\pi}$$

est appelé angle solide fractionnel moyen

Si on suppose de plus que les neutrons sont uniformément répartis à la surface de 1, l'angle solide fractionnel moyen $\bar{\Omega}_r$ représente la probabilité pour un neutron fuyant de 1 d'atteindre 2.

• angles solides maxima

Pour éviter de calculer les intégrales de moyenne ci-dessus, il est commode, comme on le verra par la suite, d'obtenir une borne supérieure de Ω de la manière suivante :

$$\bar{\Omega} = \frac{\int_{S_1} \Omega(M) dS}{\int_{S_1} dS} < \frac{\Omega_{MAX} \int_{S_1} dS}{\int_{S_1} dS} = \Omega_{MAX} \frac{S_1}{S}$$

où Ω_{MAX} angle solide maximum est la valeur maxima prise par $\Omega(M)$ lorsque M décrit la portion de surface S_1 .

De même on peut trouver une limite supérieure à l'angle fractionnel $\bar{\Omega}_r$:

$$\bar{\Omega}_r = \frac{\int_{S_1} \Omega_r(M) dS}{\int_{S_1} dS} < \boxed{\frac{\Omega_{r MAX} S_1}{2\pi S} = \Omega_{r MAX}}$$

$\Omega_{r MAX}$: angle solide fractionnel maximum représente ainsi une borne supérieure de la probabilité d'un neutron sortant de 1 d'atteindre 2.

Remarques :

1) Angle solide maximum et angle solide fractionnel maximum

Dans le cas de deux sphères, deux cylindres infinis parallèles, deux plaques infinies parallèles, de mêmes rayons ou même épaisseur, le facteur $\frac{S_1}{S}$ vaut rigoureusement 1/2 et :

$$\boxed{\Omega_{r MAX} = \frac{\Omega_{MAX}}{4\pi}}$$

Dans le cas général, l'application de cette formule entraîne une erreur faible si les distances entre récipients ne sont pas trop petites : nous verrons au § IV.1 que cette condition sera en principe requise et on pourra donc utiliser cette formule dans la majorité des cas.

2) Validité de l'hypothèse de la répartition uniforme des neutrons à la surface

Cette hypothèse émise au début de ce paragraphe n'est pas rigoureuse, car il est évident que, même si la répartition était uniforme pour chaque récipient isolé, elle serait perturbée par le fait même des échanges de neutrons ; si le nombre de neutrons est plus élevé sur les portions de surface qui se voient de plus près, la probabilité pour un neutron fuyant de 1 d'atteindre j sera supérieure à l'angle solide moyen.

En pratique, l'hypothèse peut être conservée si les distances entre récipients ne sont pas trop faibles, et ceci rejoint la conclusion de la remarque précédente.

II.2. Cas de plusieurs récipients

On isole en général un des récipients par rapport aux autres en définissant un angle solide total.

Si $\bar{\Omega}^{j \rightarrow i}$ est l'angle solide moyen sous lequel i est vu de j, on définit :

$\bar{\Omega}_{i1} = \sum_{j=1}^{j \neq i} \bar{\Omega}^{j \rightarrow i}$: angle solide total sous lequel i est vu des autres récipients

$\bar{\Omega}_{r i1} = \frac{\bar{\Omega}_{i1}}{2\pi}$ est l'angle solide fractionnel correspondant.

On peut utiliser aussi l'angle solide maximum total (fractionnel).

$\Omega_{i MAX 1} = \sum_{j=1}^{j \neq i} \Omega_{j MAX}$ Somme des angles solides maxima sous lesquels i est vu des autres récipients.

Nous verrons plus loin que les angles solides totaux sont utiles pour déterminer les conditions de criticité.

III. METHODE DE L'ANGLE SOLIDE LIMITE

Nous supposons encore dans ce paragraphe que tous les récipients sont nus et plongés dans l'air. L'effet des réflexions sera examiné au paragraphe suivant.

III.1. Paramètres d'interaction

ν_{ij} est par définition la probabilité pour un neutron de fuir du récipient i et d'atteindre j.

Si P_i est la probabilité anti-fuite du récipient i, on peut écrire, moyennant les hypothèses du paragraphe précédent :

$$\nu_{ij} = (1 - P_i) \bar{\Omega}^{i \rightarrow j}$$

(En réalité, l'interaction s'effectuant par les neutrons rapides, P se réduit ici à U_r , probabilité anti-fuite des neutrons rapides.)

Remarque. — Les probabilités anti-fuite considérées ici sont celles qui existent réellement en présence des récipients voisins ; elles peuvent être, si l'interaction est importante, quelque peu différentes de celles du récipient isolé. De toutes façons, en assimilant à 1 la

probabilité de fuite, on voit que $\bar{\Omega}^{i \rightarrow j}$ angle solide fractionnel moyen, est une borne supérieure du paramètre ν_{ij} .

III.2. Cas de deux récipients

Nous supposons, pour simplifier le raisonnement suivant, que les probabilités de fuite des récipients ne sont pas modifiées par le phénomène d'interaction.

Considérons, à un instant donné, dans les deux récipients, tous les neutrons naissant à cet instant même par fission, soit respectivement n_1 et n_2 dans les récipients 1 et 2.

Nous allons dénombrer tous les N neutrons secondaires qui vont naître à la génération suivante de ces ($n_1 + n_2$) neutrons.

Comptons d'abord les N_{11} neutrons produits dans 1 à partir des n_1 . Ce sont d'abord ceux qui se sont multipliés comme si le récipient 1 était isolé, soit $k_1 n_1$ (où k_1 est le k_{eff} isolé du récipient 1) : mais une autre part des n_1 neutrons a pu être réfléchi par le récipient 2 et revenir dans 1 (après d'ailleurs une ou plusieurs réflexions) pour y produire de nouvelles fissions ; pour tenir compte de ce gain, nous écrivons que $N_{11} = k^*_{11} n_1$, k^*_{11} étant le k effectif de 1 modifié par la présence de 2.

Les n_1 neutrons vont émigrer dans la proportion p_{21} dans le récipient 2 et là, seront multipliés avec un coefficient k_2^* défini de manière analogue à k_1 , pour tenir compte des réflexions sur 1 :

$$N_{12} = k_2^* \cdot p_{21} \cdot n_1$$

Un raisonnement analogue s'applique aux neutrons qui procèdent des n_2 et, si N_1 et N_2 sont les nombres globaux de neutrons produits dans 1 et 2, on a :

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{11} + N_{21} = k_1^* (n_1 + p_{21} n_2) \\ N_2 &= N_{12} + N_{22} = k_2^* (p_{12} n_1 + n_2) \end{aligned} \quad (2.1)$$

La part des n_1 neutrons qui subira une simple réflexion sur 2 est égale à $p_{12} \cdot p_{21} \cdot n_1$; après multiplication dans 1, elle donnera $k_1 \cdot p_{12} \cdot p_{21} \cdot n_1$ neutrons ; mais parmi ceux qui ne sont pas multipliés, une nouvelle part égale à $p_{12} \cdot p_{21} \cdot (p_{12} \cdot p_{21} \cdot n_1)$ subira une nouvelle réflexion sur le récipient 2, etc., de même, la part des n_2 neutrons qui subiront une réflexion d'ordre m sur 2 est égale à $(p_{12} \cdot p_{21})^m \cdot n_2$ et produira $(p_{12} \cdot p_{21})^m \cdot k_1 \cdot n_1$ neutrons.

On voit que :

$$k_1^* n_1 = k_1 n_1 [1 + p_{12} p_{21} + \dots + (p_{12} p_{21})^m + \dots]$$

$$k_1^* = \frac{k_1}{1 - p_{12} p_{21}}$$

Si on suppose que la population de l'ensemble des deux récipients varie suivant une loi exponentielle unique, ceci revient à dire que :

$$\frac{N_1}{n_1} = \frac{N_2}{n_2} = K$$

K étant le K effectif global.

Cette dernière égalité, jointe à (2.1) et (2.2) définit deux valeurs de K . En réalité, seule la racine la plus grande en valeur algébrique a une signification physique et c'est elle qui est le K effectif global défini plus haut.

Ainsi, le K effectif global est bien défini de manière unique en fonction de k_1 , k_2 et des paramètres d'interaction.

III.2.1. Cas des récipients identiques

Les deux récipients ont le même k effectif isolé, et on suppose, de plus, que leurs paramètres d'interaction sont égaux.

A ce moment $n_1 = n_2$ par symétrie et les deux valeurs de K sont confondues :

$$K = k^* (1 + \nu) = \frac{k}{1 - \nu} \quad k = k_1 = k_2 \quad \nu = p_{21}$$

Ainsi, la relation suivante existe entre k , coefficient de multiplication intrinsèque de chaque récipient, et ν paramètre d'interaction dépendant principalement de la position relative, pour maintenir l'assemblage critique.

$$\nu = 1 - k \quad (2.3)$$

En pratique, on utilise plutôt que ν une borne supérieure, en général Ω_r , et on définit $\Omega_i = 1 - k$ comme un angle solide fractionnel limite.

Alors, la relation (2.3) donne une condition suffisante pour maintenir l'assemblage sous-critique :

$$\Omega_r < \Omega_i \quad (2.4)$$

Cette condition est appelée critère de l'angle solide limite.

Ces critères se présentent toujours sous forme d'une inégalité dont le premier membre est fonction des positions relatives entre récipients, et le second est un angle solide limite, fonction des seuls coefficients de multiplication intrinsèque des récipients.

III.2.2. Cas de deux récipients différents

Dans ce cas, à chaque récipient, correspond un k effectif isolé et un angle solide limite correspondant.

On doit vérifier séparément les deux conditions :

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_i^{1 \rightarrow j} &< \Omega_{12} \\ \bar{\Omega}_j^{2 \rightarrow i} &< \Omega_{11} \end{aligned} \quad (2.5)$$

c'est-à-dire : l'angle solide sous lequel 2 est vu de 1 doit être inférieur à l'angle solide limite correspondant à 2, et vice-versa.

III.3. Cas général

On montre que les critères de l'angle solide peuvent se généraliser au cas de n récipients, avec un coefficient de sécurité supérieur au cas de 2 récipients.

A chaque récipient i correspond un k effectif isolé et un angle solide limite Ω_{ii} .

On doit vérifier pour chaque récipient la condition suivante :

$$\bar{\Omega}_{i,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}^{j \rightarrow i} < \Omega_{ii} \quad (2.6)$$

c'est-à-dire : l'angle solide total sous lequel chaque récipient est vu de tous les autres récipients doit être inférieur à l'angle solide limite correspondant à ce récipient déterminé.

III.4. Utilisation des angles solides maxima

Comme le calcul des angles solides moyens $\bar{\Omega}^{i \rightarrow j}$ est en général délicat, on remplace habituellement, et cette simplification va dans le sens de la sécurité, tout ou partie de ces $\bar{\Omega}^{i \rightarrow j}$ par les angles solides maxima correspondants

$$\Omega_{i \rightarrow j}^{MAX} = \frac{\Omega_{MAX}^{i \rightarrow j}}{4 \pi}$$

Tous les critères définis plus haut s'appliquent alors intégralement.

III.5. Utilisation du facteur $\frac{S_i}{S}$

Nous avons vu que le fait de remplacer systématiquement $\frac{S_i}{S}$ par $\frac{1}{2}$ n'entraînait pas d'erreurs importantes, ce qui s'explique par une certaine compensation entre erreurs de signes contraires.

Si, dans certains cas, le rapport $\frac{S_i}{S}$ est toujours inférieur à $\frac{1}{2}$, on pourra utiliser sa valeur réelle ou une majeure

pour élargir le critère de sécurité ; ce serait le cas par exemple d'un assemblage de cylindres verticaux de même hauteur et même niveau, où les échanges de neutrons ne s'effectuent que par les faces latérales.

Les $\bar{\Omega}^{i \rightarrow j}$ sont ainsi remplacés par $\frac{\Omega_{MAX}^{i \rightarrow j}}{2 \pi} \cdot \frac{S_i}{S}$.

III.6. Utilisation des probabilités de fuite

Nous avons toujours jusqu'ici assimilé à 1 les probabilités de fuite des neutrons de chaque récipient et majoré ainsi les paramètres d'interaction ν_i par les angles solides moyens $\bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j}$.

Or, bien souvent, l'angle solide moyen va être, pour des raisons de commodité de calcul, majoré à son tour par l'angle solide maximum $\Omega_{r \max}$. Cette hypothèse est encore plus pessimiste et on peut, dans certains cas simples, diminuer la sévérité du critère en conservant cet angle solide maximum et utilisant la probabilité de fuite $(1 - P_i)$.

Les $\bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j}$ sont alors remplacés par $(1 - P_i) \Omega_r^{i \rightarrow j}$.

IV. INFLUENCE DE LA RÉFLEXION SUR L'INTERACTION

Nous avons vu qu'en criticité il était nécessaire de tenir compte des réflexions habituelles (murs) ou accidentelles (opérateurs, inondations) susceptibles d'intervenir dans les installations.

IV.1. Réflexion totale

C'est celle qui serait obtenue dans l'hypothèse pessimiste d'une inondation qui noierait totalement l'ensemble des récipients.

L'expérience montre que 30 cm d'eau isolent complètement deux milieux multiplicateurs. On impose donc une distance minima de 30 cm entre tous les récipients, ce qui dispense d'effectuer un calcul de sûreté comprenant une interaction dans l'eau, toujours assez difficile.

Dans ce cas, il suffit donc de vérifier que chaque unité est sûre, prise isolément avec un réflecteur total d'eau.

Remarque. — Si, exceptionnellement, il est impératif de maintenir une distance inférieure à 30 cm entre certains récipients, on applique, pour le calcul de sûreté de leurs interactions, une méthode particulière exposée en annexe du tome II.

IV.2. Réflexion partielle

Il existe deux types de réflexion partielle, d'influences différentes sur les interactions :

- une réflexion partielle individuelle qui augmente le K_{eff} isolé de chaque unité ;
- une réflexion partielle collective augmentant les probabilités d'échange de neutrons entre unités.

IV.2.1. Réflexion partielle individuelle

On supposera, de manière pessimiste, que dans l'interaction de chaque couple d'unités, chaque unité est susceptible d'être semi-réfléchi du côté opposé à celui de l'unité en regard.

Ces conditions sont partiellement remplies dans l'exemple d'un assemblage de récipients placés entre deux murs assez proches, ou dans le cas d'opérateurs s'approchant des récipients.

Pour tenir compte de cette éventualité, on augmente le K_{eff} "isolé" de chaque récipient en écrivant que

$$k_r = \frac{1}{2} (k_r + k_s)$$

sr : semi réfléchi r : réfléchi n : nu
En majorant par 1 le K réfléchi, on obtient finalement :

$$k' = \frac{1 + k}{2} \quad \text{où : } k = k_s \quad (2.7)$$

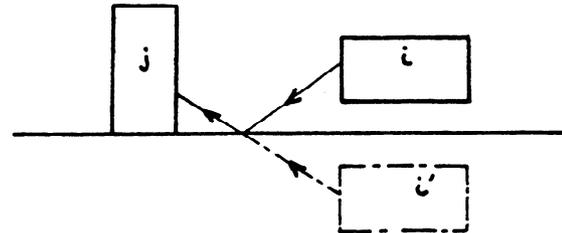
et k' doit remplacer k dans les relations telles que (2.3).
La loi pratique de variation de l'angle solide limite en fonction du K_{eff} isolé nu, tiendra compte de cet effet de « semi-réflexion ».

IV.2.2. Réflexion partielle collective

Imaginons par exemple un ensemble de récipients posés sur un sol de béton. Les propriétés de réflexion du béton vont augmenter les probabilités d'échange de neutrons entre récipients et les paramètres d'interaction ν_i vont être supérieures à $(1 - P_i) \bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j}$.

A défaut de méthode plus élaborée, on suggère de tenir compte de cet effet de la manière suivante :

Dans le seul calcul des angles solides, à chaque élément i on adjoint son image optique i' et on remplace $\bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j}$ par $\bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j} + \beta \cdot \bar{\Omega}_r^{i \rightarrow j'}$ où β est un certain coefficient de réflexion caractéristique du matériau réflecteur, qui peut être d'ailleurs majoré par 1.



Une autre méthode consisterait à considérer chaque récipient comme totalement réfléchi mais avec un réflecteur permettant toutefois les échanges de neutrons, autrement dit remplacer k par k_r dans les relations telles que (2.3).

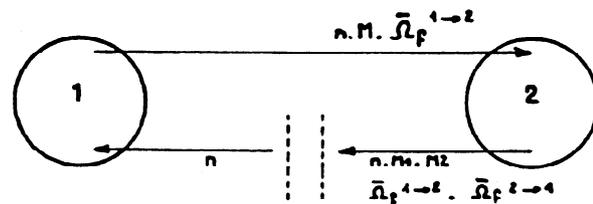
Si on veut s'affranchir de ces restrictions, il sera nécessaire d'imposer des distances suffisantes entre récipients et semi-réflecteurs collectifs tels que sol, murs, plafonds, etc.

V. INTERACTION AVEC LES MILIEUX DE K INFÉRIEUR A 1

V.1. Interaction et multiplication de surface

Pour montrer le rôle particulier qu'ont de tels milieux dans l'interaction, nous allons effectuer un raisonnement simplifié sur deux milieux en présentant les phénomènes d'interaction de manière légèrement différente.

Etant donnés deux milieux 1 et 2, isolément sous-critiques, leur ensemble ne pourra être critique que si le bilan des neutrons qui s'échangent entre eux n'est pas déficitaire.



Soit donc n neutrons s'échappant de 2 et se dirigeant vers 1. Après multiplication dans 1, ces neutrons provo-

queront la fuite de $n.M_1$ neutrons du milieu 1 (M_1 , appelé coefficient de multiplication de surface, est une fonction intrinsèque des propriétés multiplicatrices de 1). Ces neutrons n'atteindront à leur tour le milieu 2 que dans la proportion $\bar{\Omega}_r^{1 \rightarrow 2}$

De même, les $n.M_1 \cdot \bar{\Omega}_r^{1 \rightarrow 2}$ neutrons atteignant 2, provoqueront la fuite de $(n.M_1 \cdot \bar{\Omega}_r^{1 \rightarrow 2}) \cdot M_2$ neutrons du milieu 2 et ces derniers ne se dirigeront vers 1 que dans la proportion $\bar{\Omega}_r^{2 \rightarrow 1}$

Le bilan de la population neutronique se dirigeant de 2 vers 1 sera donc déficitaire si :

$$M_1 \cdot \bar{\Omega}_r^{1 \rightarrow 2} \cdot M_2 \cdot \bar{\Omega}_r^{2 \rightarrow 1} < 1 \quad (2.8)$$

et cette inégalité garantit que le système est sous-critique.

Pour montrer l'inégalité (2.8) il suffit de montrer que les deux inégalités suivantes sont vérifiées simultanément :

$$\bar{\Omega}_r^{2 \rightarrow 1} < \frac{1}{M_1} \quad (2.9)$$

$$\bar{\Omega}_r^{1 \rightarrow 2} < \frac{1}{M_2} \quad (2.10)$$

On reconnaît alors une forme analogue aux critères de l'angle solide limite tels que (2.5) : le premier membre est fonction des positions relatives entre unités, et le second n'est fonction que des propriétés multiplicatrices intrinsèques des unités. On doit d'autre part, vérifier une inégalité par unité.

On peut montrer que ces conditions sont en pratique voisines de celles exprimées à l'aide des K effectifs isolés.

V.2. Application aux unités de K infini inférieur à 1

On montre que, dans les cas pratiques rencontrés, si le K_{∞} du milieu 1 est inférieur à 1, son coefficient de multiplication de surface M_1 est également inférieur à 1 ; de tels milieux ne jouent alors qu'un rôle de réflecteur, mais d'un pouvoir de réflexion éventuellement meilleur que l'eau ou les réflecteurs habituels, c'est pourquoi, ils ne sont pas pris en compte par l'hypothèse de la semi réflexion.

Dans ce cas, l'inégalité (2.9) est automatiquement vérifiée, et il suffit de conserver la condition (2.10).

On en déduit la règle pratique suivante, applicable aux systèmes comprenant des unités de K_{∞} inférieur à 1 (1^{er} type) et des unités de K_{∞} supérieur à 1 (2^e type) :

— on ne vérifiera pas les critères relative aux unités du 1^{er} type ;

— on vérifiera, pour chaque unité du 2^e type, que la somme des angles solides sous lesquels elle est vue des autres unités (y compris celles du 1^{er} type) est inférieure à son angle solide limite correspondant.

VI. CONCLUSIONS

VI.1. Règles pratiques qualitatives

On peut tirer de tout ce qui précède les règles pratiques très simples suivantes :

1) Pour des récipients donnés, la sécurité de leur assemblage sera d'autant plus grande que leurs distances

mutuelles sont grandes. Ceci est évident puisque les angles solides varient en raison inverse du carré des distances, et que la réactivité de l'assemblage diminue avec ces angles solides $\bar{\Omega}^{1 \rightarrow 1}$

2) Plus le K effectif isolé d'un récipient est faible, plus grand est son angle solide limite correspondant.

3) Plus les distances mutuelles entre récipients seront faibles, plus sévères seront les limitations de leur K effectif isolé. En effet, diminuer les distances augmente les $\bar{\Omega}^{1 \rightarrow 1}$. Pour que les critères de sûreté restent vérifiés, il faut augmenter parallèlement les angles solides limite $\bar{\Omega}_i$, donc diminuer les K effectifs isolés.

VI.2. Résumé de la méthode de l'angle solide

VI.2.1. Rappel des notations

- ν : paramètre d'interaction, probabilité pour qu'un neutron fute d'un récipient et atteigne l'autre
- k_a : K_{eff} des unités nues
- k_r : K_{eff} des unités totalement réfléchies
- k_{sr} : K_{eff} des unités « semi-réfléchies »
- $\bar{\Omega}_i$: Angle solide limite pour une unité
- $\bar{\Omega}_r$: Angle solide fractionnel moyen entre unités

$$\bar{\Omega}_r = \frac{1}{2\pi} \frac{\int \Omega(P) ds}{\int ds}$$

- $\bar{\Omega}_{MAX}$: Angle solide maximum entre unités
- $\bar{\Omega}_{rt}^i$: Angle solide fractionnel moyen total vers une unité

$$\bar{\Omega}_{rt}^i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}_r^{j \rightarrow i}$$

- $\bar{\Omega}_{MAX}^i$: Angle solide maximum total vers une unité

$$\bar{\Omega}_{MAX}^i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}_{MAX}^{j \rightarrow i}$$

- 1 - P : Probabilité de fuite d'un neutron par n'importe quel point de la surface d'une unité.

VI.2.2. Deux unités identiques

Deux unités nues et identiques sont sûres si l'inégalité $\nu < 1 - k_a$ est vérifiée (§ III.2.1).

Pour tenir compte des semi réflexions possibles (§ IV.2.1), k_a doit être remplacé par k_{sr} , dans lequel k_r est majoré par 1. L'inégalité devient :

$$\nu < \frac{1 - k_a}{2} = \bar{\Omega}_i$$

Dans le produit $\nu = \bar{\Omega}_r (1 - P)$, on peut majorer 1 - P par 1 (§ III.2.1) et l'inégalité devient :

$$\bar{\Omega}_r < \bar{\Omega}_i$$

$\bar{\Omega}_r$ peut être majoré par $\frac{\bar{\Omega}_{MAX}}{2\pi} \cdot \frac{S_0}{S}$ (§ II.1) l'inégalité devient :

$$\frac{\bar{\Omega}_{MAX}}{2\pi} \cdot \frac{S_0}{S} < \bar{\Omega}_i$$

Dans la plupart des cas, $\frac{S_0}{S}$ peut être assimilé à $\frac{1}{2}$ et l'inégalité, sous sa forme la plus usuelle, s'écrit :

$$\frac{\Omega_{MAX}}{4\pi} < \Omega_1 = \frac{1 - k_a}{2}$$

VI.2.3. Cas général

Angle solide limite pour une unité :

$$\Omega_1 = \frac{1 - k_a}{2}$$

Probabilité totale de fuite des unités j vers l'unité i :

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} p_{j \rightarrow i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}_r^{j \rightarrow i} (1 - P_j)$$

L'ensemble des unités sera sûr si on a, quel que soit i :

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}_r^{j \rightarrow i} (1 - P_j) < \Omega_1 \quad (\text{forme théorique})$$

En majorant les probabilités de fuite $(1 - P_j)$ par 1, les inégalités deviennent :

$$\bar{\Omega}_r^{j \rightarrow i} < \Omega_1 \quad (\text{forme de l'angle solide moyen})$$

En majorant les angles solides moyens $\bar{\Omega}_r^{j \rightarrow i}$ par

$$\frac{\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}}{2\pi} \cdot \left(\frac{S_0}{S} \right)_{j \rightarrow i} \quad \text{les inégalités deviennent :}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \frac{\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}}{2\pi} \cdot \left(\frac{S_0}{S} \right)_{j \rightarrow i} < \Omega_1$$

(1^{re} forme de l'angle solide maximum)

En remplaçant les rapports $\frac{S_0}{S}$ par $\frac{1}{2}$, les inégalités deviennent finalement :

$$\frac{\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}}{4\pi} < \Omega_1 = \frac{1 - k_a}{2}$$

(2^e forme de l'angle solide maximum ou forme usuelle)

CHAPITRE III

MÉTHODE GÉNÉRALE DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ

Le principe fondamental du contrôle de la criticité d'une unité ou de plusieurs unités en interaction est basé sur le contrôle du K_{eff} de chacune de ces unités.

Par unité, on entend un appareil qui se ramènera à une forme géométrique simple (sphère, cylindre, parallélépipède) contenant un sel ou une solution de matériau fissile. Cela pourra être également une ou plusieurs masses métalliques, en cours d'usinage, de formes mal définies, mais dont le poids total est connu. Nous verrons dans l'annexe III du tome II une extension de cette notion d'unité.

A chacune de ces unités considérées isolément correspond un K_{eff} qui est en quelque sorte la mesure du niveau de sa sécurité. Nous avons vu également que deux unités mises en présence l'une de l'autre interagissent l'une sur l'autre et s'apportent mutuellement un accroissement de réactivité se traduisant par une augmentation de leur K_{eff} respectif, augmentation d'autant plus grande que leur distance est plus petite.

Pour une unité isolée, c'est-à-dire n'interagissant pas avec d'autres unités, il suffirait de maintenir son K_{eff} dans certaines conditions (réflexion par l'eau) inférieur à 1.

Pour une unité prise dans un ensemble d'autres unités, il faudra en plus, que son K_{eff} soit suffisamment inférieur à 1, pour que l'accroissement de celui-ci, dû à l'interaction des autres unités, ne le rende pas supérieur à 1.

I. NOTIONS DE CONTRÔLE DE K_{eff}

I.1. Contrôle unique - Contrôle multiple

Nous avons vu qu'une bonne mesure du niveau de sécurité de l'unité est la valeur de son K_{eff} . Nous savons également que cette valeur dépend d'un certain nombre de paramètres qui sont : l'enrichissement, la masse, la géométrie, le volume, la modération, la concentration, la densité, la réflexion, l'empoisonnement, l'hétérogénéité, la température.

Lorsqu'on fait varier un seul de ces paramètres entre des limites fixées et raisonnables, le K_{eff} admet une valeur maximum qui dépend d'ailleurs des valeurs des autres paramètres. Lorsqu'on fait varier tous les paramètres, chacun dans un domaine bien défini par des « limites initiales », le K_{eff} passe par un maximum maximum pour des valeurs bien déterminées de chaque paramètre.

Ces valeurs sont dites valeurs pessimistes. Si on écarte un ou plusieurs paramètres de leurs valeurs pessimistes, le K_{eff} ne pourra que décroître. Si on fixe un ou plusieurs paramètres à des valeurs arbitraires, il correspondra à chaque fois de nouvelles valeurs pessimistes des autres paramètres qui donneront une valeur maximum du K_{eff} pour la ou les valeurs arbitraires choisies. Il est important pour la suite de bien comprendre ces notions :

Si, partant de la valeur maximum maximum du K_{eff} , on fait varier un seul paramètre en maintenant toujours les autres à leurs valeurs pessimistes, le K_{eff} décroît, et on pourra fixer un domaine restreint de variation à ce paramètre, dit **paramètre de contrôle**, de façon à avoir $K_{eff} \leq K_1 < 1$. En d'autres termes, le paramètre de contrôle variant dans son domaine restreint, on pourra donner n'importe quelles valeurs, situées entre les limites fixées, aux autres paramètres ; on aura toujours $K_{eff} \leq K_1 < 1$.

La sécurité de l'unité reposera sur le **contrôle d'un seul paramètre**, on aura un **contrôle unique**, sous réserve bien entendu que les autres paramètres se maintiennent entre leurs limites initiales. On pourrait, de même, définir des domaines de variation restreints, pour deux ou plusieurs paramètres. La sécurité reposera sur le **contrôle de deux ou plusieurs paramètres**, on aura un **contrôle multiple** sous la même réserve que précédemment.

EXEMPLE : nous allons, pour fixer les idées, raisonner dans un espace à trois dimensions et supposer que le K_{eff} ne dépend que des deux seuls paramètres : masse et concentration.

1) limites initiales

Supposons que la masse ne puisse varier qu'entre M_0 et M_{max} : dans une usine de traitement de sel de plutonium par exemple, M_0 pourra être une masse minima impossible à éliminer (dépôts...) ou même être nulle, et M_{max} la masse totale en traitement.

Supposons d'autre part, que les traitements s'échelonnent sur des concentrations diverses, de manière qu'on ne puisse pas fixer a priori de limites initiales à la concentration, qui pourra alors varier de 0 à C_{max} , concentration du sel sec.

2) Maximum maximum du K effectif

Chacun des paramètres variant dans les domaines définis ci-dessus, le K_{eff} admet un maximum maximum K_{MAX} , atteint en un point A, pour les valeurs M et C de la masse et de la concentration ; ces valeurs sont dites **valeurs pessimistes** *. Si, seule la concentration s'écarte de sa valeur pessimiste, le K_{eff} ne pourra que décroître et variera suivant une courbe (L) dont le maximum est en A.

Si la masse est fixée à une autre valeur m, le K_{eff} variera suivant une nouvelle courbe (I), et il existe une nouvelle valeur pessimiste de la concentration c, pour laquelle le K_{eff} est maximum au point a.

Si maintenant on fait varier de manière continue la masse de M à M_0 en obligeant la concentration à prendre les valeurs pessimistes correspondantes, le k_{eff} variera suivant la portion de courbe (T), limitée aux points A et A_0 , lieu des maxima des courbes telles que (I) ; bien entendu, le maximum de la courbe (T) est situé au maximum maximum A.

* En ce qui concerne la masse, le maximum maximum du K_{eff} est toujours situé à la borne supérieure du domaine de variation donc ici : $M = M_{max}$.

Supposons qu'un plan P de $k_{err} = 1$ coupe cette surface selon une courbe (S), (S) est une courbe de masse critique en fonction de la concentration. Soit A_1 le point où elle coupe (T) et L_1 la courbe de type (I) passant par A_1 et correspondant à la valeur M_1 de la masse.

3) Contrôle unique

Le plan (P) sépare l'espace en deux régions : une région surcritique dans laquelle se trouve la partie A_1A de la courbe (T) et une région sous-critique dans laquelle se

l'augmenter en limitant la concentration à une valeur c .

La masse étant fixée à la valeur m , le k_{err} va varier cette fois sur une portion de courbe (I) comprise dans l'intervalle (Oc') et limitée par le point b. Cette portion de courbe possède un maximum a' qui dans le cas présent de figure se confond avec b. En ce point le k_{err} est maximum pour la valeur pessimiste c' de la concentration.

Si m varie de manière continue de M_0 à M et que la

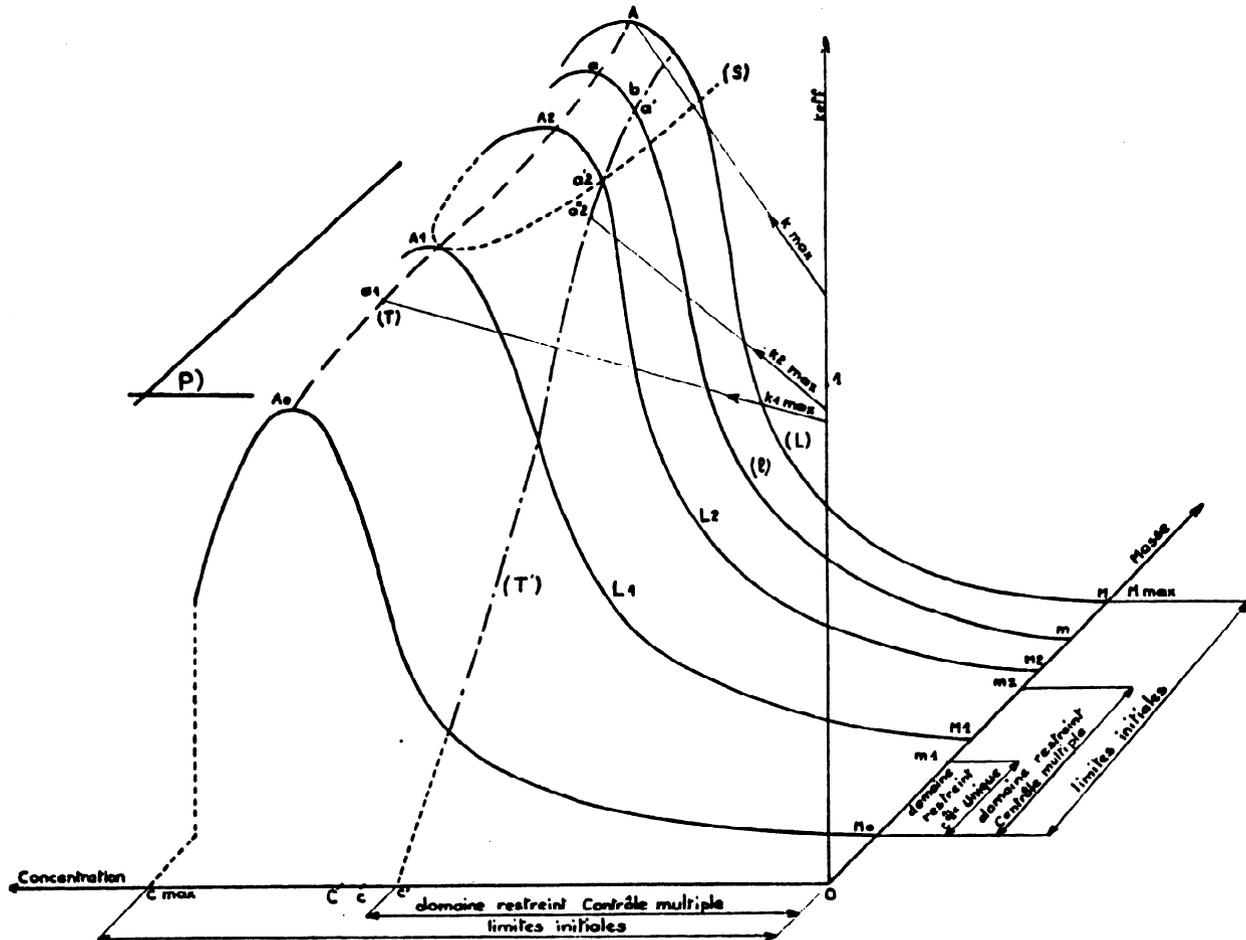


Fig. III.1

trouve la partie A_0A de (T). Si on impose à la masse d'une unité un domaine restreint de variation (M, m_1) avec $m_1 < M_1$, la courbe (T) décrite sera limitée aux points A_0 et a_1 et le maximum relatif du k_{err} sera $k_{max} < 1$ (atteint en a_1).

On voit que l'on peut maintenir le k_{err} de l'unité toujours inférieur à 1, par le seul fait d'imposer à la masse de rester dans son domaine restreint de variation (M, m_1) . La masse est dite alors paramètre de contrôle.

4) Contrôle multiple

Supposons que la limite m_1 étant trop sévère, on veuille

concentration se maintienne aux valeurs pessimistes correspondantes (en l'occurrence ici la valeur c') le maximum relatif de k_{err} va décrire une courbe (T') lieu des points a' .

Soit a'_2 le point où elle coupe (S) et L_2 la courbe (I) passant par a'_2 (correspondant à la valeur M_2 de la masse), l'unité de masse M_2 et de concentration c' est critique. Il suffira donc cette fois d'imposer une limite supérieure m_2 ($m_2 < M_2$) à la masse de l'unité ; le k_{err} maximum de l'unité sera k_{max} atteint en a'_2 ($k_{max} < 1$). On maintient donc le k_{err} de l'unité inférieur à 1 en imposant simultanément aux paramètres masse et concentration de rester dans leur domaine restreint (M, m_2) et (O, c') .

5) Généralisation

Si on suppose que le plan P correspond à une certaine valeur K_1 du k_{eff} ($K_1 < 1$), la courbe (S) est maintenant une courbe sous-critique de masse et de concentration. Un contrôle unique de la masse astreignant celle-ci à rester dans le domaine (M_1, M_2) permettrait de maintenir le k_{eff} de l'unité au plus égal à K_1 (correspondant au point A_1). Le résultat serait le même si on astreignait simultanément les paramètres masse et concentration à rester dans les domaines restreints définis respectivement par (M_1, M_2) et (Oc). Le k_{eff} maximum K_1 de l'unité serait atteint en a_1 pour les valeurs M_2 et c' de la masse et de la concentration.

On voit donc comment, par contrôle unique ou contrôle multiple, on peut obliger le k_{eff} de l'unité à prendre une valeur au plus égale à K_1 , valeur fixée à l'avance et compatible avec les limites initiales.

1.2. Rôle des différents paramètres

Examinons maintenant les différents paramètres pour voir si, eu égard aux conditions habituelles de fonctionnement des installations, on ne peut pas limiter leurs intervalles de variation.

Remarquons tout d'abord que, dans la pratique, seuls certains paramètres seront susceptibles d'être utilisés comme paramètres de contrôle au sens strict du paragraphe précédent : nous les appellerons **paramètres de contrôle principaux** ou **paramètres de contrôle**. En ce qui concerne les autres paramètres nous les appellerons **paramètres de contrôle secondaires** ou **paramètres secondaires**, on leur fixera des valeurs pessimistes, soit d'une manière absolue, soit en fonction des conditions réelles de fonctionnement de l'installation.

Nous examinerons tout d'abord ces derniers.

1.2.1. Paramètres de contrôle secondaires

Enrichissement : l'enrichissement pessimiste à considérer est évidemment 100 % en ^{235}U ou ^{239}Pu puisque nous avons vu que le K effectif augmentait avec l'enrichissement.

Cependant, de telles installations seraient peu rentables pour traiter des enrichissements inférieurs. Aussi, peut-on être amené à définir pour chaque installation ou partie de l'installation un enrichissement maximum susceptible d'y être traité.

Ainsi, si on prévoit le traitement d'uranium d'enrichissement variant de 0,7 à 5 %, la valeur pessimiste de l'enrichissement sera 5 %, quelles que soient les valeurs des autres paramètres. Une exception pourra être quelquefois faite si le paramètre de contrôle est la masse. On pourra faire correspondre à chaque lot d'enrichissement compris entre 0,7 et 5 % des normes de masses correspondantes.

Réflexion : de même, la réflexion ne peut être utilisée comme paramètre de contrôle. L'eau est un des réflecteurs rencontrés le plus souvent (risque d'inondation, de fuite, etc.). Le béton, le corps humain, etc. contiennent une grande proportion d'eau ; aussi est-il raisonnable de fixer la réflexion donnée par 30 cm d'eau (ce qui est équivalent à un réflecteur d'épaisseur infinie) comme valeur pessimiste, bien qu'il y ait des réflecteurs plus efficaces, comme le béryllium ou le graphite.

Il va de soi qu'au cas exceptionnel où une unité serait entourée d'un meilleur réflecteur que l'eau, la valeur pessimiste à considérer serait donnée par ce réflecteur.

Quelquefois, lorsque l'hypothèse du réflecteur d'eau

d'épaisseur infinie ne sera pas reconnue réaliste, on pourra se contenter de la réflexion donnée par quelques centimètres d'eau (réflexion nominale).

Remarque : Pour des unités en interaction la valeur pessimiste de la réflexion ne correspondra plus forcément à un réflecteur d'épaisseur infinie (voir § III).

Hétérogénéité : L'hétérogénéité ne peut être non plus un paramètre de contrôle : nous avons vu que dans certains cas les milieux hétérogènes sont plus réactifs que les milieux homogènes ; dans ces cas, la valeur pessimiste de l'hétérogénéité sera donnée par des réseaux réguliers d'un métal dans l'eau.

Température : Enfin, la température ne sera pas utilisée non plus dans la pratique comme paramètre de contrôle. Les normes de ce guide sont données pour des températures situées dans le domaine ordinaire ; s'il existe dans l'installation des températures plus hautes, ces normes restent applicables en général et la température ordinaire est prise comme valeur pessimiste de ce paramètre.

Si, par contre, il existe des points froids dans l'installation (pièges à azote liquide par exemple), les unités à cette température devront faire l'objet d'une vérification spéciale car il se peut que dans ce cas, les normes classiques se trouvent en défaut.

1.2.2. Paramètres de contrôle principaux

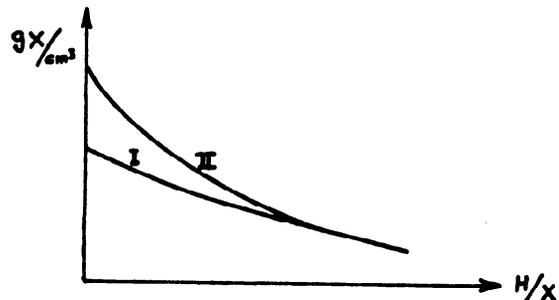
Il reste en définitive comme paramètres de contrôle possibles : la masse, le volume, la géométrie, la concentration, la modulation, la densité et l'empoisonnement.

Mais nous allons voir que certains de ces paramètres ne sont pas indépendants, ce qui va permettre de réduire encore le nombre des paramètres de contrôle.

1.2.2.1. Relation fondamentale entre concentration, modulation et densité.

Les considérations qui vont suivre s'appliquent à des solutions aqueuses ou à des modérateurs de teneur en hydrogène au cm^3 égale à celle de l'eau ; dans le cas d'autres modérateurs, des précautions particulières seraient à prendre dans l'application des normes (voir annexe IV du tome II).

Lorsqu'on dissout un sel dans de l'eau par exemple, il existe une relation entre la concentration en uranium ou plutonium total et le rapport $\frac{H}{X}$ (rapport du nombre de noyaux hydrogène au nombre de noyaux $^{235}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu}$ ou $^{235}\text{U} + ^{239}\text{U}$) qui se traduit par une courbe ayant la forme ci-dessous*.



* Il est évident que cette relation est indépendante de la composition isotopique. Si X désignait le nombre de noyaux fissiles, sa variation en fonction de la concentration en matière fissile se traduirait par une courbe analogue.

Cette courbe est mal connue et variable avec le sel considéré. Pour deux sels I et II ayant les courbes de dissolution I et II ci-dessus, le sel II sera plus pessimiste puisque, pour une modération, la concentration, donc aussi la densité de matériau fissile, sont les plus grandes.

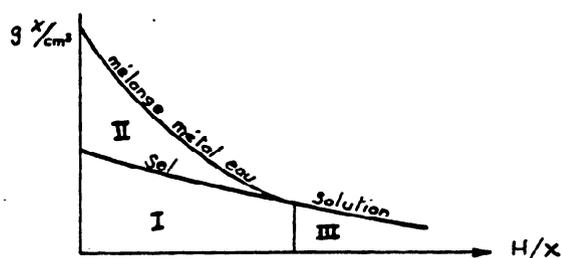
D'autre part, si deux sels avaient la même courbe de dissolution, le sel contenant des noyaux fortement absorbateurs (azote par exemple) serait moins pessimiste que le sel n'en contenant pas ; on se souvient en effet que l'empoisonnement abaisse le K effectif.

On s'est donc attaché à donner par la suite des normes pour les sels et solutions en se référant à la dissolution d'un sel qui, pour chaque matériau fissile, semble être le plus pessimiste, qu'il s'agisse d'une dissolution dans l'eau ou dans un solvant organique de même teneur en hydrogène.

Il s'agit, pour l'uranium, de la dissolution de l' UO_2F_2 dans l'eau et, pour le plutonium, d'un sel fictif équivalent. Si exceptionnellement on rencontrait un sel (d'uranium par exemple) encore plus pessimiste, dont la courbe de dissolution se situerait au-dessus de celle de l' UO_2F_2 , il faudrait utiliser pour ce sel les normes du système métallique ; toutefois, si les différences de densité sont faibles, on pourra avoir intérêt à utiliser les normes-sels, à condition de les réduire par un facteur correctif de densité (voir annexe IV du tome II).

Lorsqu'il s'agit de métal ou de l'immersion de petits blocs de métal dans l'eau ou dans un solvant organique équivalent, la concentration pour une même modération est bien plus forte pour le système métallique que pour le sel, du moins dans la région des $\frac{H}{X} < 20$. De ce fait, les normes valables pour le premier seraient trop pessimistes pour le second.

Ainsi, a-t-on été amené à définir trois courbes de "dissolution" (ou de dilution) correspondant aux trois séries de normes, qu'on trouvera par la suite.



Pour les corps se situant dans la région I, c'est-à-dire la plupart des sels secs, sels humides, mélanges plus ou moins intimes de sels et de composés hydrogénés tels que polyéthylène, huile, acides, solvants organiques équivalents à l'eau, etc., on appliquera les normes-sels.

Pour les corps se situant dans la région II, c'est-à-dire métal, oxydes frittés, petits blocs de métal ou pastilles d'oxydes frittés dans l'eau et tout autre composé hydrogéné, on appliquera les normes du système métallique.

Enfin, pour les corps se situant dans la région III, c'est-à-dire la plupart des solutions aqueuses ou organiques, on appliquera les normes solutions.

Il y a donc une relation entre le rapport de modération et la concentration donnée par les trois courbes de référence et les courbes réelles de dissolution seront remplacées par l'une de ces trois courbes standard.

Concentration optimum

Les influences de la modération (qui combine les effets de ralentissement et d'absorption) et de la concentration (qui agit par l'effet de densité sur le trajet moyen des neutrons) sont bien différentes : les valeurs pessimistes de la densité se situeraient vers les fortes concentrations puisque c'est dans cette région qu'il y a le plus de noyaux fissiles par unité de volume, mais comme il importe de bien ralentir les neutrons, les valeurs pessimistes du ralentissement se situeraient vers les faibles concentrations (fortes modérations). Cependant, dans cette région, l'absorption des neutrons par l'hydrogène devient grande.

L'effet conjugué de ces paramètres détermine une valeur optimum de la concentration à laquelle correspond une valeur optimum de la modération.

Par la suite, nous ne parlerons plus que du paramètre concentration, étant bien entendu qu'il s'agira des effets combinés de ralentissement, d'absorption et de densité.

1.2.2. Liste des paramètres de contrôle usuels

Nous voyons en définitive que les moyens de prévention liés à la construction de l'appareillage, reposent sur le contrôle d'un ou de plusieurs des paramètres suivants :

- masse
- volume
- géométrie
- concentration
- empoisonnement

II. SÉCURITÉ DE L'UNITÉ ISOLÉE

Nous disposons ainsi des paramètres de contrôle précédents pour agir sur le k_{eff} de l'unité isolée à condition toutefois de maintenir les paramètres secondaires à leurs valeurs pessimistes. Ces valeurs pour l'enrichissement, l'hétérogénéité et la température seront à déterminer dans chaque cas comme il a été expliqué au § 1.2.1. La valeur pessimiste de la réflexion pour l'unité isolée sera celle donnée par un réflecteur d'eau d'épaisseur infinie. Il se pourra cependant comme on l'a déjà vu au § 1.2.1. que l'on limite cette valeur pessimiste à la réflexion nominale (quelques centimètres d'eau, voir tome IV).

Il faut maintenant déterminer les domaines restreints des paramètres de contrôle de façon à assurer la sécurité de l'unité.

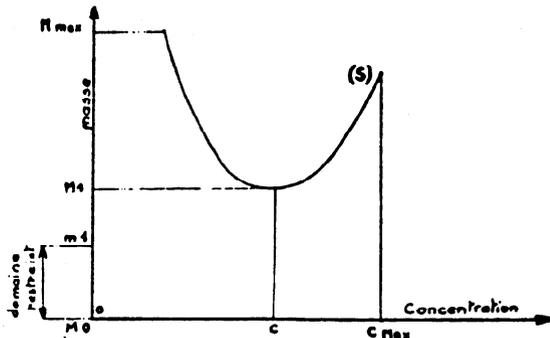
II.1. Sécurité totale - sécurité limitée

II.1.1. Sécurité totale

Reprenons l'exemple d'une unité contenant un sel ou une solution de matériau fissile (voir § 1.1). Supposons également une réflexion totale par l'eau. La courbe de masse critique en fonction de la concentration pour le sel considéré est la courbe (S) de la figure III.1 ; elle a l'allure ci-après :

La masse critique passe par une valeur minimum M_1 obtenue pour une concentration c . Nous avons vu que nous pouvons maintenir l'unité sous-critique par contrôle unique de la masse à condition de maintenir celle-ci dans un domaine restreint limité à une valeur m_1 ($m_1 < M_1$). La distance de m_1 à M_1 est en quelque sorte une mesure de la sécurité de l'unité. Dans le cas de l'unité isolée, la masse m_1 sera déterminée en appliquant un coefficient de sécurité α à la masse M_1 (valeur critique de référence).

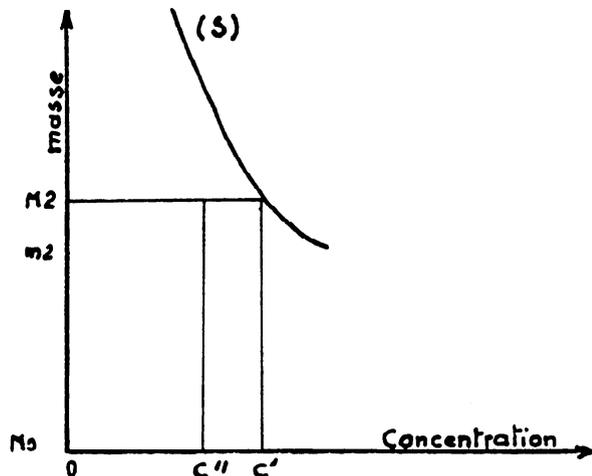
Par le seul fait d'imposer à la masse de l'unité de rester dans son domaine restreint (M_0, m_1) l'unité sera "sûre": on dit qu'elle est en sécurité totale.



D'une manière générale, une unité en contrôle unique sera dite en sécurité totale si on impose au paramètre de contrôle de rester dans son domaine restreint dont une borne est obtenue en appliquant un coefficient de sécurité à la valeur minimum critique du paramètre.

II.1.2. Sécurité limitée

Considérons maintenant le cas d'une unité en contrôle multiple par la masse et la concentration.



Si on limite la concentration à une valeur c' et si on est sûr qu'en aucun cas on ne dépassera pas cette concentration, la masse critique minimum correspondant au domaine restreint ($0, c'$) sera maintenant M_2 ($M_2 > M_1$). On aura réalisé de même la sécurité de l'unité si on peut astreindre sa masse à ne pas dépasser une certaine valeur m_2 ($m_2 < M_1$) obtenue en appliquant un coefficient de sécurité à M_1 . La sécurité, cette fois-ci, sera donc assurée par le respect simultané des domaines restreints de masse et de concentration (M_2, m_2) et ($0, c'$). On pourrait imaginer d'autres moyens permettant d'assurer la sécurité de l'unité: si par exemple on veut garder M_1 comme valeur maximum de la masse de l'unité, on pourrait appliquer un coefficient de sécurité à la concentration c' et déterminer ainsi les nouveaux domaines restreints (M_1, M_2) et ($0, c''$). En fait, de par la nature différente des paramètres de contrôle, toutes les façons possibles de définir les domaines restreints ne sont pas équivalentes du point de vue de la sécurité.

D'une manière générale, une unité en contrôle multiple sera dite en sécurité limitée si on impose aux paramètres de contrôle de rester dans leurs domaines restreints. Un au moins des domaines restreints devra être limité à une valeur obtenue en appliquant un coefficient de sécurité à la valeur critique minimum du paramètre correspondant. Cette valeur critique minimum sera déterminée en tenant compte des valeurs pessimistes des autres paramètres dans leurs propres domaines.

II.2. Coefficient de sécurité

L'utilisation des coefficients de sécurité dans la définition des domaines restreints est nécessaire pour les raisons suivantes:

II.2.1. Incertitude de calculs

D'abord des raisons inhérentes à la façon dont les normes que nous donnons par la suite ont été établies. En effet, les courbes de normes données ont été calculées en essayant toutes les fois que cela a été possible de recalculer les points de calcul sur les points expérimentaux. Les méthodes de calcul ont des précisions limitées et variables avec les cas traités. Par exemple, une méthode de calcul permettant d'évaluer correctement des masses ou géométries critiques dans certains domaines de concentration sera très imprécise dans d'autres domaines. Aussi a-t-il fallu majorer globalement les erreurs dues aux différentes méthodes de calcul et déterminer des valeurs α_{MAX} du coefficient de sécurité pour chaque paramètre de contrôle, valeurs qu'il ne faudra en aucun cas dépasser sauf si des expériences directes et précises peuvent être faites.

II.2.2. Effet d'hétérogénéité continue

De plus les normes critiques proposées, du moins pour les milieux homogènes, ont été évaluées en supposant les milieux réellement homogènes. On n'a pas tenu compte de variations locales de concentration qui peuvent dans certains cas augmenter la réactivité du milieu (hétérogénéité du type C_0 , voir chap. I). Un tel type d'hétérogénéité souvent imprévisible se rencontre fréquemment dans la réalité: mélange de solutions à différentes concentrations, précipitation, évaporation, etc. Aussi doit-on en tenir compte dans le choix du coefficient de sécurité, sauf s'il est reconnu que le milieu ne peut rigoureusement pas présenter ce type d'hétérogénéité.

L'influence de ces deux aspects sur le coefficient de sécurité, à savoir: incertitude dans les calculs et effet d'hétérogénéité sera chiffrée au § IV.2 du chapitre I du tome II pour chaque paramètre de contrôle.

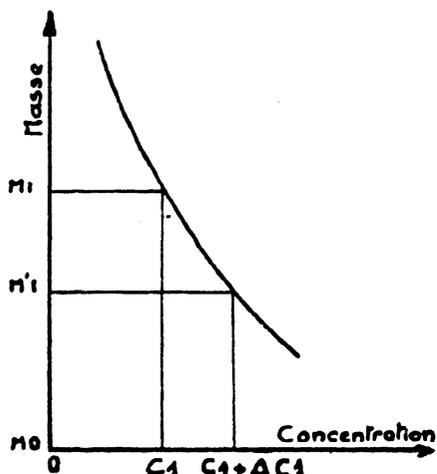
II.2.3. Incertitudes géométriques et opérationnelles

Il existe enfin des raisons qui concernent plus spécialement l'utilisateur de ce guide, qui reste seul juge des modifications à apporter aux valeurs précédentes du coefficient de sécurité, afin de tenir compte des erreurs dans la construction de son appareillage et des erreurs opérationnelles possibles. A ce point de vue il existe deux types de contrôle de la sécurité de l'unité qui influent de façon bien différente sur ces modifications.

Pour une unité en contrôle géométrique, c'est-à-dire en

sécurité totale par la géométrie (volume, diamètre de cylindre, épaisseur de plaque) on devra simplement tenir compte des tolérances de fabrication. Ces tolérances, même si elles sont importantes, ne diminueront pas sensiblement les valeurs du coefficient de sécurité définies précédemment. Supposons par exemple que nous voulions définir une sécurité totale pour une unité cylindrique. Si R_0 est le rayon critique minimum de référence (avec une réflexion par l'eau) et α le coefficient de sécurité déterminé en fonction des incertitudes sur la valeur R_0 et l'hétérogénéité possible de l'unité, le rayon de l'unité sera défini par $R = (\alpha - \epsilon) R_0$, ϵ étant la tolérance annoncée par le constructeur du cylindre.

Pour une unité en contrôle opérationnel (c'est-à-dire pour une unité dont la sécurité repose sur le contrôle d'au moins un des paramètres masse ou concentration), les valeurs du coefficient de sécurité seront à diminuer d'une façon



La masse critique de référence ne sera plus M_1 mais M_1' correspondant à une valeur $C_1 + \Delta C_1$ de la concentration qui dans bien des cas pourra être très inférieure à M_1 , et c'est à cette valeur M_1' qu'il faudra appliquer le coefficient de sécurité α qui tient compte des incertitudes de calcul et de l'hétérogénéité. Au contraire pour un domaine de concentration limitée à une valeur minimum C_2 connue à ΔC_2 près, la masse critique de référence sera M_2' correspondant à une concentration $C_2 - \Delta C_2$.

II.3. Définitions de normes des unités isolées

A titre d'exemple nous allons montrer comment pour un sel en solution on peut atteindre des normes valables pour des unités isolées à partir des courbes de valeurs critiques réfléchies.

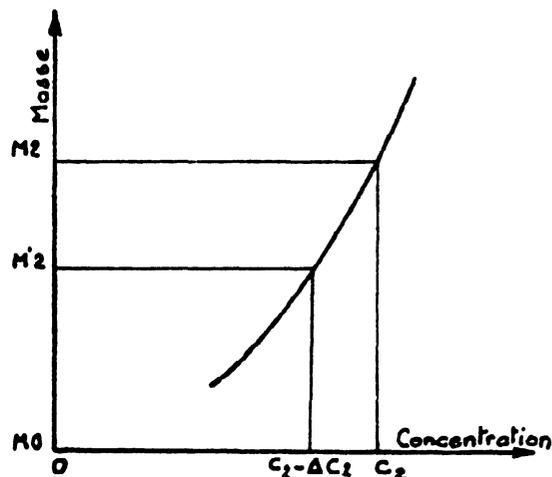
II.3.1. Normes pondérales

Considérons donc l'exemple d'un sel sec que l'on dissout dans l'eau. Si on fixe les paramètres : géométrie, réflexion et empoisonnement à leurs valeurs pessimistes, soit : sphère, réflecteur épais d'eau et empoisonnement nul, on

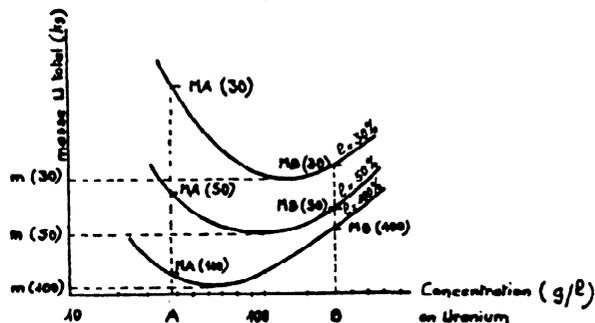
plus sensible : lorsqu'une unité sera en sécurité totale par la masse, il faudra tenir compte d'un double chargement si celui-ci peut résulter d'une seule éventualité. De même, si une unité est en sécurité limitée par la masse ou la géométrie et la concentration, il faudra tenir compte des erreurs possibles sur la détermination de cette concentration. (En pratique ces types de sécurité limitée : masse ou géométrie et concentration seront les plus fréquents et la plupart des courbes de normes données par la suite s'y rapporteront.)

II.2.4. Exemple :

Reprenons le cas d'une unité en sécurité limitée par la masse et la concentration et supposons qu'on limite le domaine restreint de concentration à une valeur maximum C_2 connue à ΔC_2 près, compte tenu des erreurs d'analyses et de manipulations.



peut déterminer dans ces conditions un réseau de courbes de masses critiques en fonction des autres paramètres : enrichissement et concentration. Ce réseau est représenté schématiquement par la figure ci-dessous :



Pour chaque enrichissement e , il existe une valeur optimum de la concentration qui entraîne la plus petite masse critique $m(e)$. Remarquons bien une fois de plus que cette valeur pessimiste de la concentration n'est pas celle du sel sec.

La sécurité totale par contrôle de la masse sera obtenue en maintenant la masse de l'unité inférieure à la masse minimum critique $m(100)$ correspondant à un enrichissement de 100 % et à la concentration pessimiste ($m_{\text{unité}} = \alpha_m(100)$, α_m coefficient de sécurité pour la masse). On voit donc, dans ces conditions, que quelles que soient les valeurs des paramètres autres que la masse, l'unité ne peut devenir critique.

Très souvent, la norme de sécurité totale pourra être élargie si on peut fixer l'enrichissement à une valeur moins pessimiste.

Ce sera le cas d'une installation comportant plusieurs chaînes, une chaîne étant prévue pour le traitement de sels enrichis jusqu'à 30 % par exemple, une autre pour les enrichissements compris entre 30 % et 50 %, et une troisième entre 50 % et 100 % ; on définira alors les normes des unités de chacune de ces chaînes en appliquant des coefficients de sécurité aux masses minima critiques de référence : $m(30)$, $m(50)$ et $m(100)$.

De plus, si on peut contrôler la concentration et la restreindre à un certain domaine de variation, les normes de masse se trouveront encore élargies ; l'unité sera en sécurité limitée.

Reprenant le même exemple, si les chaînes sont prévues pour des traitements par voie sèche et que l'on puisse, compte tenu des accidents possibles, définir une concentration minimum B, on pourra alors se référer aux masses critiques : $M_n(30)$, $M_n(50)$ ou $M_n(100)$.

Par contre, si les opérations portent sur des solutions très diluées et si l'on peut définir une concentration maximum A, compte tenu des précipitations possibles, on se référera aux masses critiques : $M_A(30)$, $M_A(50)$ ou $M_A(100)$.

II.3.2. Normes de volume

Par l'intermédiaire de la concentration, on déduit immédiatement du réseau précédent un réseau de courbes de volume critique. Pour un enrichissement donné, la courbe de volume critique présente un minimum pour une concentration optimum. Cette valeur pessimiste de la concentration, d'ailleurs différente de celle de la courbe masse, ne correspondra pas non plus au sel sec.

Les volumes critiques minima $V(c)$ permettront de définir une sécurité totale par le volume, soit en fixant c à la valeur 100 % soit, si possible, en lui attribuant des valeurs moins pessimistes : on imposera à l'unité un volume inférieur à $v(c)$.

Un contrôle supplémentaire de la concentration permettra d'obtenir une sécurité limitée en élargissant la norme de volume.

II.3.3. Normes géométriques

Lorsqu'un appareil pourra se ramener à une forme géométrique simple : cylindre ou parallélépipède, il faudra rechercher le plus souvent une sécurité géométrique. Comme pour la masse, on peut tracer des réseaux de courbes donnant le diamètre critique d'un cylindre de hauteur infinie, ou l'épaisseur d'une plaque, dont les autres dimensions seraient infinies, en fonction de l'enrichissement et de la concentration. Ces courbes de dimension critique (diamètre ou épaisseur) à enrichissement donné présentent encore un minimum pour une concentration optimum et, ici encore, le sel sec n'est pas le plus pessimiste.

Ces dimensions critiques minima $d(e)$ permettent de définir une sécurité totale par la géométrie, e étant toujours défini au mieux comme ci-dessus.

Comme toujours, une sécurité limitée basée sur un contrôle supplémentaire de la concentration est possible et élargit la norme de dimension. Si par exemple, dans une installation traitant au maximum du 30 %, on désire réaliser un stockage d'effluents pour lequel on a toujours une concentration inférieure à B, elle-même inférieure à la concentration optimum, on se référera au diamètre $d_A(30)$.

II.3.4. Normes de concentration

Pour un enrichissement donné, il existe une valeur de concentration $c(e)$ en dessous de laquelle il est impossible d'atteindre les conditions critiques, même en milieu infini : ceci tient au fait que, l'absorption par l'hydrogène devenant prépondérante, le k_{∞} du milieu est inférieur à 1.

Si e est fixé de manière pessimiste à 100 %, une sécurité totale sera basée sur un maximum de concentration égal à $c(100)$.

S'il est possible de fixer e à une valeur moins pessimiste, la norme de sécurité totale par la concentration pourra être élargie à $c(e)$.

II.3.5. Empoisonnement

L'emploi d'un poison tel que le bore ou le cadmium peut, dans certains cas particuliers où cela est nécessaire, élargir encore les normes de sécurité totale ou limitée.

On peut imaginer d'utiliser des appareils en verre boré, des anneaux de Rashig contenant du bore, etc. Une étude approfondie de chaque cas particulier est nécessaire et doit être entreprise par des spécialistes de criticité. On trouvera dans le tome IV, un certain nombre de cas où l'empoisonnement permet d'élargir les normes.

II.3.6. Normes des milieux hétérogènes

Dans la suite, pour le plutonium et pour l'uranium enrichi à plus de 10 %, nous supposons les milieux homogènes.

Pour les enrichissements compris entre 5 et 10 %, on considérera les milieux comme homogènes s'il s'agit d'une sécurité par la masse. Par contre, pour toute sécurité basée sur la géométrie, il conviendra d'appliquer, si besoin est, les normes hétérogènes.

Pour des enrichissements inférieurs à 5 % on prendra toujours les normes correspondant à l'homogénéité ou l'hétérogénéité du milieu.

Remarque. — Le principe de la détermination des normes des unités isolées à partir des courbes critiques réfléchies des sels et solutions s'applique de la même façon pour des mélanges métal-eau. Seules les courbes sont différentes et les minima sont déplacés.

III. SÉCURITÉ D'UN ENSEMBLE

La sécurité d'un ensemble repose sur deux types de critères. Il faut d'abord que chaque unité de l'ensemble soit sûre par elle-même, donc qu'elle vérifie les critères individuels de sécurité. Il faut ensuite que les unités en interaction vérifient un certain nombre de critères collectifs.

III.1. Critère individuel

Chaque unité de l'ensemble supposée isolée doit être "sûre" avec un réflecteur infini d'eau. Autrement dit, on doit appliquer à chacune d'elles les considérations du paragraphe précédent.

III.2. Critères collectifs

Nous savons (voir chapitre II) que la sécurité des unités

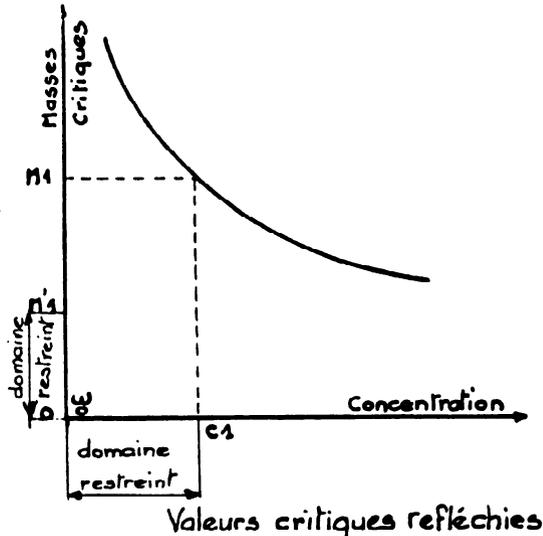
en interaction va reposer sur les critères suivants :

- détermination d'un angle solide limite pour chaque unité ;
- comparaison des angles solides réels avec l'angle solide limite.

Nous savons également déterminer l'angle solide limite lorsqu'on connaît le K_{err} k_a de l'unité supposée isolée et sans réflexion.

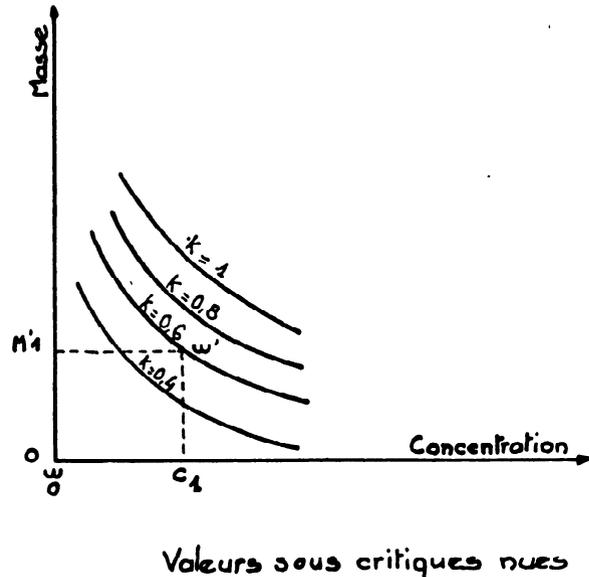
III.2.1. Principe de la détermination du K_{err} nu des unités supposées isolées.

On utilise, pour déterminer le K_{err} , les courbes de



normes sous-critiques nues. On aura été amené dans l'étude du § III.1 à utiliser les courbes de valeurs critiques réfléchies et à définir le ou les domaines restreints des paramètres de contrôle. Il suffira de reporter sur les courbes sous-critiques nues correspondantes ce ou ces domaines restreints et de prendre dans la plage ainsi définie la valeur maximum du K_{err} nu.

Prenons l'exemple d'une unité contenant une solution et qui est en sécurité limitée par la masse et la concentration. Supposons également que les courbes critiques réfléchies et sous-critiques nues aient l'allure ci-dessous :



Au domaine restreint de concentration ($0 C_1$), (C_1 tenant compte des erreurs possibles d'analyse, voir § II.2.4) correspond une masse minimum critique réfléchiée M_1 , à partir de laquelle on définit un domaine restreint de masse (OM'_1) et une masse maximum pour l'unité $M'_1 = \alpha M_1$, α étant le coefficient de sécurité. En reportant les valeurs C_1 et M'_1 sur le graphique de valeurs sous-critiques nues on détermine une plage $C_1 \omega' M'_1 \omega$ à l'intérieur de laquelle il est aisé de choisir la valeur maximum du K_{err} de l'unité ; dans ce cas de figure on prendrait $k_a = 0,6$. Si ω' tombait entre deux courbes, on interpolerait entre les valeurs k_1 et $k_1 + 1$ correspondant à ces courbes ou on majorerait le K_{err} de l'unité par $k_1 + 1$.

III.2.2. Principe de la semi-réflexion

Si dans le cas de l'unité isolée, on connaît la valeur pessimiste de la réflexion : celle d'une épaisseur infinie d'eau, on ne sait plus par contre, dans le cas d'un ensemble d'unités en interaction, attribuer de valeur pessimiste à la réflexion. En effet, en entourant chaque unité de l'ensemble par un réflecteur d'eau de forte épaisseur on augmenterait la réactivité propre à chaque unité mais on annulerait les effets des interactions des unités entre elles. Au contraire supposer les unités sans réflecteur diminuerait leur réactivité propre mais augmenterait leurs interactions. Il y aurait

certainement un compromis entre ces deux solutions. La réactivité de l'ensemble des unités serait maximum pour des épaisseurs d'eau entre les unités assez faibles pour ne pas trop atténuer les couplages entre unités tout en augmentant la réactivité propre de chaque unité. Il va sans dire que la détermination de ces épaisseurs optimum de réflecteur est très complexe. Une solution simple mais pessimiste serait de considérer que la présence d'un réflecteur épais d'eau autour de chaque unité n'atténuerait en rien les interactions entre ces unités. On remplacerait alors le K_{err} nu par le K_{err} réfléchi dans la détermination des angles solides limites ; en fait on adoptera presque toujours l'hypothèse de la semi-réflexion qui consiste (voir chap. II) à supposer autour de chaque unité un demi-réflecteur restant toujours du côté opposé aux différentes unités en regard. Cela consiste dans la détermination de l'angle solide limite à majorer le K_{err} nu par le K_{err} semi-

$$\text{réfléchi } k_{er} = \frac{1}{2} (k_a + k_r) \text{ ou encore par } \frac{1 + k_a}{2}.$$

Cette hypothèse pessimiste tient bien compte des matériaux modérateurs qui peuvent accidentellement ou non se trouver entre les unités. Elle est suffisamment pessimiste pour que l'on n'ait pas comme dans le cas de l'unité isolée à chercher des coefficients de sécurité supplémentaires.

CHAPITRE IV *

NATURE ET CONSÉQUENCES D'UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

I. POSITION DU PROBLÈME

Nous avons vu dans les deux premiers chapitres que, dès que le K_{eff} d'une unité isolée, ou le K_{eff} global d'un ensemble d'unités en interaction est supérieur à 1, il y a possibilité théorique de réaction en chaîne divergente ; il faut de plus amorcer la réaction mais ceci sera toujours réalisé, en pratique, par exemple par les fissions spontanées.

Une réaction en chaîne divergente possède deux particularités :

— son extrême rapidité de développement due à la durée très faible d'une génération de neutrons ; un nombre de 10^{10} fissions peut être obtenu en un temps variant du 1/1000 de seconde à quelques secondes ;

— sa difficulté de prévention directe, liée au fait qu'il n'existe aucune méthode simple, utilisable commodément dans une installation, pour prévenir de son imminence : le système demeure apparemment parfaitement sûr jusqu'à l'instant de la réalisation de l'état critique.

Bien que le phénomène physique mis en jeu soit essentiellement le même, les conséquences d'un tel accident de criticité sont sans rapport avec les effets terrifiants d'un engin nucléaire du type A, mais s'apparentent davantage aux conséquences d'une explosion chimique classique avec, en plus, des risques graves d'irradiation et éventuellement de contamination dans le voisinage immédiat.

Il conviendra de prévoir, lors de la conception de l'installation, des parades à ces conséquences radiologiques en vue de limiter les effets sur le personnel d'exploitation.

II. GRANDEURS CARACTÉRISANT UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

II.1. Forme et durée

L'expérience actuelle — heureusement faible — sur les accidents de criticité dans les installations industrielles se base sur 5 accidents survenus entre 1958 et 1962. Elle a montré qu'un accident critique peut consister en une seule excursion d'une durée inférieure à une fraction de seconde, ou bien une excursion très courte suivie d'un palier de durée très variable (un des accidents a duré 37 heures) ou encore une succession d'excursions dues à une oscillation entre un état surcritique et un état sous-critique.

* Ce chapitre a été rédigé avec la collaboration de M. J.-M. LAVIE, du Service de Contrôle des Radiations et de Génie Radioactif.

II.2. Nombre de fissions produites

Le facteur en général le plus caractéristique pour mesurer l'importance d'un accident de criticité est l'énergie totale de fission ou le nombre total de fissions engendrées.

Il existe une infinie variété d'accidents de criticité possibles dans la gamme desquels peuvent être sélectionnés, en fonction de leur probabilité d'occurrence, sous l'angle sûreté radiologique, l'Accident Maximal Caractéristique en vue de régler les seuils des dispositifs de détection.

Les accidents caractéristiques standards communément retenus sont les suivants :

— Accident Maximal Caractéristique

- Système modéré
 - premier pic 10¹⁰ fissions
 - oscillation ou autoentretien 10¹⁰ fissions
- Système rapide
 - un seul pic 10¹⁰ fissions
 - oscillation ou autoentretien invraisemblable

— Accident Minimal Caractéristique

10¹⁰ fissions dans le premier pic

II.3. La densité de puissance

La densité de puissance, ou nombre total de fissions engendrées par unité de volume est directement liée aux phénomènes physiques accompagnant la réaction en chaîne (expansion thermique, production de gaz par radiolyse, ébullition d'eau, fusion ou vaporisation du métal...) ; ces phénomènes se développant au fur et à mesure de l'accroissement du nombre de fissions vont modifier plus ou moins rapidement les conditions du milieu en le rendant à nouveau sous-critique (soit après une excursion unique, soit après un palier plus ou moins long).

A titre d'exemple, la formation de bulles de gaz par radiolyse de l'eau nécessite quelque 10¹⁰ fissions/cm³.

III. PARAMÈTRES INFLUENÇANT LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE EXCURSION.

On peut citer, parmi les plus importants :

- la nature du système (solution ou métal) ;
- la masse de matière fissile ;
- la densité de matière fissile (influençant la densité de puissance) ;
- l'addition totale de réactivité (excès du K_{eff} par rapport à 1) ;
- la vitesse d'addition de réactivité (influençant le taux de fissions) ;
- le niveau initial de la population neutronique (sources extérieures ou fissions spontanées) ;
- le degré de confinement.

IV. RISQUES ASSOCIÉS A UN ACCIDENT DE CRITICITÉ

IV.1. Risques mécaniques

Ces risques ne sont, en principe, pas à craindre. En effet, l'énergie libérée, par une excursion de 10^{23} fissions par exemple, est de l'ordre de 34 mégajoules, ou 10 kWh, soit une énergie inférieure à celle nécessaire pour porter 100 litres d'eau à l'ébullition.

Le risque d'explosion, compte tenu du fait que les récipients seront en général ouverts, sera donc limité.

(A titre de comparaison, un engin du type A, d'équivalent TNT de 1 kilotonne, correspond à 10^{23} fissions).

Le tableau ci-après établit une comparaison entre les différents types d'énergie libérée par une excursion critique de 10^{23} fissions.

Nombre de fissions	10^{23} fissions
Quantité d'U-235 ayant subi la fission	$5,3 \cdot 10^{-7}$ grammes
Energie libérée	$3,4 \cdot 10^7$ joules
Chaleur engendrée	$8,2 \cdot 10^6$ calories
Equivalent T.N.T.	6,95 kilogrammes
Radioactivité engendrée	$1,02 \cdot 10^3$ curies
I-131 produit	0,84 curie
Sr-90 produit	1,52 curie

IV.2. Risques radiologiques

Ces risques, de beaucoup les plus importants, peuvent être classés en deux catégories :

— d'une part, l'exposition aux rayonnements direct et diffusé (effet de ciel) due aux photons gamma et aux neutrons émis lors des fissions, risque immédiat suivi du risque d'irradiation par les rayonnements des produits de fission formés,

— d'autre part, la contamination et l'irradiation dues au nuage de produits de fission susceptibles d'être émis en atmosphère confinée ou libre. Ces risques, moins immédiats que les précédents, consistent :

- en une contamination interne par inhalation de produits

de fission lors du passage du nuage ou par consommation de denrées contaminées par une retombée (eau, lait, légumes),

- en une irradiation externe par le nuage lui-même lors de son passage ou par le sol contaminé par une retombée éventuelle.

Les radioexpositions externes dues aux rayonnements instantanés neutrons et gamma émis lors d'une excursion nucléaire de 10^{23} fissions sont les suivantes, déduites de mesures expérimentales :

	Système modéré	Système rapide
neutrons	7 000 rad	29 000 rad
gamma	17 000 rad	2 900 rad
n + γ	24 000 rad	39 900 rad

Dose à un mètre pour 10^{23} fissions

V. PRÉVENTION DES CONSÉQUENCES

La prévention des conséquences d'un éventuel accident de criticité pose des problèmes de sûreté radiologique qu'il conviendra d'aborder dès le stade de l'avant-projet de l'installation afin de parvenir à des solutions à la fois économiques et efficaces. Cette prévention, qui a pour but une limitation des conséquences radiologiques, repose sur le choix de l'emplacement de l'installation sur le site, la conception générale de l'installation et son aménagement, compte tenu du nouveau type de risque ainsi que sur les procédures et les consignes d'urgence dont la détection de l'accident constitue le signe vital de mise en application. Outre la détection de l'accident, assurée par des détecteurs à intégration de dose gamma ou neutrons, il convient de prévoir les moyens d'identification rapide des personnes ayant reçu une radioexposition significative et d'estimation de la dose reçue en vue de guider le traitement médical, ainsi que les moyens de localisation de l'accident et d'intervention en vue de la réoccupation des lieux.

L'examen attentif de l'ensemble des problèmes de sûreté radiologique associés à un accident de criticité fait l'objet du document Criticité et Radioprotection du Service de Contrôle des Radiations et de Génie radioactif.

II - Règles Pratiques

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉTUDE NUCLÉAIRE D'UNE INSTALLATION

Les notions générales exposées dans le tome précédent vont nous permettre de comprendre l'utilisation des normes et de nous guider dans les études de sécurité.

Il importe avant toute chose et afin de limiter ces études, de voir si dans l'installation on ne peut pas grouper les unités en zones, isolées neutroniquement les unes des autres.

Il est bien évident que les problèmes d'interaction seront grandement simplifiés s'ils ne portent que sur un nombre restreint d'unités. Dans ce cas, on étudiera séparément la sécurité de chacune des zones composant l'installation.

Il faut donc s'efforcer de définir des zones satisfaisant aux règles d'isolement.

I. RÈGLES D'ISOLEMENT

I.1. Écrans neutroniques

Par écran neutronique on entend tout matériau qui, disposé en épaisseur suffisante autour d'une zone, rend l'interaction négligeable entre cette zone et les voisines.

Les principaux matériaux que l'on peut utiliser à cet effet sont :

- l'eau ou les matériaux hydrogénés ayant à peu près la même densité en hydrogène que l'eau, comme la paraffine, le polyéthylène, certaines matières plastiques, sous une épaisseur de 30 cm environ ;
- le bois, en épaisseur variable selon la densité et sa teneur en hydrogène ;
- 20 cm de béton ordinaire ;
- 20 cm d'acier.

I.2. Isolement par la distance

Deux zones sont isolées l'une de l'autre si elles satisfont à au moins une des règles suivantes :

- la distance minimum bord à bord entre les unités les plus rapprochées des deux zones est supérieure ou égale à la plus grande des valeurs suivantes :
 - 1° 4 m,
 - 2° la plus grande dimension des deux zones ;
- l'angle solide maximum entre une unité quelconque d'une zone et une unité quelconque de l'autre est toujours inférieur à 0,005 stéradians.

Deux zones pouvant se ramener à des formes sphériques ou cylindriques sont isolées si la distance entre les centres des sphères ou les axes des cylindres circonscrits est au moins égale à six fois la somme de leurs rayons ;

- deux rangées d'unités alignées et identiques sont

isolées quelle que soit leur longueur, si leur séparation est d'au moins 4 m.

Remarque : l'isolement de deux zones n'est pas affecté par des canalisations simples, contenant des solutions, si leurs diamètres sont inférieurs à 2,5 cm et si les raccords à angle droit sont séparés par au moins 60 cm.

II. CHOIX DES NORMES : INFLUENCE DES ZONES DE DENSITÉ

Avant d'entreprendre l'étude de la sécurité propre à chaque unité, il faut déterminer la courbe de dilution à laquelle on doit se référer :

Nous avons vu que, pour chaque matériau fissile, on a choisi trois courbes de dilution standard, définissant trois zones :

- Zone I. — Sels sec et humide ;
- Zone II. — Mélange métal-eau ;
- Zone III. — Solution aqueuse.

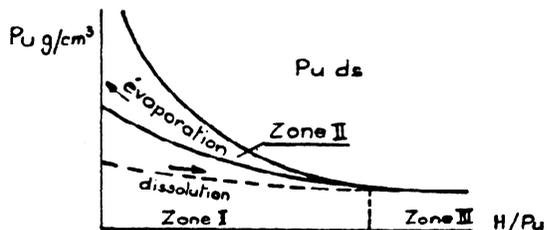
Pour un matériau fissile donné, les courbes de dilution de solutions aqueuses seront, dans la zone III, très proches de la courbe standard limitant cette zone. De même, les courbes de dilution pour des systèmes métalliques, divisés et immergés dans l'eau, seront très voisines de la courbe standard mélange eau-métal limitant la zone II et, pour les fortes dilutions, de la courbe standard solution. Par contre, il sera courant de trouver des sels dont les courbes de dilution, assez éloignées de la courbe standard "sel", se situeront dans la zone I (sels à faible densité) ou dans la zone II (sels à forte densité) et, dans ce guide, la courbe standard mélange métal-eau est surtout donnée comme limite supérieure des courbes de dilution de tous les sels, aussi denses soient-ils. Dans l'un ou l'autre des cas précédents, les courbes de dilution rejoindront la courbe standard solution, aux faibles concentrations.

Dans l'étude de la sécurité de l'unité, plusieurs possibilités se présentent :

La loi de dilution et les limites de concentration relatives à cette unité sont telles que l'on se trouve dans la zone I ou sur la courbe standard sel. Dans ce cas, on appliquera les normes sels. Si, au contraire, on se trouve dans la zone II ou sur la courbe mélange métal-eau, on appliquera les normes mélanges métal-eau. Enfin, si on se trouve dans la zone III ou sur la courbe standard solution, on appliquera les normes solutions (le cas des solutions organiques est traité dans l'annexe IV). Notons que si quelquefois la courbe de dilution d'un sel, tout en étant dans la zone II, se trouve très voisine de la courbe standard sel, on aura avantage à appliquer à l'unité les normes "sels" réduites par un facteur correctif de densité (voir annexe IV).

Une unité dont la concentration évolue pourra évidemment passer par plusieurs zones de densité. Il conviendra alors de retenir, pour cette unité, les normes les plus pessimistes des zones traversées.

Prenons l'exemple d'un sel de plutonium à faible densité que l'on dissout dans une solution acide. Pendant la dissolution on décrit une courbe, se trouvant dans la zone I,



qui va sensiblement rejoindre la courbe standard solution limitant la zone III. Supposons qu'après différents traitements chimiques, on veuille évaporer la solution, et qu'un excès de chauffage accidentel résultant d'une éventualité au plus, soit susceptible de donner un oxyde de plutonium se trouvant dans la zone II.

Une telle unité sera passée successivement de la zone I à la zone III et le produit final pourra se trouver dans la zone II. Si la sécurité de l'unité est basée sur la masse, la norme à retenir sera la norme solution. Par contre, si la sécurité est basée sur la géométrie (volume par exemple), la norme à retenir sera la norme mélange métal-eau ou la norme sel, corrigée par un facteur qui sera fonction de la densité du produit final.

III. CHOIX DES NORMES : INFLUENCE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ

Les différents types d'hétérogénéité sont cités dans le chapitre I du tome I. Ils peuvent tous, dans certains cas, apporter une réactivité supplémentaire, aussi doit-on en tenir compte dans le choix des normes à utiliser.

III.1. Effets d'hétérogénéité continue (type C₁)

On a un tel type d'hétérogénéité, rappelons-le, lorsque dans un milieu la concentration varie d'une façon continue d'un point à un autre : ce sera le cas d'un mélange de solutions à concentrations différentes, ou encore d'une solution en cours de précipitation, etc. Ce type d'hétérogénéité est souvent difficile à prévoir et il est toujours préférable d'en tenir compte dans le choix des normes. Des exceptions peuvent être faites pour des unités ne pouvant absolument pas présenter ce type d'hétérogénéité ; métal massif par exemple.

On a vu, dans le chapitre III du tome I, comment on tient compte des effets de ce type d'hétérogénéité dans le choix du coefficient de sécurité servant à déterminer les normes pour les unités isolées. On trouvera au § IV les valeurs numériques de ce coefficient de sécurité.

III.2. Effets d'hétérogénéité discontinue

Un milieu est hétérogène discontinu s'il comporte deux phases (voir tome I, chap. I), une phase à forte densité (phase solide) et une phase à faible densité (phase liquide en général), celle-ci pouvant être purement modératrice (type D₁) : c'est le cas de fragments métalliques dans l'eau, multiplicatrice homogène (type D₂) : c'est le cas de la dissolution de métal dans une solution agitée, ou multiplicatrice hétérogène continue (type D₃) : c'est le cas de la dissolution de métal dans une solution non agitée.

III.2.1. Milieux discontinus pour lesquels on peut appliquer les normes des systèmes continus

Les effets d'hétérogénéité discontinue seront négligés pour les milieux présentant l'une des caractéristiques suivantes :

- La phase à forte densité se situe dans la zone I.
- La phase à forte densité se trouve dans la zone II mais une dimension au moins de ses constituants élémentaires est inférieure aux valeurs de λ données dans le tableau suivant :

	Enrichissement en ²³⁵ U									Plutonium
	93,5	50	30	10	5	4	3	2	1	
λ (mm)	0,06	0,12	0,18	0,5	0,9	1	1,26	1,58	2	0,04

Ces valeurs correspondent à une phase métallique. Si la phase de forte densité a une densité d en uranium total plus faible que celle du métal (oxyde fritté par exemple), les valeurs de λ pourront être multipliées par le rapport $\frac{18,7}{d}$.

d

— L'hétérogénéité est du type D₁ (phase à faible densité non multiplicatrice) et la matière fissile est du plutonium ou de l'uranium enrichi à plus de 10 %, quel que soit le paramètre utilisé, ou plus de 5 % si le paramètre utilisé est la masse.

On pourra, dans ces différents cas, homogénéiser les milieux, évaluer une concentration moyenne et leur appliquer les normes des milieux continus.

Exemple : on veut dissoudre des petits lingots cylindriques d'oxyde fritté dont le diamètre est de 4 mm et la densité en uranium de 9 g/cm³, l'enrichissement étant de 1 % en ²³⁵U, on a $4 < 2 \times \frac{18,7}{9}$. On peut donc choisir un dissolvant

cylindrique de diamètre sûr pour une solution (compte tenu des effets d'hétérogénéité de type C₁). La sécurité serait encore assurée si, après dissolution, on précipitait un produit à faible densité se trouvant dans la zone I et quelle que soit sa granulométrie.

III.2.2. Milieux discontinus pour lesquels on ne peut appliquer les normes des systèmes continus

Ce sont évidemment les milieux discontinus qui ne satisfont pas aux règles précédentes :

— Pour les milieux de type D₁ et D₂, on trouvera quelques normes au chapitre II du tome IV.

— Pour les milieux de type D₃, on utilisera les courbes hétérogènes données dans ce guide, pour de l'uranium enrichi à moins de 10 %, lorsqu'il s'agira de normes géométriques et de 5 % lorsqu'il s'agira de normes de masse.

IV. PRINCIPE DE LA DOUBLE ÉVENTUALITÉ - APPLICATION A LA DÉFINITION DES DOMAINES RESTREINTS - COEFFICIENT DE SÉCURITÉ

IV.1. Principe de la double éventualité

Nous avons vu dans le tome précédent comment l'existence d'un domaine restreint de variation pour un ou plusieurs paramètres permettait d'élargir les normes, en excluant la possibilité de donner à ces paramètres leurs valeurs pessimistes. La sécurité d'une installation basée sur l'existence de ces domaines restreints, ne serait plus assurée si, accidentellement, ces paramètres venaient à sortir de leur domaine de variation.

Il faut donc définir avec soin ces domaines de variation et tenir compte des accidents possibles.

A cet effet on pourra utiliser le principe de la double éventualité :

Un système contenant un matériau fissile doit être conçu de façon telle qu'il serait nécessaire qu'au moins deux événements improbables et indépendants se produisent simultanément pour rendre possible, sinon probable, un accident critique.

— Si un seul paramètre en sortant de son domaine restreint permet d'atteindre cette probabilité appréciable, il faut appliquer le principe de la double éventualité à la définition même du domaine restreint.

Exemple : un fût contenant une forte quantité d'un sel sec de matériau fissile et pouvant diverger si de l'eau y pénètre. Il faudra dans ce cas prévoir un fût étanche. Un accident possible serait le résultat d'une inondation d'une part et d'un joint d'étanchéité défectueux d'autre part.

— Si maintenant il faut, pour avoir possibilité d'accident, que deux paramètres sortent de leur domaine restreint et de ce fait constituent deux éventualités indépendantes l'une de l'autre, on pourra être moins sévère dans la définition de chaque domaine restreint.

Exemple : si, dans le fût précédent, on s'estreint à ne mettre qu'une masse de produit fissile inférieure à la masse minimum critique obtenue à la concentration pessimiste, un accident possible serait alors la conséquence d'un double chargement d'une part et d'une inondation d'autre part. Pour avoir ici le même degré de sécurité que dans le cas précédent, il n'est plus nécessaire d'avoir un fût étanche.

— Remarquons que la réflexion par l'eau, qui constitue d'ailleurs une limite du domaine de variation du paramètre réflexion, ne peut être considérée comme une éventualité

dans l'application du principe, une réflexion par le personnel ou par des matériaux de structure ne pouvant constituer un événement improbable.

IV.2. Coefficient de sécurité

Nous avons exposé dans le tome précédent les critères qui doivent nous guider dans le choix des valeurs du coefficient de sécurité. Nous donnerons ici les valeurs du coefficient de sécurité correspondant aux incertitudes de calculs et aux effets de l'hétérogénéité de type C₂. Les incertitudes dues aux calculs sont globalement évaluées à 15 % sur les déterminations de masse, donc de volumes critiques, en fonction de la concentration : elles sont également évaluées à 15 % sur les masses critiques par unité de hauteur, pour un cylindre et par unité de surface pour une plaque. Elles sont aussi de 15 % pour la détermination de la concentration critique limite (en milieu infini). Les effets d'hétérogénéité continue sont de 10 % pour la géométrie et de 15 % sur la masse, ce qui donne finalement les valeurs suivantes pour les coefficients de sécurité.

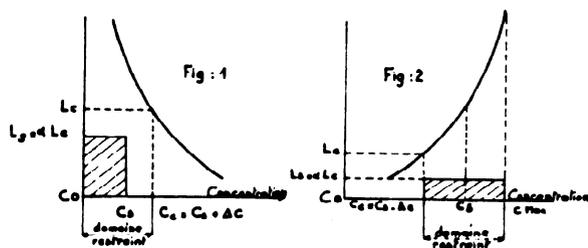
	Masse	Volume	Dia- mètre cylindre	Epais- seur plaque	Concen- tration
Incertitudes sur les calculs	15 %	15 %	1/2 × 15 %	15 %	15 %
Effet d'hétérogénéité (type C ₂)	↓ 15 %	↓ 10 %	↓ 10 %	↓ 10 %	
α	0,7	0,75	0,85	0,75	0,85
à utiliser s'il y a des hétérogénéités continues possibles	↓	↓	↓	↓	↓
α _{MAX}	0,85	0,85	0,9	0,85	
à utiliser s'il n'y a pas d'hétérogénéités possibles					

Il est toujours conseillé d'utiliser les valeurs de α qui tiennent compte des effets d'hétérogénéité de type C₂. Cependant pour les milieux homogènes qu'il est impossible, par leur nature même, de rendre hétérogènes, on pourra alors utiliser les valeurs α_{MAX} du coefficient de sécurité.

Rappelons que ces valeurs du coefficient de sécurité sont à modifier dans chaque cas pour tenir compte, soit des erreurs opérationnelles, soit des erreurs de construction (voir tome I, chapitre III). En particulier, dans le cas de la sécurité par la masse, si un double chargement peut résulter d'une seule éventualité, on utilisera un coefficient de sécurité de 0,43.

Dans le cas de la concentration, la valeur du coefficient de sécurité qui figure dans le tableau précédent ne concerne que les unités en sécurité totale par la concentration. En ce qui concerne la sécurité limitée masse ou géométrie et concentration, rappelons que l'on applique le coefficient de sécurité aux valeurs critiques de référence des paramètres masse ou géométrie, en ayant soin de définir le domaine restreint de concentration, qui, compte tenu des incertitudes

des mesures, donne les valeurs critiques les plus pessimistes. Supposons que les valeurs critiques du paramètre L (masse ou géométrie) en fonction de la concentration soient données par l'une des courbes des figures 1 ou 2 ci-dessous :



Dans le cas de la figure 1, la limite pratique de concentration étant C_p (limite maximum connue à ΔC près), le domaine restreint de concentration sera limité à $C_c = C_p + \Delta C$, la valeur critique de référence du paramètre L sera L_c et le domaine restreint du paramètre L sera limité à la valeur $L_p = \alpha L_c$.

Dans le cas de la figure 2, la limite pratique de concentration étant C_p (cette fois limite minimum connue à ΔC près), le domaine restreint de concentration sera limité à $C_c = C_p - \Delta C$, la valeur critique de référence sera L_c et le domaine restreint du paramètre L sera limité à la valeur $L_c = \alpha L_p$.

Dans les deux cas, α sera le coefficient de sécurité se rapportant au paramètre L et qui doit tenir compte des incertitudes de calculs, des effets d'hétérogénéité et, selon la nature de L, des erreurs de mesure ou de construction (voir tome I).

V. RÉFÉRENCE DES COURBES DE NORMES

On s'est efforcé de donner aux courbes que l'on trouvera au tome III, un numéro de référence qui suffit à les désigner complètement.

Le premier symbole sera U ou Pu et désignera des courbes relatives soit à l'uranium, soit au plutonium.

Le deuxième symbole sera un chiffre inférieur ou égal à 100 mis entre parenthèses et désignera l'enrichissement en ^{235}U ou ^{239}Pu .

Le troisième symbole sera soit la lettre R, soit la lettre N et indiquera si la courbe considérée est valable pour une unité avec ou sans réflecteur.

Enfin le dernier symbole sera une^e des lettres suivantes : M, V, D, E, C et indiquera si la courbe considérée donne des normes de Masse, de Volume, de Diamètre de cylindre de hauteur infinie, d'Épaisseur de plaques dont les deux autres dimensions seraient infinies, ou de Concentration.

Lorsque la référence d'une courbe comporte un "R" (Réflecteur d'eau), la norme donnée est automatiquement une norme critique. Au contraire, lorsque le numéro de référence d'une courbe comportera un N (sans réflecteur), la norme correspondante est valable pour une certaine valeur de K_{eff} inférieure à 1, et qui sera spécifiée sur la courbe. On pourra trouver sur un même graphique des courbes correspondant à plusieurs valeurs de K_{eff} dont on verra plus loin l'utilisation.

Ainsi une courbe portant la référence U (30) R M, donne des masses critiques réfléchies par de l'eau pour de l'uranium enrichi à 30 % en ^{235}U .

Une courbe portant la référence Pu (98) ND donne des diamètres de cylindres de hauteur infinie, sans réflecteur pour du plutonium contenant 98 % de ^{239}Pu et 2 % de ^{241}Pu et correspondant à une valeur de K_{eff} spécifiée sur cette courbe.

Lorsque l'enrichissement et la parenthèse ne figurent pas dans la référence d'une courbe, cette courbe donne des valeurs minima critiques en fonction de l'enrichissement.

Exemple. — U R M : masses critiques minima de sphères d'uranium réfléchies en fonction de l'enrichissement.

Enfin les courbes de dilution standard portent respectivement pour l'uranium et le plutonium les références Ude et Puds.

CHAPITRE II

RÈGLES SIMPLES DE SÉCURITÉ

Nous allons étudier dans ce chapitre l'utilisation pratique des règles de sécurité s'appliquant à des systèmes simples :

Nous considérerons successivement le cas d'unités effectivement isolées, contrôlées par un seul paramètre (sécurité totale), ainsi que le cas d'un petit groupe de ces unités en interaction ; nous envisagerons ensuite le cas d'une unité effectivement isolée, contrôlée par plusieurs paramètres principaux (sécurité limitée) ; une étude plus générale de ces problèmes pourra être abordée directement à l'aide des chapitres III et IV. En ce qui concerne les problèmes d'interaction entre des unités en sécurité limitée, il sera nécessaire de se reporter à ces chapitres.

I. SÉCURITÉ TOTALE D'UNITÉS EFFECTIVEMENT ISOLÉES

I.1. Sécurité par la géométrie

Le tableau (G I) donne, pour différents enrichissements en ^{235}U , les valeurs critiques minima de volumes, de diamètres de cylindres infinis et d'épaisseurs de plaques infinies. La réflexion est fixée à sa valeur pessimiste (réflecteur infini d'eau). Les colonnes Vcr, Dcr et Ecr correspondent respectivement aux volumes, diamètres et épaisseurs critiques.

Lorsqu'il s'avérera nécessaire d'utiliser des normes relatives à des enrichissements intermédiaires, on pourra se référer aux courbes URV, URD et URE (branches homogènes).

Le cas du plutonium est tout à fait analogue, notons toutefois que seules figurent au tableau (G I) les normes correspondant à du plutonium à 100 % de ^{239}Pu . Il est en effet habituel de négliger l'effet d'empoisonnement dû au ^{240}Pu qui intervient alors comme facteur de sécurité supplémentaire. Pour certaines études particulières, où l'on pourra garantir une teneur minimum en ^{239}Pu , il sera cependant possible de se référer aux courbes PuRV, PuRD et PuRE.

On trouvera également dans ce tableau des valeurs sûres de ces mêmes paramètres, correspondant aux coefficients de sécurité classiques définis au chapitre I. L'utilisateur a cependant la possibilité de choisir un autre coefficient de sécurité lui paraissant plus justifié et néanmoins compatible avec les considérations du paragraphe IV (chapitre I).

Toutes les valeurs du tableau G I ne s'appliquent qu'aux sels d'uranium ou de plutonium dont les courbes de dilution sont inférieures ou confondues avec les branches sels et solutions des courbes Uds ou Puds (c'est-à-dire se trouvant dans, ou à la limite des zones I et III).

Dans le cas de composés à forte densité, les valeurs à prendre en considération sont celles du tableau (G II) (normes métal).

Le cas de milieux hétérogènes donne lieu, pour l'uranium enrichi à moins de 10 %, à des limitations plus sévères qui apparaissent au tableau (G III), déduit des courbes URV, URD ou URE (branches hétérogènes).

I.2. Sécurité par la masse

Le tableau (M I) donne, pour différents enrichissements en ^{235}U et pour le plutonium à 100 % de ^{239}Pu , les valeurs minima de la masse critique, compte tenu d'un réflecteur infini d'eau (colonne Mcr). Ces valeurs ne s'appliquent qu'aux composés dont les courbes de dilution sont inférieures ou confondues avec les branches sels et solutions des courbes Uds ou Puds (Zones I et III).

Pour des enrichissements intermédiaires en ^{235}U , on se reportera à la courbe URM (branche homogène).

L'influence du ^{240}Pu apparaît sur la courbe PuRM dont l'utilisation est soumise aux mêmes restrictions que les courbes PuRV, etc.

On trouve aussi dans ce tableau deux séries de valeurs sûres M_{s1} et M_{s2} correspondant respectivement aux coefficients de sécurité 0,43 et 0,7 (avec ou sans possibilité de double chargement).

Le tableau (M II) présente les normes de masse relatives aux milieux hétérogènes enrichis à moins de 5 %.

I.3. Sécurité par la concentration

Le tableau C I présente, en fonction de l'enrichissement, les valeurs critiques et les valeurs sûres de la concentration pour un milieu infini.

Il est rappelé que les valeurs "sûres" indiquées ne tiennent compte que des incertitudes dans l'évaluation de la concentration critique limite. Elles s'appliquent normalement à des milieux homogènes et l'utilisateur devra encore réduire ces valeurs sûres par un facteur dépendant de la fréquence et de la précision des contrôles effectués.

Dans le cas d'un milieu hétérogène continu, la concentration en aucun point du milieu ne doit dépasser cette valeur sûre réduite ; il sera donc nécessaire de se méfier des phénomènes de précipitation accidentelle, dépôts, etc.

II. SÉCURITÉ D'UN ENSEMBLE D'UNITÉS CONTROLÉES CHACUNE PAR UN SEUL PARAMÈTRE

II.1. Le paramètre de contrôle est la masse ou la géométrie

II.1.1. Détermination des angles solides limites et critères de sécurité

La sécurité de l'ensemble est alors mesurée par l'application du critère de l'angle solide limite (tome I, chapitre II). Nous distinguerons deux cas :

1° Le coefficient de sécurité adopté est celui qui conduit aux valeurs sûres des tableaux (G) ou (M) : l'angle solide limite est alors donné par les colonnes Ω_1 (Sd)* de ces tableaux. Pour chaque élément "i" du système, on calculera l'angle solide total maximum sous lequel il est vu par l'ensemble des autres éléments "j", en se référant à l'annexe I :

$$\Omega_{MAXi} = \sum_j \Omega_{j \rightarrow i}^{MAX}$$

La sécurité de l'ensemble de ces unités est assurée si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\Omega_{MAXi} < \Omega_1^i \text{ (Sd)}$$

quel que soit "i".

2° Le coefficient de sécurité est différent des coefficients habituels (mais reste dans les limites imposées au chapitre I).

Dans ce cas on sera amené à choisir une limite sûre L_s différente de celle des tableaux (G) ou (M) ; on cherchera dans ces tableaux la valeur critique nue L_{cn} correspondante, et on calculera l'angle solide limite de l'unité par la formule :

$$\Omega_1 \text{ (Sd)} = 2 \pi \left[1 - \left(\frac{L_s}{L_{cn}} \right)^\alpha \right]$$

où L désigne le paramètre de contrôle adopté (géométrie ou masse) et α est une constante :

$$\alpha = \frac{1}{3} \text{ pour la masse et le volume}$$

$$\alpha = 1 \text{ pour le diamètre du cylindre et l'épaisseur de la plaque}$$

Par exemple dans le cas d'une sécurité par la masse

$$\Omega_1 \text{ (Sd)} = 2 \pi \left[1 - \left(\frac{M_s}{M_{cn}} \right)^{1/3} \right]$$

Ω_1 étant ainsi déterminé, il reste à vérifier comme ci-dessus que $\Omega_{MAXi} < \Omega_1^i \text{ (Sd)}$ quel que soit "i".

II.1.2. Calcul des angles solides réels

Cas d'une sécurité géométrique :

Le calcul se fait conformément aux méthodes développées dans l'annexe I.

* Exceptionnellement dans ce chapitre, l'angle solide limite est donné en stéradians. Il est relié à l'angle solide limite habituel Ω_1 par la relation : $\Omega_1 \text{ (Sd)} = 4 \pi \Omega_1$.

Cas d'une sécurité par la masse :

Lorsque la masse de l'unité sera entièrement contenue dans un ou plusieurs récipients de forme bien déterminée, on pourra toujours calculer l'angle solide vers ce récipient (ou la somme des angles solides vers les différents récipients). Cependant le procédé peut s'avérer trop pessimiste, en particulier lorsque la masse se trouve concentrée au fond du récipient (après précipitation par exemple). Dans ce cas, comme dans le cas où la forme de l'unité est mal déterminée, on assimile alors l'unité à une sphère dont le volume est donné par la formule :

$$V = 0,32 M (e + 1)$$

V = volume de la sphère en cm^3

M = limite de masse en g d'uranium total (ou de plutonium total)

e = enrichissement en ^{235}U (ou ^{239}Pu) exprimé en %

On peut utiliser aussi la formule suivante, qui donne le diamètre de la sphère en cm :

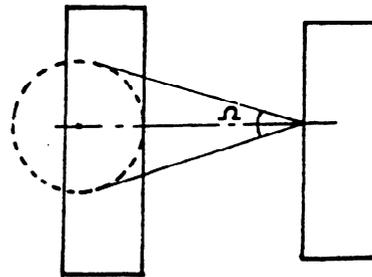
$$D = 0,85 \sqrt[3]{M (e + 1)}$$

Exemple :

Soit une limite de masse de 700 g d'uranium total enrichi à 93,5 %.

Le volume de la sphère sera de $0,32 \cdot 700 \cdot 94,5 = 21\,200 \text{ cm}^3$ et son diamètre de $0,85 \sqrt[3]{700 \cdot 94,5} = 34,4 \text{ cm}$.

Pour terminer le calcul, il convient maintenant de placer cette sphère dans le récipient qui contient les 700 g d'uranium à la position qui la rapproche au maximum de l'unité d'où l'on calcule l'angle solide, conformément au schéma ci-dessous :



II.1.3. Influence d'un double chargement sur l'interaction

Lorsqu'on aura des unités contrôlées par la masse et que des doubles chargements seront à craindre, il conviendra de vérifier le critère de l'angle solide limite, en admettant que tous les doubles chargements ont effectivement eu lieu.

II.2. Certaines unités sont contrôlées par la concentration

Considérons tout d'abord le cas limite où toutes les unités sont en sécurité totale par la concentration. Dans cette hypothèse, la concentration de chaque unité étant inférieure à la concentration critique limite ($k_{\infty} < 1$), la sécurité de l'ensemble est automatiquement assurée sans autre calcul.

Le cas d'un système mixte où certaines unités sont contrôlées par la concentration et d'autres par la masse ou la géométrie est plus complexe, aussi nous limiterons-nous dans ce chapitre aux considérations suivantes : lorsque les unités du système, dont le contrôle est basé sur la masse ou la géométrie sont de formes cylindrique ou sphérique (ou peuvent s'y ramener), on pourra négliger dans les calculs d'interaction toutes les unités de k_{∞} inférieur à 1, qui se trouvent à une distance au moins égale à huit fois le diamètre du cylindre ou quatre fois le diamètre de la sphère la plus proche. L'influence de ces unités contrôlées par la concentration sur les unités de k_{∞} supérieur à 1 est en effet dans ce cas suffisamment prise en compte par l'hypothèse de la semi-réflexion.

Pour tous les cas d'interaction n'entrant pas dans cette catégorie on pourra se référer au chapitre III, § IV.

III. SÉCURITÉ LIMITÉE D'UNE UNITÉ EFFECTIVEMENT ISOLÉE

La notion de sécurité limitée a été définie au tome I, chapitre III. Dans la pratique, on utilise le plus souvent les couples de paramètres suivants :

- masse-concentration
- géométrie (volume, diamètre, épaisseur)-concentration.

On se reportera aux normes critiques réfléchies X (e) RP relatives à l'élément X, à l'enrichissement (e) et au paramètre P ; on se référera au chapitre I, § IV pour déterminer les marges de sécurité à adopter dans le cas d'un contrôle multiple.

Nous raisonnerons ici sur un exemple précis : une plaque mince supposée infinie dans les deux autres directions, en sécurité limitée par la concentration.

La concentration maximum de la solution d'uranium (93,5 %) contenue dans cette plaque est, en marche normale, inférieure à 80 g U₁/l ; la fréquence et la précision des analyses effectuées sur cette solution permettent de connaître à tout instant la concentration dans la plaque, avec une erreur maximum de 20 % ; on se propose de déterminer dans ces conditions l'épaisseur maximum de la plaque, compatible avec sa sécurité, sachant d'autre part que le constructeur s'accorde une tolérance de ± 5 mm sur cette épaisseur.

Reportons-nous à la courbe U (93,5) RE : pour une concentration de $80 + (80 \times 0,20) = 96$ g/l, l'épaisseur critique est de 6,5 cm. Afin de tenir compte des incertitudes sur cette valeur critique ainsi que des effets possibles d'hétérogénéité de type C₂, on retiendra la valeur de $6,5 \times 0,75 = 4,87$ cm, valeur à laquelle il faut encore retrancher les tolérances de construction. On adoptera donc finalement $E = 4,87 - 0,5 \simeq 4,3$ cm.

Si l'on peut s'affranchir de toute existence (même accidentelle) de gradients de concentration, on pourra adopter la valeur :

$$E = (6,5 \times 0,85) - 0,5 \simeq 5 \text{ cm.}$$

Bien entendu ces valeurs impliquent que toute possibilité de précipitation est exclue ; dans le cas contraire il faudrait utiliser l'épaisseur critique minimum et le coefficient de sécurité qui tient compte des effets d'hétérogénéité continue, soit :

$$E = (4,5 \times 0,75) - 0,5 \simeq 2,8 \text{ cm.}$$

CHAPITRE III

RÈGLES GÉNÉRALES DE SÉCURITÉ

L'étude de la sécurité d'un seul appareil isolé a été traitée au chapitre II. Nous n'envisagerons ici que les assemblages d'appareils en interaction.

Le chapitre II du tome I a montré comment on pouvait vérifier la sécurité de plusieurs unités en interaction (séparées les unes des autres par une certaine distance minimum), à l'aide de leurs K_{eff} nus. On ne peut pour autant négliger l'éventualité (en général, non exclue formellement) d'une inondation qui isolerait les unités les unes des autres, en les entourant d'un épais réflecteur d'eau ; c'est pourquoi, il est également nécessaire de vérifier la sécurité de chaque unité considérée comme isolée, mais avec un épais réflecteur d'eau ; pour cela, il faudra s'assurer de la valeur de leur K_{eff} réfléchi. Le chapitre III du tome I a montré comment des restrictions permettaient de s'assurer des limites supérieures pour leurs K_{eff} nu et réfléchi.

Nous insistons sur l'importance qu'il y a à avoir, d'une part, les K_{eff} des unités réfléchies inférieurs à 1, et d'autre part, les K_{eff} de ces mêmes unités, supposées sans réflecteur, suffisamment inférieurs à 1 pour que l'augmentation de réactivité, apportée par les interactions mutuelles, ne rende pas les K_{eff} supérieurs à 1. La première condition sera vérifiée par un ensemble de critères individuels, la seconde par un ensemble de critères collectifs.

On ne peut établir de relation directe entre la sécurité des unités isolées et réfléchies, et la sécurité de l'ensemble des unités sans ou avec semi-réflecteur. Il faut bien voir qu'une unité peut être sous-critique avec un épais réflecteur d'eau et critique lorsqu'elle est en interaction avec d'autres unités ; inversement, elle peut être sous-critique en interaction et critique lorsqu'elle est réfléchie.

Pour aborder l'étude de la sécurité d'une installation, on aura intérêt à classer, si possible, les unités qui la composent en plusieurs zones, chacune de ces zones satisfaisant, vis-à-vis des autres, aux règles d'isolement exposées au chapitre I. L'étude pourra alors être effectuée de façon indépendante dans chaque zone.

Il conviendra d'autre part de déterminer pour chaque unité, les zones de densité (voir chapitre I, § II), les paramètres de contrôle et leurs domaines de variation.

I. MÉTHODE GÉNÉRALE

Une zone est sûre si chacune de ses unités satisfait aux critères individuels, et si l'ensemble de ses unités satisfait à l'ensemble des critères collectifs.

I.1. Critères individuels

Ces critères s'appliquent à la sécurité de l'unité considérée comme isolée et réfléchi ; ce problème est donc

identique à celui de l'unité effectivement isolée, traité au chapitre II (§ I et III).

Rappelons pour mémoire qu'on utilise les normes critiques réfléchies (série R) auxquelles on applique un certain coefficient de sécurité (voir chapitre I, § IV).

I.2. Critères collectifs

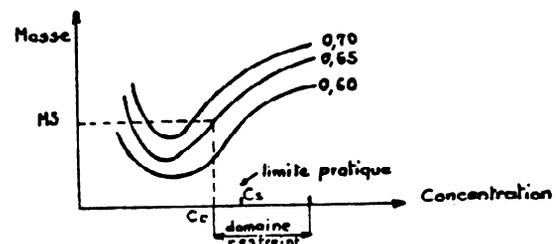
Ces critères s'appliquent à la sécurité des unités en interaction. Leur vérification nécessite plusieurs étapes.

I.2.1. Recherche du K_{eff} nu de chaque unité

On utilise les normes sous-critiques nues (série N) qui sont des réseaux de courbes à K_{eff} constant.

Connaissant le ou les paramètres de contrôle agissant sur l'unité, on évaluera donc la valeur maximum prise par le K_{eff} nu, compte tenu des domaines restreints de variation imposés aux paramètres de contrôle.

Dans l'exemple ci-dessous, si M_s est la masse sûre compte tenu de la valeur pessimiste de la concentration C_s , on adoptera 0,65 pour le K_{eff} nu.



Si la concentration est mesurée à ΔC près, la limite pratique doit être au moins $C_s = C_c + \Delta C$.

I.2.2. Calcul de l'angle solide limite de chaque unité

Connaissant la limite supérieure K_n du K_{eff} nu de chaque unité, on en déduit son angle solide limite par la formule générale :

$$\Omega_1 = \frac{1 - K_n}{2} \quad (1)$$

Ω_1 ne s'exprime pas en stéradians car il est équivalent à une probabilité.

I.2.3. Calcul des angles solides réels entre les unités

Il s'agit de déterminer, pour chaque couple d'unités (i, j) l'angle solide maximum sous lequel on voit l'unité i à partir d'un point de la surface de l'unité j.

Cet angle est appelé $\Omega_{MAX}^{i \rightarrow j}$, exprimé en stéradians.

Pour évaluer ces angles solides, on utilisera les procédés indiqués en annexe I.

Il faut de plus évaluer l'angle solide total sous lequel une unité i est vue de toutes les autres, appelé Ω_{MAX}^i , exprimé en stéradians.

$$\Omega_{MAX}^i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} \quad (2)$$

Cas des - ombres -

Si une ou plusieurs unités, ou même un écran neutro-nique (voir chapitre I, § 1) forment un écran total entre l'unité i et l'unité j, il n'est pas nécessaire de déterminer les angles $\Omega_{MAX}^{i \rightarrow j}$ et $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}$, car on n'en tiendra pas compte dans le calcul de Ω_{MAX}^i et Ω_{MAX}^j .

I.2.4. Énoncé des critères collectifs

Première règle :

L'écartement bord à bord entre les unités doit être au moins égal à 30 cm.

Si quelques unités font exception à cette règle, on devra leur appliquer une méthode particulière, exposée en annexe III.

Deuxième règle :

L'angle solide total (en stéradians) sous lequel est vue chaque unité à partir de toutes les autres, divisé par 4π , doit être au plus égal à son angle solide limite.

$$\frac{\Omega_{MAX}^i}{4\pi} < \Omega_i \quad (3) \text{ quel que soit } i$$

$\Omega_{fi} = \frac{\Omega_{MAX}^i}{4\pi}$ est appelé angle solide fractionnel total, et la règle peut aussi s'énoncer :

L'angle solide fractionnel total sous lequel est vue chaque unité à partir de toutes les autres doit être au plus égal à son angle solide limite.

Telle est la forme usuelle de la méthode de l'angle solide, qui doit être utilisée en premier lieu ; nous verrons au § II les précautions à prendre dans l'application de cette méthode ; le § III montrera comment, dans certains cas, on peut utiliser des variantes de la méthode de l'angle solide, qui donnent des critères de sécurité moins sévères.

II. RESTRICTIONS DE LA MÉTHODE DE L'ANGLE SOLIDE

II.1. Effets des semi-réflecteurs et des réflecteurs collectifs

L'utilisation de la méthode de l'angle solide est dans presque tous les cas très pessimiste. L'hypothèse de la semi réflexion n'est pas très réaliste puisqu'elle consiste à supposer autour des unités un demi-réflecteur que l'on déplacerait successivement du côté opposé à chaque unité que l'on regarde.

Cependant le critère de l'angle solide limite, même avec les corrections de semi réflexion, peut être en défaut dans les cas de réflexion partielle collective (voir chapitre II, tome I).

La figure III.1 montre la différence qui existe entre deux récipients i et j en semi réflexion et les mêmes récipients en réflexion collective.

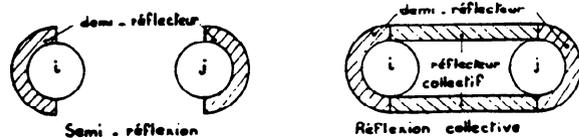


Fig. III.1

En fait l'influence de ces différents réflecteurs décroît très vite lorsqu'on les écarte des récipients.

En pratique, un réflecteur collectif pourra être négligé s'il est à une distance bord à bord de chaque unité supérieure à L, L dépendant des unités.

Forme de l'unité	Sphère de diamètre D	Cylindre de diamètre D	Plaque
L	2 D	4 D	$\sqrt{5 S^*}$

* S est la surface de la plaque en projection orthogonale sur le plan du réflecteur.

Ces réflecteurs collectifs seront en pratique les sols et les murs de béton.

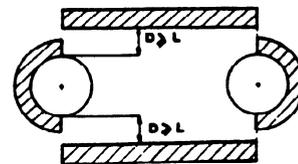
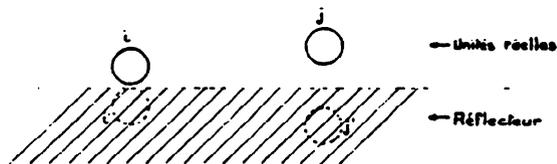


Fig. III.2

Si on est obligé de maintenir des unités sur le sol ou à proximité d'un mur suffisamment réfléchissant, il faudra en tenir compte dans l'évaluation des angles solides réels (§ 1.2.3), par exemple en introduisant les unités « images » comme le montre la figure III.3.



$$\Omega_{MAX}^{i \rightarrow j} \text{ sera remplacé par : } \Omega_{MAX}^{i \rightarrow j} + \beta \cdot \Omega_{MAX}^{i \rightarrow i}$$

$$\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} \text{ sera remplacé par : } \Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} + \beta \cdot \Omega_{MAX}^{j \rightarrow j}$$

β est un coefficient de réflexion dépendant du réflecteur.

Matériau	β
Eau	0,6
Béton	0,75

Autre méthode

Pour tenir compte de l'influence de ces réflecteurs collectifs, on peut aussi appliquer la méthode de l'angle solide en utilisant le K_{eff} réfléchi au lieu du K_{eff} semi-réfléchi, c'est-à-dire prendre pour l'angle solide limite des unités intéressées (§ 1.2.2) la valeur :

$$\Omega_i = 1 - K_r \quad (1')$$

Pour l'évaluation du K_{eff} réfléchi K_r , on se reportera à l'annexe II.

II.2. Effets des matériaux de structure

Des matériaux modérateurs, placés entre des unités faiblement modérées, en épaisseur insuffisante pour former écran mais suffisante pour modifier le spectre neutronique, risquent de mettre la méthode de l'angle solide en défaut. Aussi devra-t-on dans ce cas réduire au minimum les quantités de tels matériaux. Les boîtes à gants notamment devront être rangées avec soin, on veillera à ne pas y laisser trainer de sac en polyvinyle ou autres déchets de matière plastique. On peut citer aussi l'éventualité d'accumulation de neige entre les unités d'un stockage en plein air.

Pour tenir compte des matériaux de structure, on peut adapter la méthode de l'angle solide de la manière suivante :

On ramène d'abord l'épaisseur réelle des matériaux à une épaisseur équivalente d'eau :

$$E_{H_2O} = \sum_i E_{m_i} \cdot \frac{d_{m_i}}{d_{H_2O}} \quad \text{ou} \quad \frac{d_{m_i}}{d_{H_2O}}$$

est le rapport des densités en hydrogène du matériau i et de l'eau.

Si l'épaisseur équivalente du ou des matériaux situés entre deux unités i et j peut varier de façon mal définie au-dessous de 6 cm environ, on pourra appliquer la méthode de l'angle solide en multipliant les angles $\Omega^{i \rightarrow j}$ et $\Omega^{j \rightarrow i}$ par le facteur 1,45.

Si l'épaisseur équivalente du matériau est mieux définie et ne risque pas de varier accidentellement, on pourra multiplier ces angles par un facteur γ , donné dans le tableau ci-dessous :

Epaisseur équivalente en cm	0	0,5	1	2	2,5	3	4	5	5,75
γ	1	1,15	1,25	1,4	1,45	1,4	1,27	1,12	1

Si l'épaisseur équivalente est certainement au-dessus de 5,75 cm, on peut prendre $\gamma = 1$; on verra en Annexe III une méthode plus précise.

III. ÉLARGISSEMENTS DE LA MÉTHODE DE L'ANGLE SOLIDE.

Les indications suivantes se réfèrent au chapitre II du tome I.

III.1. Utilisation de l'angle solide moyen

La méthode de l'angle solide repose théoriquement sur l'utilisation de l'angle solide moyen entre les unités :

$$\Omega_{i \rightarrow j} = \frac{\int_{S_j} \Omega(P) dS}{\int_{S_j} dS}$$

S_j désignant la surface de l'unité j .

Mais elle repose aussi sur l'hypothèse de l'uniformité de la population des neutrons à la surface de l'unité : il est donc normal dans le cas général d'utiliser l'angle solide maximum au lieu de l'angle solide moyen (§ 1.2.3) ce qui simplifie par ailleurs les calculs.

Pour certains couples d'unités, si les critères classiques du § 1.2.3. échouent, et si, d'autre part, l'hypothèse de répartition uniforme ne risque pas d'être trop optimiste, on pourra utiliser $\bar{\Omega}_{j \rightarrow i}$.

Dans la pratique, ceci ne pourra se faire avec sécurité que :

- pour deux sphères ;
- pour deux cylindres d'axes parallèles ayant approximativement mêmes plans de base et même hauteur ;
- pour deux plaques formant approximativement les deux faces opposées d'un parallélépipède rectangle.

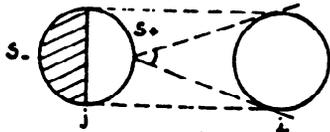
On trouvera dans l'annexe I certains abaques concernant les angles solides moyens.

Il conviendra de diviser $\bar{\Omega}_{j \rightarrow i}$ en stéradians par 2π (ce qui donne l'angle solide fractionnel moyen $\bar{\Omega}_{f \rightarrow i}$) avant de le comparer à Ω_i^1 .

III.2. Utilisation du facteur $\frac{S_0}{S}$

Une première approximation de l'angle solide moyen $\bar{\Omega}_{j \rightarrow i}$ est l'angle solide :

$$\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} \left(\frac{S_0}{S} \right)_{j \rightarrow i}$$



S_0 désigne la portion de la surface S de j , visible de l'unité i .

Dans le cas général, le rapport $\frac{S_0}{S}$ oscille autour de 1/2 ; c'est pourquoi dans la formule (3) du § 1.2.4, il est assimilé à cette valeur.

Dans certains cas, il peut être le plus souvent inférieur à 1/2 ; il est alors intéressant de l'évaluer systématiquement pour chaque couple d'unités (i, j) ; citons le cas par exemple d'un assemblage de cylindres de même diamètre et d'axes parallèles ayant même plan de base et même hauteur S_0 (est inférieur à 1/2 puisque les bases ne se voient pas).

Il conviendra de diviser $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} \left(\frac{S_0}{S} \right)_{j \rightarrow i}$ en stéradians par 2π avant de le comparer à Ω_i^1 .

III.3. Utilisation des probabilités de fuite

Dans l'application de la méthode de l'angle solide, on peut théoriquement pondérer les angles solides $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}$ par la probabilité de fuite $(1 - P_j)$ de l'unité j .

Si les critères classiques du § 1.2.3. échouent, on pourra, pour certains couples d'unités, utiliser cette pondération ; des indications, permettant de calculer cette probabilité de fuite, sont données en Annexe II.

Il conviendra de diviser l'angle solide $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} (1 - P_j)$ en stéradians par 4π avant de le comparer à Ω_i^1 .

Cas particulier

Dans ce qui précède, P_j est la probabilité antifuite (définie au chapitre I du tome I) et $(1 - P_j)$ la probabilité complémentaire de fuite par n'importe quel point de la surface de j .

Dans certains cas, il pourra être avantageux de faire intervenir la probabilité de fuite par une partie seulement de la surface de j .

Reprenant l'exemple précédent des cylindres parallèles ayant mêmes plans de base et même hauteur, on pourrait aussi le traiter en pondérant $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}$ par la probabilité de fuite par les surfaces latérales des unités j , qui peut être évaluée facilement pour ces cylindres (voir Annexe II) ; il faudrait ensuite diviser par 4π pour comparer à Ω_i^1 .

III.4. Conclusion

Pour calculer l'angle solide fractionnel total sous lequel l'unité i est vue des autres unités, on pourra, soit utiliser la formule classique, soit utiliser les différentes variantes III.1, III.2, III.3, ainsi que certaines de leurs combinaisons ; les critères collectifs (3), dans leur forme la plus générale, deviennent alors :

$$\Omega_{f \rightarrow i}^1 = \sum_j \frac{\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}}{4\pi} + \sum_k \frac{\bar{\Omega}^{k \rightarrow i}}{2\pi} + \sum_r \frac{\Omega_{MAX}^{r \rightarrow i}}{2\pi} \left(\frac{S_0}{S} \right)_{r \rightarrow i} + \sum_s \frac{\Omega_{MAX}^{s \rightarrow i}}{4\pi} (1 - P_s) + \sum_t \frac{\Omega_{MAX}^{t \rightarrow i}}{2\pi} \left(\frac{S_0}{S} \right)_{t \rightarrow i} (1 - P_t) + \sum_v \frac{\bar{\Omega}^{v \rightarrow i}}{2\pi} (1 - P_v) < \Omega_i^1$$

quel que soit i .

($j, k, p, q, r, s, v \neq i$)

où les unités d'indices j utilisent l'angle solide maximum

- • k • l'angle solide moyen
- • p • le facteur $\frac{S_0}{S}$
- • q • la probabilité de fuite
- • r • l'angle solide moyen et la probabilité de fuite
- • s • le facteur $\frac{S_0}{S}$ et la probabilité de fuite

III.5. Utilisation d'un programme de calcul-machine

Si, malgré l'utilisation de ces différents procédés, on n'arrive pas à vérifier, pour certaines unités ou une partie de l'installation, les critères collectifs, on pourra utiliser avec le concours de spécialistes en criticité un programme en vigueur à Saclay qui permet de calculer d'une façon plus précise le K_{eff} d'un ensemble d'unités.

Les spécifications de ce programme sont données en annexe I.

Il se pourra néanmoins qu'on soit obligé d'avoir recours à des écrans neutroniques pour isoler des unités trop réactives.

IV. RÈGLES PARTICULIÈRES D'APPLICATION

IV.1. Unités de forme non définie contrôlées par le volume

Pour calculer les angles solides réels vers ces unités i, ainsi que leur K effectif, on les assimilera à des sphères de même volume; pour calculer ensuite les angles tels que $\Omega_{MAX}^{j \rightarrow i}$ on placera la sphère représentant l'unité i à la position la plus proche possible de l'unité j, et néanmoins compatible avec l'emplacement réel de l'unité i.

IV.2. Unités contrôlées par la masse

IV.2.1. Calcul des angles solides limites

On a vu au § I.2.1 que, pour évaluer le K_{eff} nu de l'unité, on se fonde sur la limite sûre M_0 et un éventuel domaine restreint de concentration.

Une exception doit être faite pour les unités où le double chargement est considéré comme une éventualité non impossible.

En effet, pour ces unités, on a choisi obligatoirement une valeur sûre M_0 au plus égale à $0,43 M_0$ (où M_0 est la valeur critique réfléchie, compte tenu d'un éventuel domaine restreint de concentration).

Il est important de vérifier que l'interaction des unités reste sûre même si le double chargement a eu lieu dans une quelconque des unités en limitation de masse; du point

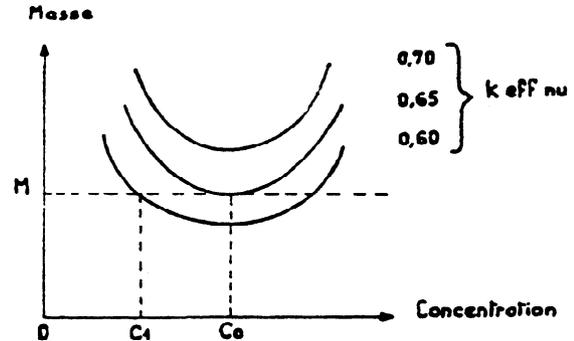
de vue pratique, ceci revient à attribuer à chacune de ces unités le K_{eff} nu correspondant à la masse $2 M_0$, soit $0,86 M_0$ dans la plupart des cas.

L'angle solide limite se déduit alors par la formule habituelle.

IV.2.2. Calcul des angles solides réels

Si l'unité est de forme non définie, elle sera aussi assimilée à une sphère; cette sphère sera celle qui donne le K_{eff} nu maximum pour la masse en question, compte tenu d'un éventuel domaine restreint de concentration.

Supposons par exemple la limitation de masse fixée à M ($M = M_0$ ou $2 M_0$ suivant les cas);



en sécurité totale, la sphère qui donne à la masse M le K_{eff} nu maximum a pour rayon

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{M}{c_0}}$$

et l'angle solide limite sera $\Omega_1 = \frac{1 - 0,65}{2} = 0,175$.

Si de plus, la concentration ne peut varier qu'entre 0 et C_1 , la sphère à prendre en considération aura pour rayon

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{M}{c_1}}$$

et l'angle solide limite sera $\Omega_1 = \frac{1 - 0,6}{2} = 0,2$.

On placera ensuite la sphère virtuelle comme il est indiqué au paragraphe IV.1.

Remarque

La même règle peut aussi s'appliquer aux unités de forme définie et contrôlées par la masse, à condition de placer toujours la sphère virtuelle à l'intérieur du récipient réel et au plus près de l'unité qui la regarde, comme il est indiqué plus haut.

IV.3. Unités de forme complexe

On essaiera de ramener chaque partie de telles unités à des formes géométriques simples. L'angle solide sous lequel une unité complexe est vue d'une autre unité est la somme des angles solides sous lesquels sont vues chacune de ses parties. Par contre, la contribution de cette unité complexe à l'angle solide sous lequel une unité simple est vue, doit être calculée à partir du point de l'unité complexe donnant l'angle solide maximum.

Le k_{eff} de telles unités ne peut être évalué d'une façon simple, il faudra la plupart du temps avoir recours à l'aide des spécialistes.

On pourra aussi, pour de telles unités, utiliser une ou plusieurs formes pessimistes globales (voir Annexe III).

Remarque

Si on connaît le K_{∞} du milieu contenu, on pourra obtenir facilement la probabilité antifuite P de l'unité par la formule :

$$P = \frac{K_{eff}}{K_{\infty}}$$

IV.4. Groupements d'unités

On a parfois avantage à considérer comme une seule unité un ensemble d'appareils séparés mais dont on connaît une limite supérieure du K effectif global ; le problème est alors analogue au précédent.

La détermination de ce K_{eff} global pourra être faite en attribuant à l'ensemble une forme pessimiste (Annexe III) ou par une méthode plus élaborée.

Pour les calculs d'angles solides, on décomposera l'unité globale en ses différents constituants comme précédemment.

Le principal avantage de cette méthode est de faire disparaître des calculs les angles solides entre les différents constituants, qui peuvent rendre dans certains cas les critères classiques difficiles à vérifier.

Remarque

De même que précédemment, si le même milieu est contenu dans les différentes unités et qu'on connaisse le K_{∞} de ce milieu, on aura facilement la probabilité

antifuite globale P de l'assemblage par la formule $P = \frac{K_{eff}}{K_{\infty}}$

IV.5. Unités en sécurité totale par la concentration

On appelle ainsi les unités dont le seul contrôle de la concentration garantit qu'elles sont de K_{∞} inférieur à 1.

Le cas le plus fréquent est celui d'unités dont la concentration est suffisamment faible pour être inférieure à la concentration critique limite, telle qu'elle est donnée par les courbes PuRC, et URC. Mais pour les enrichissements inférieurs de l'uranium, pour lesquels le K_{∞} des milieux faiblement modérés est inférieur à 1, on pourra aussi avoir des unités de concentration supérieure à une autre concentration critique limite.

Deux cas peuvent alors se présenter :

1) Toutes les unités de la zone sont en sécurité totale par la concentration

Il est évident, d'après la signification du K_{∞} que la zone sera toujours sûre et, dans ce cas, aucune étude de sécurité en interaction n'est à effectuer.

2) Certaines des unités de la zone ne sont pas en sécurité totale par la concentration

Ces unités seront désignées par la lettre i , et celles de K_{∞} inférieur à 1 par la lettre j .

La règle générale, utilisable dans tous les cas, est de n'appliquer les critères collectifs classiques qu'aux unités i , mais en tenant compte des angles solides sous lesquels elles sont vues des unités j .

Toutefois, cette règle peut subir dans certains cas des assouplissements (on se référera au tableau ci-dessous) :

a) Les unités j situées à une distance bord à bord d'une unité i supérieure à L seront négligées pour cette unité (en effet, à cette distance, elles ne jouent le rôle que d'une fraction faible de réflecteur).

b) De plus, si les autres unités j sont vues de l'unité i sous un angle solide total $\Omega = \sum_{j \neq i} \Omega_{MAX} < \Omega_1$, on pourra également les négliger pour cette unité (elles sont encore assimilables à une fraction limitée de réflecteur).

c) Si l'angle solide Ω est supérieur à Ω_1 , mais inférieur à Ω_2 , on pourra encore négliger ces unités à condition d'utiliser pour le calcul de Ω_1 , le K_{eff} réfléchi de i , c'est-à-dire la formule (1') ; l'angle Ω_2 garantit en effet que les unités j ne constituent pas un réflecteur meilleur qu'un réflecteur total d'eau.

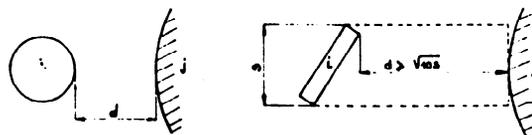
d) Si l'angle solide Ω est supérieur à Ω_2 seule la règle générale est applicable :

- calcul de Ω_1 par la formule (1) habituelle
- calcul de Ω_{MAX} en tenant compte des angles $\Omega_{i \rightarrow j}^{MAX}$

TABLEAU DES LIMITES

Forme de l'unité i	Sphère de $\varnothing D$	Cylindre de $\varnothing D$	Plaque
L	$4 D$	$8 D$	$\sqrt{10 S^*}$
Ω_1 stér	0,2	0,45	0,1
Ω_2 stér	3,14	3,14	3,14

* S désigne la surface de la plaque en projection orthogonale sur le plan tangent à l'unité j .



Rappelons enfin, que dans tous les cas, il est inutile de vérifier les critères collectifs pour les unités j .

IV.6. Unités mobiles

Lorsque dans une zone, une ou plusieurs unités importantes sont mobiles, il faut chercher à les placer en des points de leur chemin donnant la réactivité maximum, et les traiter comme des unités fixes.

La recherche de ces positions peut s'avérer délicate surtout s'il y a simultanément beaucoup d'unités en déplacement ; on s'efforcera cependant de les placer le plus près possible des endroits les plus denses en unités fixes ou des unités les plus réactives (celles pour lesquelles les différences $[\Omega_i - \Omega_{ii}^i]$ sont les plus petites).

CHAPITRE IV

APPLICATION A LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS

Il est du plus haut intérêt de tenir compte des considérations de sécurité nucléaire dès le stade de la conception des installations contenant des matériaux fissiles ; en réalité, il est même souhaitable de mener de pair les études de génie chimique et de sécurité nucléaire ; l'expérience a montré en effet que, dans le cas contraire, les projets sont souvent à remanier.

Ce chapitre propose une méthode permettant d'harmoniser au mieux les études de génie chimique et celles de sécurité nucléaire, en s'appuyant bien entendu sur les considérations des chapitres précédents.

Dans le déroulement habituel des projets de génie chimique, le schéma de principe de l'installation étant arrêté, des études portent sur le détail du procédé et définissent appareil par appareil l'ensemble de l'installation. Les études d'appareillages terminées, il reste à résoudre le problème de l'implantation de ces appareils.

De même, en matière de sécurité nucléaire, on a vu qu'on étudiait d'abord la sécurité de chaque unité séparément, puis celle de l'ensemble des unités réunies, groupées par zones isolées les unes des autres. On est ainsi amené à procéder en plusieurs étapes.

I. DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE CONTRÔLE

I.1. Paramètres de contrôle secondaires

Enrichissement

L'enrichissement maximum des matériaux fissiles contenus dans l'installation est connu par sa raison d'être même ; il est souhaitable d'ailleurs de le contrôler dès la réception des matériaux ; on adoptera donc cette valeur de l'enrichissement (ou toute valeur supérieure) pour le choix des normes utilisées dans la suite.

On pourra dans certains cas diviser l'installation en sous ensembles, certains traitant des enrichissements maxima différents des autres, et appliquer des séries de normes différentes suivant ces enrichissements maxima ; ceci implique dès lors un contrôle rigoureux des mouvements de matières fissiles entre ces sous-ensembles.

Réflexion

En général, l'éventualité d'inondation n'est pas à écarter, et on conserve les hypothèses classiques de réflexion : réflexion totale pour les unités isolées, semi-réflexion pour les unités en interaction.

Si toutefois certains appareils, par leur configuration ou leur situation (appareils de grande hauteur par exemple), ne peuvent absolument pas être inondés, on pourra leur appliquer des normes moins sévères, dites de réflexion nominale (voir complément IV).

Hétérogénéité

Enfin il conviendra, en s'aidant des critères donnés au chapitre I, § III, de déterminer si le matériau contenu dans l'installation peut être considéré comme homogène ou si, dans certaines parties, il est nécessaire d'appliquer les normes hétérogènes.

I.2. Paramètres de contrôle principaux

Contrôle géométrique et contrôle opérationnel

Rappelons qu'un contrôle purement géométrique (chaque unité étant en sécurité totale par sa géométrie) s'appuie sur des restrictions dans les dimensions des appareils (volume, diamètre, épaisseur) ; aucune restriction n'étant imposée aux autres paramètres caractérisant l'unité, ce type de contrôle est de loin le plus sûr et devra être préféré à tout autre.

Un contrôle purement opérationnel, portant sur les masses de matériaux fissiles en présence, leurs concentrations, leur empoisonnement, et n'imposant aucune limite aux dimensions des appareils, peut être envisagé mais il entraîne des règles administratives strictes telles que contrôle des masses de matières fissiles en mouvement, vérification systématique de concentrations par prise d'échantillon, vérification de la présence de poisons, etc. ; un tel contrôle devra être évité au maximum en raison de sa vulnérabilité aux défaillances humaines et aux imprécisions de mesure (concentration en particulier).

Il reste enfin la possibilité d'un contrôle mixte, les dimensions de certaines unités étant fixées, par exemple, en fonction d'un domaine restreint de variation de leur concentration ; ceci sera particulièrement intéressant dans le cas où ce domaine restreint est garanti par le procédé.

Ayant ainsi choisi le type de contrôle pour chaque unité, on définira plus précisément le ou les paramètres de contrôle qu'on désire lui appliquer parmi les suivants :

- volume
- diamètre
- épaisseur
- masse
- concentration
- empoisonnement

I.3. Régions de contrôle

On appelle ainsi une région où toutes les unités sont assujetties à un contrôle de même type : on distinguera les régions à contrôle purement géométrique (ou - de géométrie sûre -) et les régions à contrôle mixte ou purement opérationnel (ou - de géométrie non sûre -).

L'intérêt de cette notion réside dans le fait que les consignes de criticité (contrôles de concentration, restrictions dans les mouvements de matières fissiles...) n'auront à s'appliquer que dans les régions de géométrie non sûre ;

il est donc utile de délimiter par avance les différentes régions, car leur disposition relative peut avoir quelque incidence sur les conditions d'exploitation.

II. DÉFINITION DES ZONES

Il est intéressant de définir dans l'installation plusieurs zones, chacune étant isolée neutroniquement des autres ; ceci permet de simplifier beaucoup les études d'interaction.

Dans certains endroits où la quantité et la localisation du matériau fissile peut être très variable, un magasin de stockage par exemple, il pourra être utile et même nécessaire d'isoler neutroniquement ce magasin du reste de l'installation, et éventuellement plusieurs cellules de ce magasin entre elles ; les problèmes d'interaction se trouveront ainsi fractionnés et la surface totale nécessaire pourra être plus réduite.

Pour déterminer les écrans neutroniques, on se référera aux critères d'isolement du chapitre I, § I.

III. DÉFINITION DES DENSITÉS

Il est important de connaître, bien qu'en général cela n'intéresse pas le procédé, la courbe de densité en matériau fissile par unité de volume en fonction du rapport de modération H/X ; par comparaison aux courbes standard Uds et Puds, ceci permettra de savoir si on doit se référer aux normes-sels (avec une correction éventuelle de densité, voir annexe IV), ou aux normes métal-eau.

Il faut remarquer que cette détermination doit être faite, non seulement pour les composés traités normalement, mais aussi pour ceux susceptibles de se former lors d'un accident possible. Un évaporateur de solution de plutonium, par exemple, pourrait être en principe traité avec les normes sels et solutions ; mais dans le cas d'un emballage de chauffage, l'éventualité de formation de PuO_2 de densité supérieure à celle du sel standard devrait être prise en compte et les normes modifiées en conséquence.

IV. DÉFINITION DES UNITÉS

Par unité, on entend en principe un appareil qui se ramènera le plus souvent à une forme géométrique simple (sphère, cylindre, plaque) mais qui peut être aussi de forme mal définie (masse métallique en cours d'usinage) ou complexe (mélangeur-décanteur-évaporateur).

Par extension, on appellera aussi unité un ensemble d'appareils qui, par leur configuration ou leur usage, permettent d'être traités au point de vue neutronique comme une seule entité ; ce sera le cas par exemple d'un atelier où la masse globale de matière fissile est limitée, ou un ensemble de réservoirs où la concentration est inférieure à la concentration critique limite.

IV.1. Unités effectivement isolées neutroniquement

On utilisera les normes de la série R (réflecteur infini d'eau).

IV.1.1. Sécurité totale (un seul paramètre de contrôle)

On devra chercher autant que possible à obtenir ce type de sécurité à un seul paramètre de contrôle principal ; en

fonction du paramètre choisi (masse, volume, diamètre, épaisseur, concentration), la norme correspondante donnera une valeur minimale critique L_c .

A cette valeur critique, on appliquera un coefficient de sécurité pour obtenir une limite sûre L_s :

$$L_s = \alpha \cdot L_c$$

Pour la détermination de α , on se reportera au chapitre I, § IV.

IV.1.2. Sécurité limitée (plusieurs paramètres de contrôle)

Si on est obligé de choisir un contrôle multiple (généralement, par la concentration et un autre paramètre) on disposera alors d'un degré de liberté pour définir les domaines restreints de variation des différents paramètres ; si on trouve une valeur critique L_c pour une concentration limite C_c , les limitations sûres à adopter seront :

$$L_s = \alpha \cdot L_c \\ C_s = C_c \pm \Delta C$$

On se reportera au chapitre I, § IV.

IV.2. Unités en interaction

Le problème cette fois est double ; définir des unités qui, bien entendu, seront sûres considérées comme isolées et entourées d'un épais réflecteur d'eau, mais aussi dont le K_{eff} nu sera tel qu'on pourra les implanter à des distances raisonnables les unes des autres.

On conseille dès lors le processus suivant.

IV.2.1. Définition de l'unité par son K_{eff} nu

On utilisera les normes de la série N (unités entourées d'une épaisseur nominale de 3 mm d'acier).

IV.2.1.1. Sécurité totale (un seul paramètre de contrôle)

Ce cas est toujours préférable. En fonction du paramètre choisi, on se fixera le K_{eff} suivant :

masse	$K_1 = 0,65$
volume	$K_1 = 0,65$
diamètre	$K_1 = 0,6$
épaisseur	$K_1 = 0,3$

La courbe sous critique $K_{eff} = K_1$ correspondante donnera une valeur minimale L_c au paramètre de contrôle ; cette valeur est retenue sans coefficient de sécurité supplémentaire.

IV.2.1.2. Sécurité limitée (plusieurs paramètres de contrôle)

Ces paramètres sont généralement la concentration et un autre paramètre ; c'est en fonction de cet autre paramètre qu'on se fixera le K_{eff} nu K_1 comme précédemment. On disposera d'un degré de liberté pour fixer les domaines restreints de variation des deux paramètres ; si on trouve pour une concentration limite C_c , une valeur limite L_c correspondant à $K = K_1$, on retiendra la valeur L_s sans coefficient de sécurité supplémentaire.

IV.2.2. Définition de l'unité par son K_{eff} réfléchi

On procédera rigoureusement comme en IV.1 en utilisant les normes de la série R ; on obtiendra ainsi une limite sûre L_s .

Dans le cas d'une sécurité limitée, cette limite sûre L_s devra correspondre à la même concentration limite C_c que pour la définition de l'unité par son K_{eff} nu (§ IV.2.1.2).

IV.2.3. Comparaison des deux définitions

IV.2.3.1. Sécurité totale

Dans le cas d'un seul paramètre, on compare ses deux limites L_1 et L_2 et on retient la plus sévère.

Si L_1 est la limite retenue, on connaît le K_{eff} nu par le fait même du choix initial de la valeur K_1 (§ IV.2.1.1).

Si L_2 est la limite retenue, on aura intérêt à se reporter une seconde fois aux normes de la série N pour déterminer la limite supérieure du K_{eff} nu, qui sera inférieure à la valeur standard choisie initialement.

IV.2.3.2 Sécurité limitée

On choisit comme précédemment la limite la plus sévère des deux valeurs L_1 et L_2 .

Si L_1 est la limite retenue, on connaît son K_{eff} nu.

Si L_2 est la limite retenue, on aura intérêt à se reporter une seconde fois aux normes de la série N pour déterminer, pour la concentration limite C_c , le K_{eff} nu de cette valeur L_2 .

Enfin, en ce qui concerne la concentration, on obtiendra une limite sûre $C_s = C_c \pm \Delta C$ comme il est indiqué au chapitre I § IV.

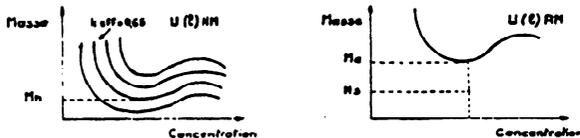
IV.2.4. Détermination de l'angle solide limite

Connaissant la limite supérieure du K_{eff} nu de chaque unité, on en déduit son angle solide limite par la formule :

$$\Omega_1 = \frac{1 - K_s}{2}$$

IV.3. Exemples de définition d'unités en interaction

Premier exemple : Définition d'une unité contrôlée uniquement par sa masse (uranium d'enrichissement e)



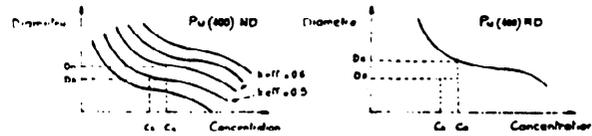
La courbe U (e) NM $K_{eff} = 0,65$ donne une masse minimum M_c .

La courbe U (e) RM donne une masse critique minimum M_c ; si le double chargement est impossible mais si on craint une précipitation, on prendra, dans le tableau du chapitre I § IV le coefficient 0,7; si de plus la masse n'est mesurée qu'à 10% près, on prendra $M_s = 0,90 (0,7.M_c) = 0,63 M_c$.

Supposons M_s inférieur à M_c :

La masse de l'unité sera donc limitée à la valeur M_s et son angle solide limite est égal à $\frac{1 - 0,65}{2} = 0,175$.

Deuxième exemple : Définition d'une unité cylindrique, contrôlée par le diamètre et la concentration (plutonium 239 pur).



La courbe Pu (100) ND $K_{eff} = 0,6$ suggère les deux limites D_s et C_c .

La courbe Pu (100) ND donne un diamètre minimum critique D_c pour une concentration inférieure ou égale à C_c ; si on peut craindre des gradients de concentration, on choisira dans le tableau (chapitre I § IV) le coefficient 0,85; si la tolérance mécanique sur le diamètre est faible, on pourra retenir $D_s = 0,85 D_c$.

Supposons que D_s soit inférieur à D_c ; les courbes Pu (100) ND montrent que, pour le même domaine de concentration, une limitation de diamètre à la valeur D_s , entraîne un K_{eff} nu inférieur ou égal à 0,5.

Si la concentration est mesurée à 25% près, on adoptera finalement une limite sûre C_s telle que $C_s + 0,25 C_s = C_c$ c'est-à-dire $C_s = 0,8 C_c$.

Le diamètre sera donc limité à D_s et l'angle solide limite

$$\text{du cylindre est égal à } \frac{1 - 0,5}{2} = 0,25.$$

V. DÉFINITION DE L'IMPLANTATION

Dans l'implantation d'une zone, les études de procédé sont évidemment pilotes et proposent un certain arrangement des appareils, sans perdre de vue que, du point de vue criticité, on a toujours avantage à éloigner les unités les unes des autres, sans non plus les rapprocher trop des murs réfléchissants. On doit donc « aérer » le plus possible les installations; de toutes façons, il faut éviter de placer des unités à moins de 30 cm l'une de l'autre; une seule exception est celle de plusieurs réservoirs de concentration inférieure à la concentration critique limite, qu'on pourra rapprocher entre eux sans inconvénient.

A partir de cet arrangement initial, on calcule les angles solides entre les différentes unités, comme il est indiqué au chapitre III, § I.2.3., et on applique alors les critères collectifs classiques (chapitre III, § I.2.3 et I.2.4).

Premier cas : Les critères collectifs classiques sont vérifiés.

Sous réserve que l'on ait examiné le problème des réflecteurs collectifs et des matériaux de structure (chapitre III, § II), la zone est sûre et l'étude est en principe terminée.

Si toutefois, les critères sont vérifiés largement, on pourra, pour des raisons d'ordre économique par exemple, redéfinir une nouvelle implantation avec des distances moindres entre les unités; on pourrait gagner aussi à redéfinir des unités plus grandes, de K_{eff} nu supérieur aux valeurs conseillées au IV.2.1, sous réserve qu'elles restent sûres prises isolément; dans tous les cas, une transformation impose de reprendre l'étude de la sécurité nucléaire.

Deuxième cas : Les critères collectifs classiques ne sont pas vérifiés.

Le choix se présente alors entre plusieurs méthodes que l'on peut d'ailleurs combiner :

1° Utiliser certaines variantes de la méthode de l'angle solide (angles solides moyens, facteur $\frac{S}{S_0}$, probabilités de fuite) indiquées au chapitre III, § III, dans les limites d'application de celles-ci.

2° Disposer des écrans neutroniques entre des unités trop réactives.

3° Redéfinir une nouvelle implantation en augmentant les

distances entre unités, spécialement autour de celles pour lesquelles la différence entre l'angle solide total et l'angle solide limite est la plus grande.

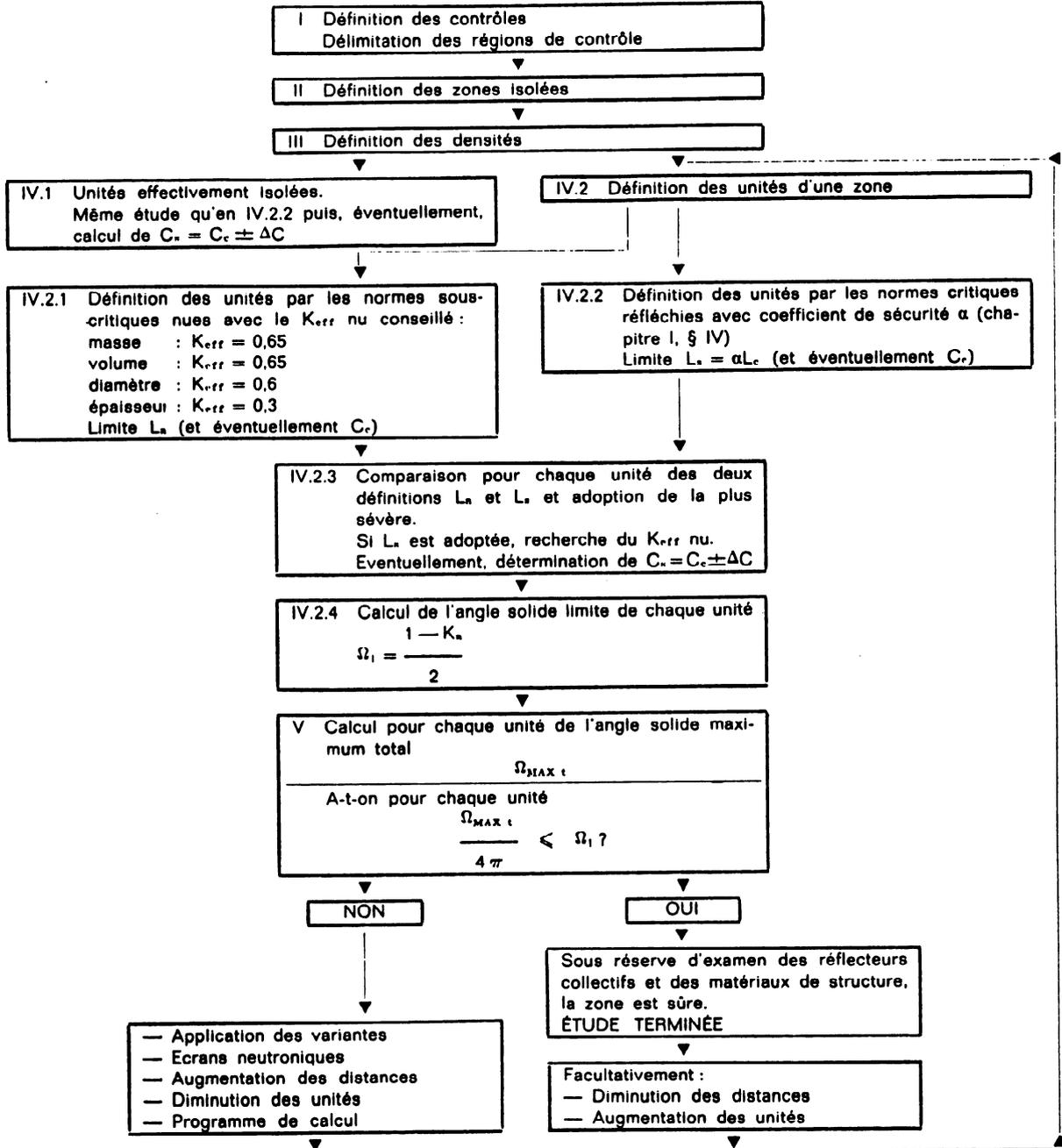
4° Redéfinir certaines unités en leur choisissant un K_{eff} nu plus faible que celui conseillé au § IV.2.1.

5° Utiliser enfin le programme de calcul qui détermine le K_{eff} global de la zone..

De même que précédemment, toute transformation impose de reprendre l'étude de la sécurité nucléaire.

Schéma récapitulatif

Le schéma suivant résume l'ensemble du processus conseillé pour l'étude de la sécurité nucléaire d'une installation.



APPENDICE

MISE EN PLACE DES ALARMES DE CRITICITÉ

Le rôle très important de ces alarmes est de prévenir d'un accident de criticité afin de permettre une évacuation rapide des lieux ; le prix de revient de telles installations étant assez élevé, on sera généralement obligé de réduire au minimum le nombre des détecteurs.

Il est difficile de donner une méthode générale permettant de fixer au mieux les emplacements de ces détecteurs : ceux-ci doivent être déterminés d'après l'étude de la sécurité nucléaire.

On peut toutefois indiquer deux principes généraux :

1° Les détecteurs devraient se situer aux endroits où les risques potentiels sont les plus grands.

L'évaluation des risques potentiels est en grande partie une affaire de jugement ; l'étude de la sécurité nucléaire

montrera cependant quels sont les endroits où les critères de sécurité sont vérifiés au plus juste (unités pour lesquelles l'angle solide total est très voisin de l'angle solide limite), ou bien ceux où la sécurité repose sur un certain nombre de contrôles opérationnels, toujours assez vulnérables aux défaillances humaines.

2° L'emplacement des détecteurs doit tenir compte de leur "visibilité".

Il est évident qu'un détecteur sera d'autant plus efficace qu'il sera "visible" pour les neutrons issus d'un plus grand nombre d'appareils.

C'est pourquoi, en tenant compte des écrans neutroniques et des distances entre les points sensibles et les détecteurs, la préférence devra être donnée à des positions les plus centrales possibles.

ANNEXE I

CALCUL DES ANGLES SOLIDES GÉOMÉTRIQUES

Nous récapitulons ci-dessous les différentes méthodes applicables au calcul des angles solides :

- Formules ;
- Règle à calcul spécialisée ;
- Tables d'angle solide ;
- Abaques d'angles solides particuliers ;
- Programme de calcul (SACLAY).

— Point vers rectangle quelconque

Ce cas se ramène au premier cas particulier.

Exemples :

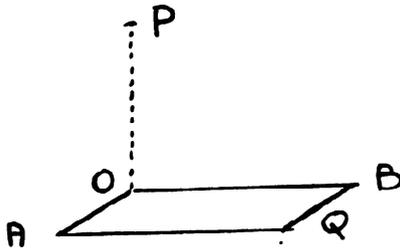
I. FORMULES

Toutes les formules suivantes sont données en stéradians.

I.1. Figures planes rectilignes

Les formules sont alors rigoureuses.

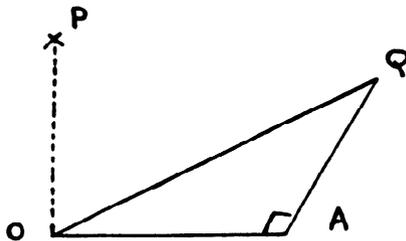
— Point vers rectangle, le point se projetant sur un des sommets



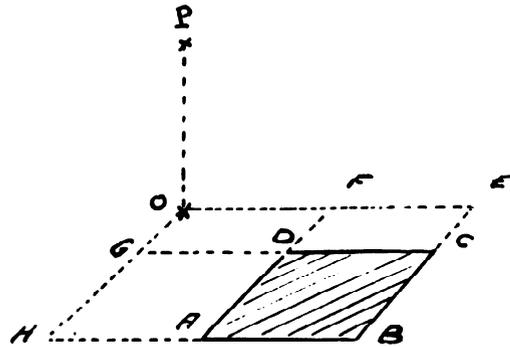
$$\Omega = \text{Arc sin} \frac{OA \cdot OB}{PA \cdot PB} = \text{Arc tg} \frac{OA \cdot OB}{PO \cdot PQ}$$

$$\text{ou : } \Omega = \frac{1}{2} \text{Arc cos} \left[1 - 2 \left(\frac{OA \cdot OB}{PA \cdot PB} \right)^2 \right]$$

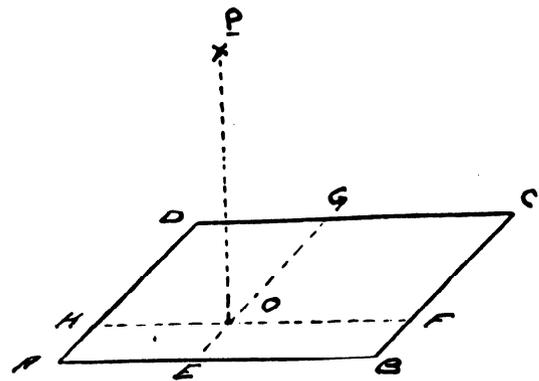
— Point vers triangle rectangle, le point se projetant sur un des sommets de l'hypoténuse



$$\Omega = \text{Arc tg} \frac{OA \cdot PQ}{PO \cdot AQ} - \text{Arc tg} \frac{OA}{AQ}$$



$$\Omega (ABCD) = \Omega (OHBE) + \Omega (OGDF) - \Omega (OGCE) - \Omega (OHAF)$$

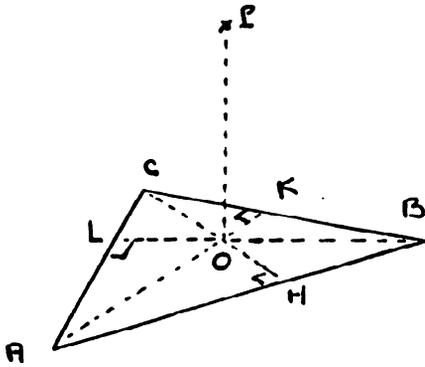


$$\Omega (ABCD) = \Omega (OHAE) + \Omega (OEBF) + \Omega (OF CG) + \Omega (OGDH)$$

— Point vers triangle quelconque

Ce cas se ramène au deuxième cas particulier.

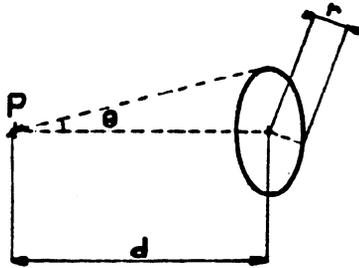
Exemple :



$$\Omega(ABC) = \Omega(OAH) + \Omega(OHB) + \Omega(OBK) + \Omega(OKC) + \Omega(OC L) + \Omega(OLA)$$

1.2. Disques

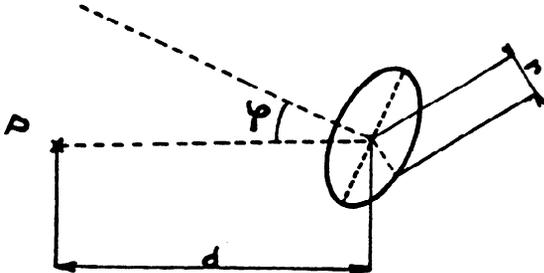
— Point sur l'axe :



$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$$

avec $\text{tg } \theta = \frac{r}{d}$

— Point quelconque (formule approchée) :



$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$$

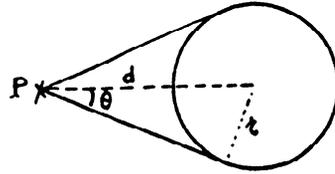
avec $\text{tg } \theta = \frac{r \sqrt{\cos \varphi}}{d}$

1.3. Formes géométriques classiques

— Parallélépipède rectangle

Le calcul se ramène à des angles solides vers des rectangles.

— Sphère (formule rigoureuse)

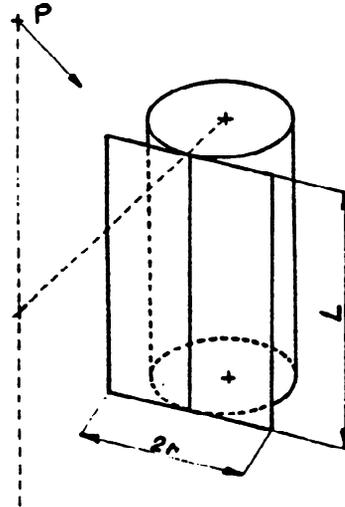


$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$$

avec $\sin \theta = \frac{r}{d}$

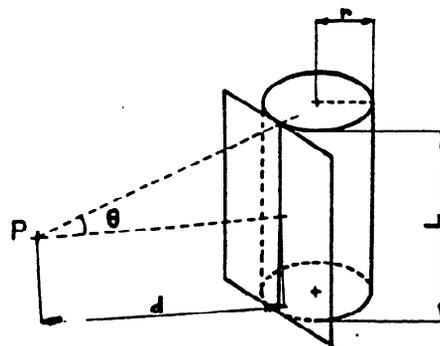
— Cylindre (formules approchées)

Le calcul se ramène à la somme de deux termes, angle solide vers un disque et angle solide vers un rectangle, l'un ou l'autre de ces termes pouvant d'ailleurs être nul.



Le rectangle est la projection du contour apparent du cylindre sur le plan tangent situé en regard du point.

Cas particulier du point situé à mi-hauteur



Autre formule :

$$\Omega = \frac{4r}{d} \sin \theta$$

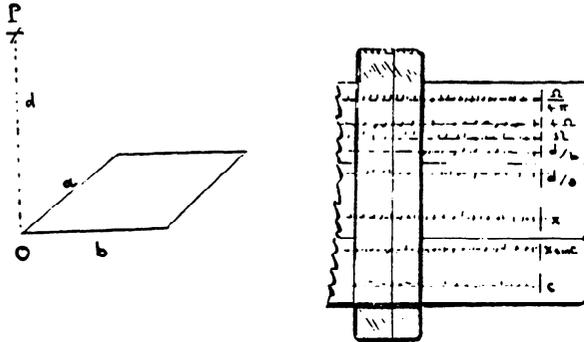
avec $\text{tg } \theta = \frac{L}{2d}$

On peut aussi ramener le cas général à une 1/2 somme ou une 1/2 différence d'angles solides obtenus par cette formule.

II. RÉGLE A CALCUL D'ANGLES SOLIDES

Cette règle calcule directement l'angle solide d'un point vers un rectangle, le point se projetant orthogonalement sur un des sommets, et permet ainsi de calculer les angles solides qui en découlent :

- point vers rectangle quelconque ;
- point vers parallélépipède ;
- point vers cylindre (surface latérale seulement).



La formule utilisée est :

$$\sin \Omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{a^2}} \sqrt{1 + \frac{d^2}{b^2}}}$$

$$\text{ou : } \text{Log} \left(\frac{1}{\sin \Omega} \right) = \frac{1}{2} \text{Log}$$

$$\left[1 + \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \text{Log} \left[1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right]$$

Echelles Ω , 4Ω , $\Omega/4\pi$

Les graduations de l'échelle Ω sont portées sur des longueurs proportionnelles à $\text{Log} \frac{1}{\sin \Omega}$. Les échelles 4Ω et $\Omega/4\pi$ lui sont proportionnelles.

Echelles d/a et d/b

Leurs graduations sont portées sur des longueurs proportionnelles à

$$\text{Log} \left[1 + \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right] \text{ et } \text{Log} \left[1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right]$$

Leur origine 0 est confondue avec 10^{-1} .

Echelles X et X sin C

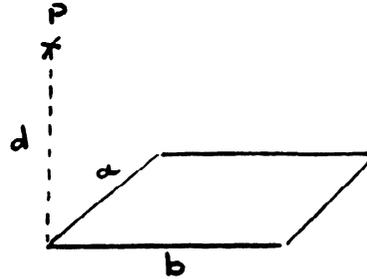
Ce sont des échelles logarithmiques ordinaires permettant tous calculs de produits et de rapports.

Echelle C (degrés)

Cette échelle donne en degrés l'angle dont le sinus est lu sur l'échelle X sin C.

II.1. Angle solide d'un point P vers une plaque dont un sommet est la projection de P.

Avec les échelles inférieures on calcule $\frac{d}{a}$ qu'on garde en mémoire sur l'échelle X sin C à l'aide du curseur.



On effectue de même le rapport $\frac{d}{b}$, et on déplace la règle de façon à amener l'index initial (marqué 10^{-1}) de l'échelle $\frac{d}{a}$ devant la valeur de $\frac{d}{b}$ lue sur l'échelle $\frac{d}{b}$.

On déplace le curseur sur la valeur de $\frac{d}{a}$ lue sur l'échelle $\frac{d}{a}$ et on lit Ω en stéradians sur l'échelle Ω , et $\frac{\Omega}{4\pi}$ sur l'échelle supérieure : cette dernière valeur est utile si l'on utilise les angles solides maximum fractionnels.

Exemple :

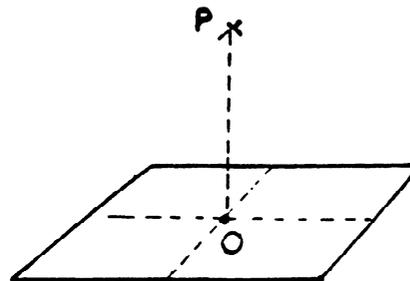
Plaque de $.120 \text{ m} \times 0,90 \text{ m}$ - Point situé à $5,65 \text{ m}$

$$\frac{d}{a} = 4,71 \quad \frac{d}{b} = 6,29 \quad \Omega = 3,23 \cdot 10^{-3} \text{ stéradians}$$

$$\frac{\Omega}{4\pi} = 2,58 \cdot 10^{-3}$$

II.2. Angle solide d'un point P vers une plaque dont le centre est la projection de P.

Dans ce cas, si a et b sont les demi-dimensions de la



plaque, on effectuera le calcul comme précédemment, mais on lira l'angle solide total en stéradians sur l'échelle 4Ω et non sur l'échelle Ω .

II.3. Angle solide d'un point P vers une plaque rectangulaire quelconque

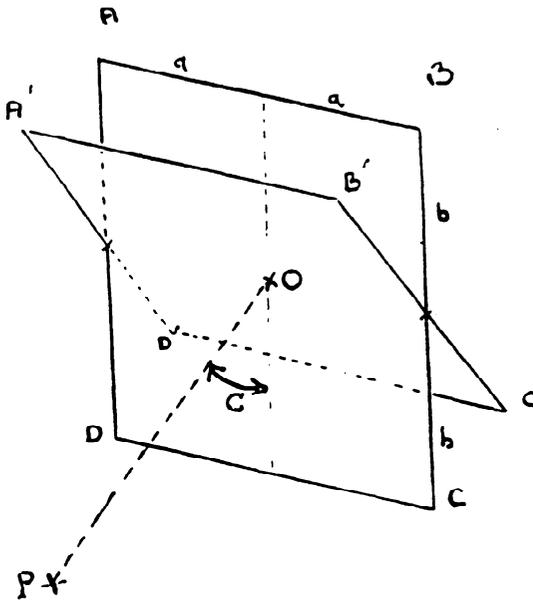
On peut toujours se ramener au cas particulier II.1, comme il est exposé au paragraphe I.1.

Utilisation des échelles X et X sin C

Dans le cas particulier où le point P se projette sur une des médianes du rectangle (ou son prolongement) on peut employer aussi la méthode suivante, plus simple, mais approximative :

En projetant la plaque ABCD en A'B'C'D', dans un plan perpendiculaire à PO, on aura :

$$\Omega(ABCD) \approx \Omega(A'B'C'D') \text{ avec } B'C' = BC \sin C = 2b \sin C$$



Si on peut évaluer C, on obtiendra sin C par simple rappel sur l'échelle X sin C et on portera par la suite $\frac{d}{b \sin C}$ sur l'échelle $\frac{d}{b}$.

L'angle total se lira sur l'échelle 4Ω .

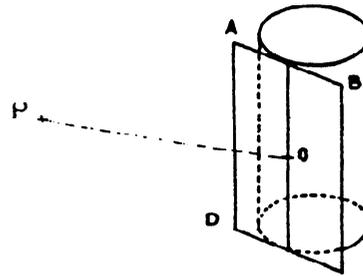
II.4. Angle solide vers un parallélépipède rectangle

Ce calcul se ramène à des angles solides vers un ou plusieurs rectangles.

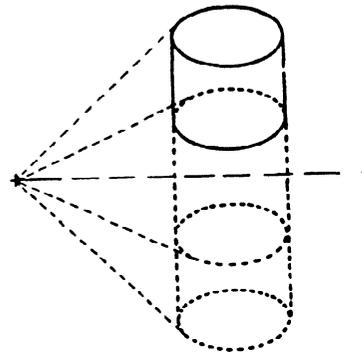
II.5. Angle solide vers un cylindre

La règle permet de calculer de façon approximative l'angle solide vers la surface latérale d'un cylindre en projetant son contour apparent sur le plan tangent en ABCD.

On est ramené au cas particulier du paragraphe II.3.



- Si le point est situé à mi-hauteur du cylindre, on peut :
- soit se ramener au cas particulier II.2 ;
- soit utiliser la formule de I.3 avec les seules échelles X et X sin C.

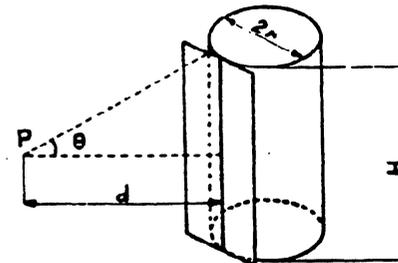


Si le point n'est pas situé à mi-hauteur, on peut encore évaluer l'angle solide par 1/2 somme ou 1/2 différence d'angles solides évalués par l'une des deux méthodes précédentes.

III. TABLES D'ANGLES SOLIDES

Il existe des tables permettant d'évaluer les angles solides vers des cylindres, des plaques et des disques.

III.1. Cylindres



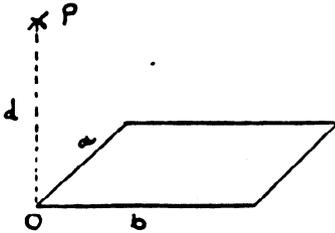
Les tables donnent l'angle solide en stéradians, en fonction de $\frac{H}{2R}$ et $\frac{d}{2R}$, le point étant supposé à mi-hauteur du cylindre. La formule utilisée est la suivante :

$$\Omega = 4 \operatorname{Arc} \sin \frac{1}{\left(1 + \frac{d}{R}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{2d}{H}\right)^2}}$$

Si le point n'est pas à mi-hauteur, on pourra toujours calculer l'angle solide latéral par 1/2 somme ou 1/2 différence de deux angles solides lus dans la table.

III.2. Plaques

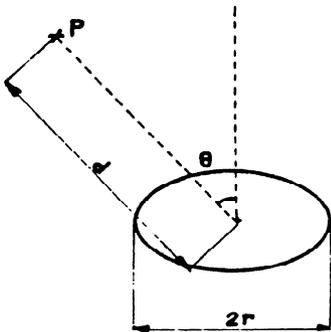
Les tables donnent l'angle solide en stéradians évalué par la même formule que la règle à calcul, en fonction de $\frac{d}{a}$ et $\frac{d}{b}$, le point étant supposé se projeter sur un des sommets de la plaque.



On pourra en déduire l'angle solide vers une plaque quelconque par somme ou différence d'angles solides lus dans la table.

III.3. Disques

Les tables donnent l'angle solide en stéradians évalué par intégration numérique en fonction de $\frac{d}{2R}$ et θ .

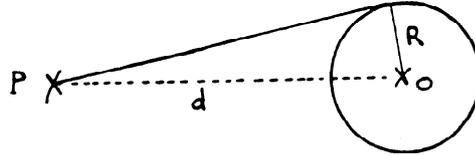


Elles permettent en particulier d'achever le calcul de l'angle solide total vers un cylindre si le point voit une des bases.

IV. ABAQUES D'ANGLES SOLIDES

IV.1. Sphères

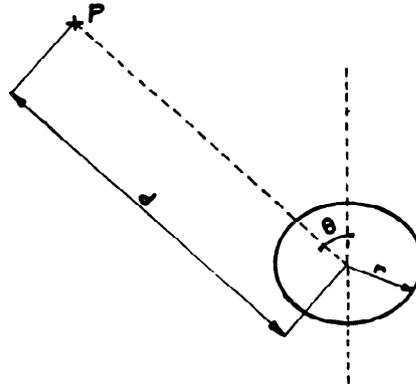
On trouvera dans ce guide une courbe donnant l'angle solide en stéradians d'un point vers une sphère en fonction du rapport $\frac{d}{2R}$



Il est évalué par la formule donnée en I.3.

IV.2. Disques

On trouvera également un réseau de courbes donnant, à θ donné, l'angle solide en stéradians d'un point vers un disque en fonction du rapport $\frac{d}{2R}$.



Il est évalué comme dans les tables.

IV.3. Cylindres

On trouvera un réseau de courbes donnant, pour une valeur de

$$\lambda = \frac{H}{2R}$$

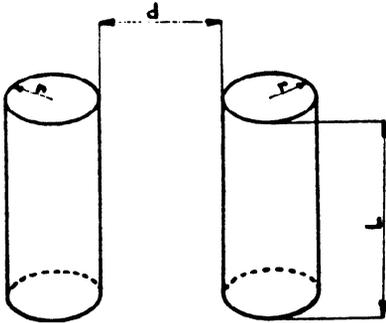
donnée, l'angle solide d'un point vers un cylindre (en stéradians) en fonction du rapport $\frac{D}{2R}$

Cet angle solide est évalué comme dans les tables.

IV.4. Angles solides moyens

IV.4.1. Angle moyen entre deux cylindres égaux, parallèles, ayant leurs bases dans le même plan.

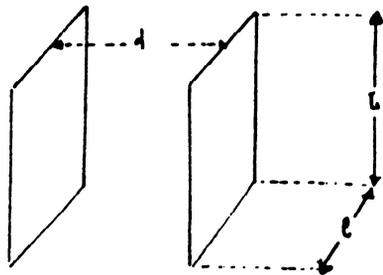
Chaque courbe du réseau donne, à rapport $\frac{L}{2R}$ donné, l'angle solide moyen en stéradians sous lequel un cylindre



est vu des différents points de l'autre, en fonction du rapport $\frac{d}{2R}$.

IV.4.2. Angle moyen entre deux plaques égales, formant les faces opposées d'un parallélépipède rectangle.

Chaque courbe du réseau donne, à rapport $\frac{l}{d}$ donné, l'angle solide moyen en stéradians sous lequel une plaque



est vue des différents points de l'autre, en fonction du rapport $\frac{l}{L}$.

Ce réseau, ainsi que le précédent, a été obtenu par intégration numérique.

IV.4.3. Angle moyen entre deux sphères identiques

Une courbe, obtenue aussi par intégration numérique, donne l'angle solide moyen entre deux sphères identiques en fonction du rapport $\frac{d}{2R}$.

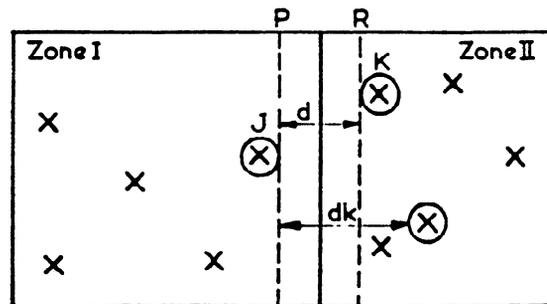
V. MÉTHODE PERMETTANT DE SIMPLIFIER LES CALCULS D'ANGLES SOLIDES POUR UN ENSEMBLE D'UNITÉS.

Les études d'interaction entre n unités nécessitent n(n-1) calculs d'angles solides. Ce travail long et fastidieux peut être simplifié de la manière suivante, tout en se plaçant dans des conditions pessimistes :

On fera un quadrillage plus ou moins arbitraire de l'installation, chaque maille de ce quadrillage constituant une zone non isolée et groupant un nombre restreint d'unités voisines. On pourra cependant considérer chaque zone comme isolée si on ajoute à chaque angle solide calculé entre les unités de la zone, une quantité qui majore la contribution apportée par les unités des zones voisines.

Cette quantité peut être évaluée de la façon suivante :

Supposons par exemple que l'on ait découpé une installation en deux zones I et II.



L'angle solide maximum total pour une unité i de la zone I est la somme des contributions apportées par les autres unités de la zone I et par les unités de la zone II.

L'indice j se rapportant aux unités de la zone I et l'indice k aux unités de la zone II, on a :

$$\Omega_{MAX}^i = \sum_j \Omega_{MAX}^{j \rightarrow i} + \sum_k \Omega_{MAX}^{k \rightarrow i} \quad (1)$$

On va donc chercher à remplacer $\sum_k \Omega_{MAX}^{k \rightarrow i}$ par une valeur supérieure valable pour toutes les unités de la zone I.

Pour cela, on détermine l'unité de la zone I et celle de la zone II qui sont les plus proches l'une de l'autre. Soit J et K les emplacements de ces unités et d leur distance bord à bord. On y place respectivement à une distance bord à bord d les unités des zones I et II ayant les plus grandes dimensions. (Dans le cas de parallélépipèdes, on orientera la plus grande face parallèlement au plan de séparation des zones). Soit $\Omega_{MAX}^{K \rightarrow J}$ l'angle solide maximum avec lequel on voit l'unité placée en J de l'unité placée en K. $\Omega_{MAX}^{K \rightarrow J}$ est une valeur supérieure de l'angle solide d'une unité quelconque de II vers une unité quelconque de I.

On replace en J et K les unités qui y sont réellement, et on fait passer par le ou les points de la surface de J les plus proches de la zone II un plan (P) parallèle au plan de séparation des zones. On mesure les distances minimum dk des unités de la zone II à ce plan, ces distances étant mesurées à partir des surfaces des unités.

$$\text{La somme } \Omega_{\text{MAX}}^{K \rightarrow J} \sum_k \left(\frac{d}{dk} \right)^2$$

étendue à toutes les unités de la zone II est une valeur supérieure de l'angle solide avec lequel on voit une unité de I à partir de toutes les unités de II.

La méthode de l'angle solide limite appliquée à la zone I s'écrit :

$$\frac{\Omega_{\text{MAX I}}}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \left[\sum_j \Omega_{\text{MAX}}^{J \rightarrow I} + \Omega_{\text{MAX}}^{K \rightarrow J} \sum_k \left(\frac{d}{dk} \right)^2 \right] < \Omega_{\text{I}}$$

On obtiendra une inégalité analogue pour la zone II et l'ensemble des unités des zones I et II sera sûr si les deux inégalités sont vérifiées

VI. PROGRAMMES DE CALCUL

Il existe un programme de calcul pour IBM 7090 permettant de déterminer dans un ensemble d'unités de formes géométriques simples (sphères, cylindres, parallélépipèdes rectangles) et d'axes parallèles aux arêtes d'un même trièdre, trirectangle, l'angle solide total sous lequel chaque unité est vue de toutes les autres.

La première édition de ce programme, en vigueur à SACLAY, tient compte des effets d'écrans dus aux unités et aux murs éventuels, et calcule les angles solides maximum.

Une deuxième édition, en cours de préparation, calculera les angles solides moyens.

Présentation des données

Il importe d'entrer dans le programme les données concernant non seulement les unités elles-mêmes, mais aussi les murs, dalles de béton, et tout autre élément de l'installation susceptible de former écran neutronique. Enfin, mention spéciale sera faite des unités mobiles.

Les utilisateurs devront donc présenter différents tableaux de coordonnées, réalisés selon les modèles suivants, dans lesquels les unités et les écrans seront ramenés, éventuellement par décomposition, à des formes géométriques simples (sphères, cylindres, parallélépipèdes rectangles) d'axes parallèles aux axes de coordonnées.

1° Unités fixes

N _o	Tableau des unités fixes									Observations
	X	Y	Z	A	B	C	R	C ₀	C ₁	

Dans la colonne N_o, on entrera le N^o de l'unité (nombre entier).

Dans les colonnes X, Y, Z, on entrera les coordonnées en cm du centre géométrique de l'appareil, comptées à partir d'un système d'axes de coordonnées arbitraire.

Pour un cylindre dont l'axe est parallèle, soit à OX, soit à OY, soit à OZ, on entrera respectivement la valeur de sa hauteur en cm, soit dans la colonne A, soit dans la colonne B, soit dans la colonne C.

On entrera dans la colonne R la valeur en cm de son rayon.

Pour un parallélépipède, on entrera les valeurs en cm, du côté parallèle à OX dans la colonne A, du côté parallèle à OY dans la colonne B et du côté parallèle à OZ dans la colonne C.

Pour une sphère, on entrera seulement la valeur en cm de son rayon dans la colonne R.

Dans les colonnes C₀ et C₁, on entrera pour chaque appareil les valeurs des concentrations ou des poids de matières fissiles rencontrées en marche normale ou en marche accidentelle.

Par concentration ou poids en marche accidentelle, on entend concentration maximum ou poids maximum que l'appareil pourrait contenir comme résultant d'un accident possible et raisonnable (rupture d'un filtre, fausse manœuvre, etc.).

2° Unités mobiles

Lorsque dans une installation, une ou plusieurs unités figurant déjà dans le tableau précédent seront susceptibles d'être déplacées pendant le fonctionnement de l'installation, elles devront figurer également dans un tableau de charges mobiles, réalisé de la façon suivante :

N ^o	Tableau des unités mobiles									Observations
	A	B	C	X'	Y'	Z'	A'	B'	C'	

Dans la colonne N^o, on répètera le numéro de l'unité mobile.

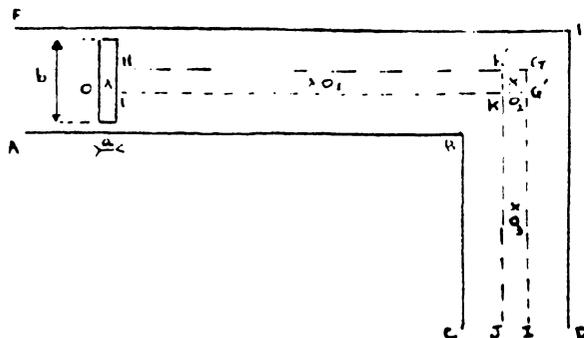
Dans les colonnes A, B et C, on répètera les dimensions de l'unité selon OX, OY, OZ.

Dans les colonnes X', Y', Z', A', B' et C', on donnera les coordonnées du centre géométrique et les dimensions du parallélépipède rectangle dans lequel est susceptible de se déplacer le centre géométrique de l'unité en question.

Si l'appareil, au cours du déplacement, change de direction, on définira un nouveau parallélépipède rectangle et on redonnera les dimensions A, B et C de l'unité en tenant compte de sa nouvelle orientation.

Enfin, si au cours du déplacement, l'unité peut prendre une orientation quelconque, on ne mettra rien dans les colonnes A, B et C et on le signalera dans la colonne observations.

Si, par exemple, une plaque placée sur un chariot se déplace dans une allée ABCDEF, son centre O se déplaçant sur la surface LKJIHG.



On présentera le tableau de la façon suivante :

N°	A	B	C	X'	Y'	Z'	A'	B'	C'	Observations
0	a	b	c	X ₀₁	Y ₀₁	Z ₀₁	LK	LH	0	orientation quelconque
0				X ₀₂	Y ₀₂	Z ₀₂	KG'	GG'	0	
0	b	a	c	X ₀₃	Y ₀₃	Z ₀₃	Jl	JK	0	

3° Ecrans

Si, par ailleurs, on prévoit des écrans neutroniques comme murs de béton, paraffine, etc., on entrera les coordonnées de ces écrans dans un troisième tableau, selon le modèle ci-dessous :

Tableau des écrans neutroniques						
N°	X	Y	Z	A	B	C

ANNEXE II

CALCUL DES PROBABILITÉS DE FUITE ET DES K EFFECTIFS

On rappelle que le K effectif d'une unité est donné par la formule : $K_{eff} = K_{\infty} \cdot P$ où P est la probabilité anti-fuite ; (1 - P) est appelé probabilité de fuite.

Il est utile de connaître la probabilité de fuite (1 - P_i) d'une unité i, si on désire pondérer les angles solides, tels que Ω_{MAX} , par cette quantité.

D'autre part, si les normes sous-critiques nues donnent les K effectifs de sphères, de cylindres infinis et de plaques infinies, il peut être utile de préciser les K_{eff} nus de cylindres et de plaques finies pour préciser au mieux l'angle solide limite. Enfin, dans certains cas, il est nécessaire de connaître le K_{eff} réfléchi des unités pour calculer leur angle solide limite.

La présente annexe propose une méthode graphique approchée pour résoudre ces différents problèmes. Bien entendu, le K effectif se déduira de la probabilité de fuite et les deux problèmes sont intimement liés ; toutefois, il importe de remarquer qu'ils diffèrent sur les approximations à prendre pour aller dans le sens de la sécurité : pour pondérer un angle solide il faudra prendre une majorante de la probabilité de fuite, tandis que pour calculer un K effectif, il faudra majorer celui-ci donc minorer la probabilité de fuite.

On examinera tout d'abord les unités simples, puis on ramènera les cas plus complexes à ce premier cas.

I. UNITÉS DE FORME SIMPLE

La mise au point de formules générales donnant la probabilité de fuite et le K effectif d'unités même de forme géométrique simple (sphères, cylindres, parallélépipèdes rectangles) est une tâche ardue qui est loin d'être résolue.

On se bornera dans ce guide à traiter trois cas :

- solutions d'uranium ou de plutonium jusqu'à l'optimum de modération (pour la géométrie) ;
- sels secs (H/X = 0) dont les résultats pourront être à la rigueur étendus aux sels humides (H/X faible) ;
- métal compact (H/X = 0) d'uranium, ou de plutonium en phase α ou δ .

Ce dernier cas est traité dans les compléments ; on se limitera donc ici aux sels secs ou en solution.

I.1. Détermination de la probabilité de fuite

On sait que la probabilité anti-fuite P peut se décomposer en $P = U_r \cdot U_t$ où U_r et U_t sont les probabilités anti-fuite respectivement des neutrons rapides et thermiques.

Pour les sels secs, on pourra déterminer directement P ; pour les solutions, on passera par l'intermédiaire de U_r et U_t.

Les probabilités P, U_r, U_t s'expriment à partir des quantités désignées respectivement par B², B²_r, B²_t, appelées "laplaciens géométriques" ; les laplaciens géométriques sont eux-mêmes fonction des dimensions de l'unité, augmentées d'une certaine longueur λ , appelée "longueur totale d'extrapolation".

Cette longueur totale d'extrapolation dépend de la forme des unités, du matériau fissile contenu et des conditions de réflexion.

Pour les solutions, on utilisera deux longueurs d'extrapolation λ_r et λ_t , donnant respectivement B²_r et B²_t, d'où enfin U_r et U_t ; pour les sels secs, on utilisera une seule longueur globale λ , d'où on tirera B², puis P.

I.1.1. Détermination des longueurs d'extrapolation

On se reportera au tableau suivant, qui donne les longueurs totales d'extrapolation pour les sphères, cylindres et parallélépipèdes (indices s, c ou p) en fonction des matériaux contenus.

MATERIAU		Forme de l'unité	Unités nues cm	Unités réfléchies cm
UO ₂ F ₂	Solutions	λ_r s, c, p	3	7
		λ_t s, c, p	0,36	0,36
	Sels secs	λ s	4,86	17,9
		λ c, p	Voir fig. II.6 4,7	Voir fig. II.7 19
PuO ₂ F ₂	Solutions	λ_r s, c, p	2,5	6,4
		λ_t s, c, p	0,36	0,36
	Sels secs	λ s	6,15	13,3
		λ c, p	Voir fig. II.6 6,1	Voir fig. II.7 14,1

Les figures II.6 et II.7 donnent λ pour des cylindres de sel sec, en fonction du rapport $\frac{\text{hauteur}}{\text{hauteur} + \text{diamètre}}$.

Remarques

1) Extension des résultats aux sels humides

L'utilisation du λ des sels secs pour les sels humides a tendance à minorer quelque peu la probabilité de fuite ; il sera donc plus sûr de minorer λ d'autant plus que la modération est grande, sans qu'il soit nécessaire de descendre au-dessous de la valeur du λ , des solutions (cf. § 1.4).

2) Correction de densité pour les sels secs ou humides

Si le sel réel a une courbe de dilution différente du sel standard, il conviendra de corriger les longueurs d'extrapolation de la manière suivante :

$$\frac{\lambda \text{ réel}}{\lambda \text{ standard}} = \frac{c \text{ standard}}{c \text{ réelle}}$$

où λ standard est donné par les courbes II.6 et II.7, le rapport des concentrations étant pris au même H/X.

1.1.2. Détermination des laplaciens géométriques

Connaissant λ (sels secs) ou λ_r et λ_t (solutions) on en déduit B^2 ou B^2_r et B^2_t suivant les cas ; on utilisera les courbes B^2 (λ), B^2 (D), B^2 (H) de la figure 11.3.

Suivant la forme de l'unité, on utilisera l'une des expressions du tableau suivant (les indices de λ se référant à la forme) :

Forme de l'unité	Dimensions extrapolées	Laplacien
Sphère de diamètre φ	$\Phi = \varphi + 2 \lambda_s$	$B^2 = B^2(\Phi)$
Cylindre infini de diamètre d	$D = d + 2 \lambda_c$	$B^2 = B^2(D)$
Cylindre de diamètre d, hauteur h	$D = d + 2 \lambda_c$ $H = h + 2 \lambda_c$	$B^2 = B^2(D) + B^2(H)$
Plaque infinie d'épaisseur h	$H = h + 2 \lambda_p$	$B^2 = B^2(H)$
Prisme droit infini, de côtés h_1 et h_2	$H_1 = h_1 + 2 \lambda_p$ $H_2 = h_2 + 2 \lambda_p$	$B^2 = B^2(H_1) + B^2(H_2)$
Parallélépipède rectangle de côtés h_1, h_2, h_3	$H_1 = h_1 + 2 \lambda_p$ $H_2 = h_2 + 2 \lambda_p$ $H_3 = h_3 + 2 \lambda_p$	$B^2 = B^2(H_1) + B^2(H_2) + B^2(H_3)$

1.1.3. Détermination des probabilités de fuite

Sels secs : La figure II.8 donna directement P en fonction de B^2 .

Solutions : Les figures II.4 et II.5 donnant U_r et U_c en fonction de B^2_r et B^2_t , et de la modération, on en déduit $P = U_r \cdot U_c$.

Dans les deux cas, la probabilité de fuite cherchée est : $1 - P$.

1.1.4. Remarque

Si on recherche une probabilité de fuite pour pondérer un angle solide, on peut toujours, ce qui va dans le sens de la sécurité, la majorer, donc minorer P ; ceci revient encore à majorer B^2 ou minorer λ . En particulier, on peut, si l'on ne désire qu'un résultat approximatif, utiliser directement les courbes II.3 avec les dimensions réelles des récipients.

D'autre part, remarquons que, pour pondérer les angles solides, on calcule toujours les probabilités de fuite pour les unités supposées nues.

1.2. Détermination des K_{eff} effectifs

1.2.1. Méthode graphique

On pourra utiliser les courbes de la présente annexe pour une détermination approximative, dans le cas des solutions ou des sels secs ; la méthode des sels secs pourra être étendue aux sels humides car elle est conservative.

On déterminera :

- le K_{∞} à l'aide des figures II.1 ou II.2 ;
- la probabilité antifuite P comme il est indiqué au paragraphe 1.1.

On en tire $K_{eff} = K_{\infty} \cdot P$.

Remarquons que cette fois, si on désire aller dans le sens de la sécurité, il convient de majorer P, donc minorer B^2 ou majorer λ ; il n'est donc plus possible en particulier d'annuler tous les A.

1.2.2. Formule empirique pour les unités nues.

Si on connaît les dimensions critiques nues d'une sphère, d'un cylindre infini, ou d'une plaque infinie, pour une

certaine modération, on peut en déduire le K_{eff} d'unités plus petites à la même modération par la formule suivante :

$$K_{eff} = \frac{r}{r_c}$$

où r et r_c désignent l e a dimensions réelles et critiques de l'unité (rayon de sphère, diamètre de cylindre infini, ou épaisseur de plaque infinie).

Appliquée directement à la masse ou au volume sphériques, la formule devient :

$$K_{eff} = \sqrt[3]{\frac{m}{m_c}} \text{ ou } \sqrt[3]{\frac{v}{v_c}}$$

Cette formule est applicable surtout pour les modérations faibles ou à l'optimum de modération pour la masse ; elle est conservatrice dans presque tous les autres cas.

1.2.3. Autres méthodes

Signalons l'existence de tables de K effectif donnant pour des solutions d'uranium à différents enrichissements, les K effectifs de sphères et de cylindres en fonction de la modération et des dimensions.

Il existe de plus des méthodes élaborées, donnant de manière beaucoup plus précise le K effectif d'unités de forme simple (ou leur dimension critique ou sous critique correspondant à un K_{eff} donné), nécessitant l'emploi de calculateurs électroniques ; ces méthodes pourront toujours être employées en dernier ressort, avec le concours de spécialistes.

II. UNITÉS DE FORME COMPLEXE

11.1. Détermination de K effectifs

L'annexe III indique une méthode dite « de la forme pessimiste » qui permet de ramener de telles unités à une forme géométrique simple.

Si ce procédé est trop grossier, on pourra toujours avoir recours à des méthodes plus élaborées utilisant les calculatrices électroniques.

Le cas d'unités composites (plusieurs formes simples séparées mais considérées comme un tout) s'y rattache ; si l a méthode de la forme pessimiste est trop sévère, on pourra utiliser, avec l'aide de spécialistes, des méthodes plus précises (Codes de Monte-Carlo, par exemple).

11.2. Détermination d'une probabilité de fuite

S'il s'agit de déterminer la probabilité de fuite d'une unité complexe pour pondérer les angles solides de cette unité vers les autres, il conviendra de la majorer, donc d'attribuer à cette unité une forme simple inscrite dans la forme réelle : ce n'est donc pas la même forme pessimiste que pour le K effectif.

Pour une unité composite, on pourra lui attribuer l a probabilité de fuite maximum des éléments composants.

III. K EFFECTIF GLOBAL D'UNE ZONE

Les méthodes habituelles de vérification de l a sécurité d'un ensemble d'unités en interaction ne nécessitent pas le calcul direct du K effectif global de la zone.

Toutefois, dans certains cas, s'il est absolument impossible de concilier les critères habituels d'interaction avec des impératifs d'ordre économique, on pourra avoir recours en dernier ressort à des codes de calcul donnant directement ce K_{eff} global.

Il faut noter que ces méthodes de calcul deviennent rapidement assez onéreuses en temps de machine, dès que le nombre d'unités de la zone devient élevé.

La présentation des données pour l'utilisation de ces programmes est indiquée en Annexe I, paragraphe V.

ANNEXE III

RÉDUCTION DES FORMES GÉOMÉTRIQUES

ÉCRANS MODÉRATEURS ET INTERACTION

I. FORMES ÉQUIVALENTES D'UNE UNITÉ

Pour appliquer à une unité les différents calculs de sécurité exposés dans ce tome, on aura à effectuer plusieurs choix :

- choix des normes de K_{rr} , et ceci, dans la plupart des cas, se ramènera au choix d'une forme équivalente ;
- choix d'une forme équivalente permettant les calculs d'angle solide relatifs à cette unité.

Ces deux formes équivalentes ne sont pas nécessairement identiques.

Pour effectuer ces choix, on appliquera la méthode suivante, d'ailleurs évidente dans son principe

I.1. Méthode de la forme pessimiste

Dans tout calcul de sécurité, on peut remplacer la forme réelle d'une unité par une forme équivalente pessimiste ; pour l'application des normes, cette forme devra augmenter le K_{rr} ; pour les calculs d'angles solides, elle devra augmenter tous les angles solides sous lesquels est vue l'unité.

1° Calculs d'angle solide

La forme pessimiste devra être entièrement circonscrite à la forme réelle.

2° Application des normes de K_{rr}

Toute forme circonscrite est encore une forme pessimiste, mais on peut utiliser aussi dans ce cas une autre forme, moins pessimiste ; celle-ci devra avoir :

- même volume que la forme réelle ;
- un rapport surface/volume inférieur ou égal à celui de la forme réelle.

Exemple : Cylindre de hauteur $2h$, diamètre $2r$.

Une forme circonscrite commode pour les calculs d'angle solide serait la sphère de rayon

$$\sqrt{h^2 + r^2}$$

Mais, pour l'application des normes de K_{rr} , il suffit de prendre la sphère de même volume, c'est-à-dire de rayon égal à

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2}{3} r$$

1.2. Applications de la méthode

1.2.1. Réduction aux formes simples

Si la forme réelle est une forme unique ramassée, il sera en général avantageux d'adopter, en première approximation, la forme simple circonscrite qui correspond à une augmentation de volume minimum.

Si la forme réelle se décompose en plusieurs formes ressemblant à des formes simples, on pourra, pour les calculs d'angle solide, remplacer la forme réelle par l'ensemble de ces formes simples, et pour lui attribuer un K effectif, la remplacer par une forme simple de même volume total, sphère par exemple.

1.2.2. Unités de forme non définie

Ce cas, rencontré dans les problèmes de contrôle par la masse, le volume, ou la concentration, a été développé en détail aux chapitres II et III.

1.2.3. Unités de forme sphérique

La forme sphérique se prête directement à l'application des normes de volume, et permet d'autre part le calcul le plus simple de l'angle solide.

1.2.4. Unités de forme cylindrique

Pour les déterminations de K effectif, les normes de cylindres ne seront pas toujours les plus avantageuses. Soient $2r$ et $2h$ les dimensions du cylindre.

— Si h est petit devant r (cylindres plats), il pourra être avantageux de remplacer le cylindre par le parallélépipède circonscrit, lui-même majoré par la plaque infinie d'épaisseur $2h$: on appliquera donc les normes de plaques.

— Si h et r sont de même ordre de grandeur, on pourra appliquer les normes de volume (ce qui revient à remplacer le cylindre par la sphère de même volume).

— Si h est grand devant r , il sera alors avantageux de majorer le cylindre par celui de même diamètre et de hauteur infinie et d'appliquer les normes de cylindre.

Pour les calculs d'angle solide, on pourra conserver le cylindre réel.

1.2.5. Unités de forme parallélépipédique

Si les 3 dimensions a , b , c , sont du même ordre de grandeur, on appliquera avantageusement les normes de volume.

Si une dimension a est grande devant b et c , on appliquera de préférence les normes de cylindres au cylindre de même section droite, c'est-à-dire de diamètre égal 3 :

$$2 \sqrt{\frac{bc}{\pi}}$$

Si deux dimensions a et b sont grandes devant c , on appliquera alors les normes de plaques avec l'épaisseur c .

Pour les calculs d'angle solide, on pourra conserver le parallélépipède réel ou, si l'unité s'y prête, le remplacer par un cylindre ou même une sphère circonscrite.

II. SÉCURITÉ DES RÉCIPIENTS PROCHES

Nous savons que si deux ou plusieurs unités d'un ensemble ont 3 des distances mutuelles inférieures à 30 cm, la méthode de l'angle solide est impuissante à vérifier la sécurité de leur interaction, tant dans l'air que dans l'eau.

Nous allons montrer, à l'aide de quelques exemples, comment la méthode de la forme pessimiste peut permettre de lever le doute.

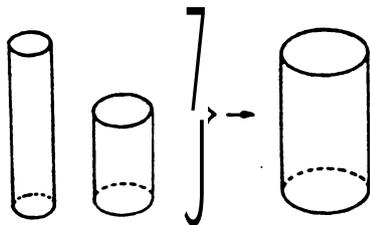
La première étape est toujours de vérifier la sécurité dans l'eau ; nous examinerons ensuite les problèmes de sécurité dans l'air.

II.1. Sécurité dans l'eau

II.1.1. Deux cylindres parallèles

Il s'agit de vérifier la sécurité dans l'eau de ces deux cylindres ; ils vont être remplacés fictivement par un cylindre unique ayant :

- pour hauteur la hauteur maxima des deux cylindres ;
- pour section droite la somme des sections droites des deux cylindres.



Le cylindre fictif est-il bien pessimiste par rapport à l'ensemble réel cylindres + eau ?

- Son volume est supérieur ou égal à la somme des volumes des matériaux fissiles.
- Son rapport surface/volume est plus petit que dans l'ensemble initial.

On connaît mal, par contre, le rapport de modération équivalent de l'ensemble initial à cause de l'effet modérateur de l'eau sur les neutrons d'échange ; toutefois, on sait que la présence de l'eau ne peut qu'augmenter ce rapport vis-à-vis de ceux des unités. Deux cas sont alors à distinguer :

1° Les deux cylindres sont **sur-modérés**, c'est-à-dire que leurs concentrations respectives sont nettement inférieures

à la concentration optimum pour la norme considérée (ici, norme du diamètre). Alors, l'effet modérateur de l'eau ne pourra que diminuer la réactivité de l'ensemble et on pourra attribuer au cylindre fictif la concentration la plus élevée des deux cylindres initiaux.

2° Si l'un au moins des deux cylindres n'est pas sur-modéré il est alors nécessaire d'attribuer au cylindre fictif la concentration pessimiste absolue (quelle que soient les domaines restreints de concentration appliqués dans les unités).

Dans tous les cas, le cylindre fictif aura donc bien un K effectif supérieur à l'ensemble initial ; en le majorant à son tour par le cylindre de hauteur infinie, on pourra appliquer les normes critiques réfléchies pour les cylindres, à la concentration pessimiste déterminée plus haut, et la condition finale de sécurité est :

$$D_1^2 + D_2^2 \leq D_c^2$$

où D_c est le diamètre critique à la concentration pessimiste.

Si les deux cylindres sont égaux, la condition devient :

$$D_1 = D_2 < \frac{D_c}{\sqrt{2}} = 0,71 D_c$$

(Cette dernière condition contient déjà implicitement le coefficient de sécurité 0.85 habituel.)

Remarque. — Si les dimensions des cylindres sont du même ordre de grandeur, on peut appliquer les normes de volume au volume total $\pi r_1^2 h_1 + \pi r_2^2 h_2$ à la concentration pessimiste.

II.1.2. Plusieurs cylindres parallèles de même diamètre

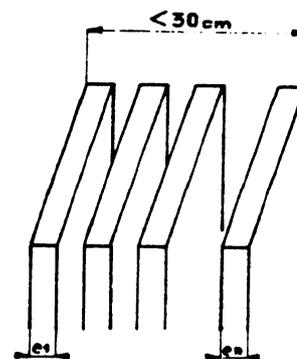
La condition de sécurité s'écrit :

$$D < \frac{D_c}{\sqrt{n}}$$

D_c étant toujours le diamètre critique minimum.

II.1.3. Plusieurs plaques minces parallèles

On peut accoler fictivement les différentes plaques et



comparer alors à la plaque infinie dont l'épaisseur est égale à la somme des épaisseurs individuelles, à condition de lui attribuer la concentration pessimiste déterminée comme au § II.1.1.

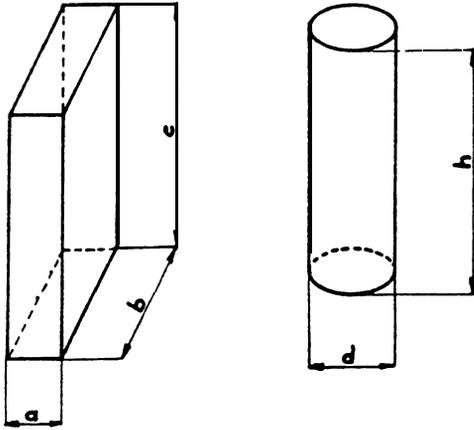
$$e_1 + \dots + e_n < E_c$$

E_c : épaisseur critique minima

II.1.4. Plusieurs formes différentes

On se rapportera toujours à une forme commune la plus avantageuse, en prenant bien soin de diminuer toujours le rapport surface/volume, et de se placer à la concentration pessimiste déterminée suivant le même principe qu'au § II.1.1 ; la concentration optimum de référence sera celle correspondant à la norme correspondant à la forme commune utilisée.

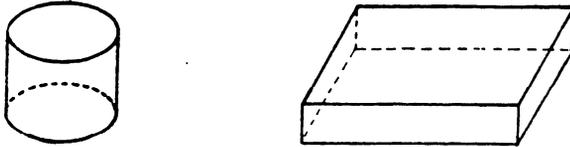
Exemple : Cylindre et parallélépipède allongé



On compare au cylindre de même section droite totale :

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} + ab$$

Cylindre plat et plaque



La plus grande des deux hauteurs devra être inférieure à l'épaisseur critique minima.

Cylindre, plaque et sphère

La somme des volumes devra être inférieure au volume minimum critique.

II.1.5. Limitations de cette méthode

St l'une ou l'autre des conditions suivantes est réalisée :

— les récipients ne contiennent que du plutonium ou de l'uranium enrichi à plus de 10 % (pur ou en composé quelconque),

— la concentration en matériau fissile dans les récipients ne dépasse pas 3.2 g/cm³,

la méthode est toujours applicable.

Dans les autres cas, il se pourrait qu'on se rapproche des conditions optima d'un réseau hétérogène et le procédé serait en défaut.

En particulier, la méthode serait à déconseiller pour traiter un ensemble de plaques minces ou un faisceau de petits cylindres d'uranium métallique faiblement enrichi.

11.2. Sécurité dans l'air

Une fois vérifiée la sécurité dans l'eau d'un groupe de récipients proches, deux cas peuvent se présenter :

1° Les unités proches considérées forment une zone isolée

Alors, il est évident que l'unité fictive équivalente étant sûre dans l'eau, sera sûre a fortiori dans l'air. Aucun calcul de sécurité supplémentaire n'est donc à effectuer.

2° Les unités proches sont en interaction avec d'autres unités

Dans ce cas, la méthode de l'angle solide n'est pas applicable directement ; il faudra auparavant transformer le groupe d'unités proches en une nouvelle unité fictive définie de la manière suivante :

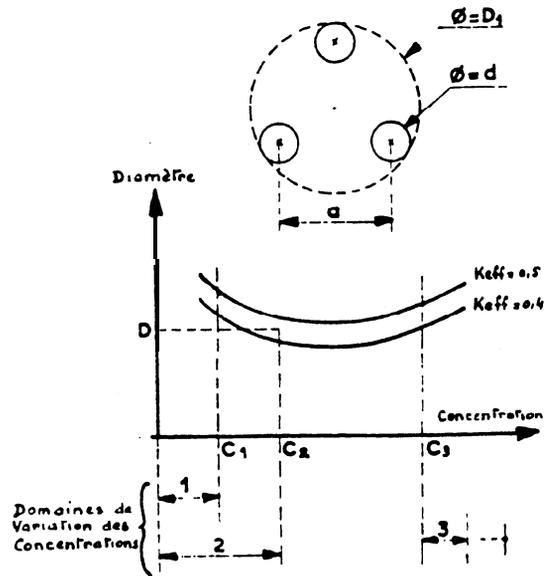
Sa forme sera circonscrite à l'ensemble des unités réelles de manière à majorer les angles solides ;

Sa concentration sera toujours la concentration pessimiste relative aux domaines réels de concentration, car il n'y a plus cette fois à tenir compte d'un effet modérateur supplémentaire dû à l'eau ;

Son K effectif sera déterminé, compte tenu de cette concentration, à l'aide des normes sous-critiques nues appliquées à la forme pessimiste utilisée pour le calcul de sécurité dans l'eau.

On pourra alors poursuivre les calculs de la méthode de l'angle solide avec cette nouvelle unité fictive.

Exemple : 3 cylindres égaux au sommet d'un triangle équilatéral



La forme du cylindre fictif sera un cylindre de diamètre :

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{2a}{3} + d}$$

La concentration du cylindre fictif sera la concentration pessimiste du cylindre réel N° 2.

Le K effectif du cylindre fictif sera celui d'un cylindre de concentration C_2 , et de diamètre

$$D = \sqrt[3]{3}$$

Ici, D étant entre les deux courbes $K_{eff} = 0,4$ et $0,5$, on prendra $K_{eff} = 0,5$.

11.3. Conclusion

La méthode de la forme pessimiste donne toujours ainsi une condition suffisante de sécurité pour les unités proches.

Rappelons donc le processus pour l'étude d'un groupe d'unités proches :

- étude de la sécurité individuelle de chaque unité ;
- étude de la sécurité dans l'eau du groupe à l'aide d'une première unité fictive.

Si le groupe est isolé, le calcul est terminé. Sinon :

- remplacement du groupe par une deuxième unité fictive ;
- application de la méthode de l'angle solide en incluant les autres unités.

III. ÉCRANS MODÉRATEURS ET INTERACTION

Nous avons vu au paragraphe précédent comment on pouvait tenir compte de la présence d'un modérateur entre des unités en interaction.

On peut donner d'autre part une méthode plus précise permettant de traiter les interactions entre unités (espacées d'au moins 30 cm) séparées par des écrans modérateurs de forme plane (sols, etc.).

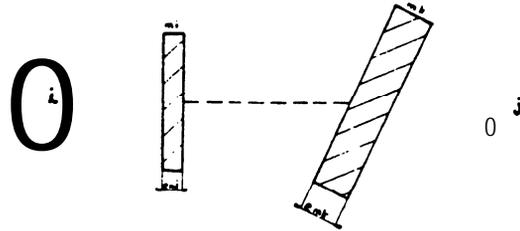
Rappelons qu'en faible épaisseur des matériaux peuvent augmenter la réactivité de l'ensemble ; on a vu au chapitre III § II, un procédé qui permet d'en tenir compte. On propose ici une généralisation de cette méthode, qui permet de tenir compte du fait que, sous une épaisseur moyenne, ces mêmes matériaux peuvent atténuer dans une proportion notable les interactions.

Le procédé consiste toujours à multiplier les angles solides tels que $\Omega_{i \rightarrow j}^{1 \rightarrow 1}$ et $\Omega_{j \rightarrow i}^{1 \rightarrow 1}$ par un facteur Y tenant compte des matériaux modérateurs situés entre les unités i et j.

On détermine pour ces divers écrans une épaisseur équivalente d'eau

$$e_{H_2O} = \sum_k e_{m_k} \frac{d_{m_k}}{d_{H_2O}}$$

où $\frac{d_{m_k}}{d_{H_2O}}$ est le rapport des densités en hydrogène du matériau K et de l'eau.



On lit alors sur la courbe III.1 la valeur de γ en fonction de l'épaisseur équivalente e_{H_2O} .

On remplace ensuite les angles tels que $\Omega_{MAX}^{1 \rightarrow 1}$ par $\gamma \cdot \Omega_{MAX}^{1 \rightarrow 1}$

Remarquons que cette méthode n'introduit pas de restriction supplémentaire quant à l'emploi des variantes de la méthode de l'angle solide ; si par exemple i et j étaient deux cylindres parallèles et de même diamètre, une expression telle que $Y \cdot \Omega^{1 \rightarrow 1} (1-P_1)$ serait tout à fait acceptable.

ANNEXE IV CORRECTIONS DE DENSITÉ

Dans ce guide, nous nous sommes efforcés de donner la plupart des normes en fonction de la concentration, pour des composés fissiles dont les lois de dilution sont représentées par les courbes Puds et Uds. L'utilisation de ces normes, avec sécurité, pour d'autres composés fissiles, dans des domaines de concentration où leurs courbes de dilution ne correspondent pas exactement aux courbes Puds ou Uds, nécessite quelques précautions :

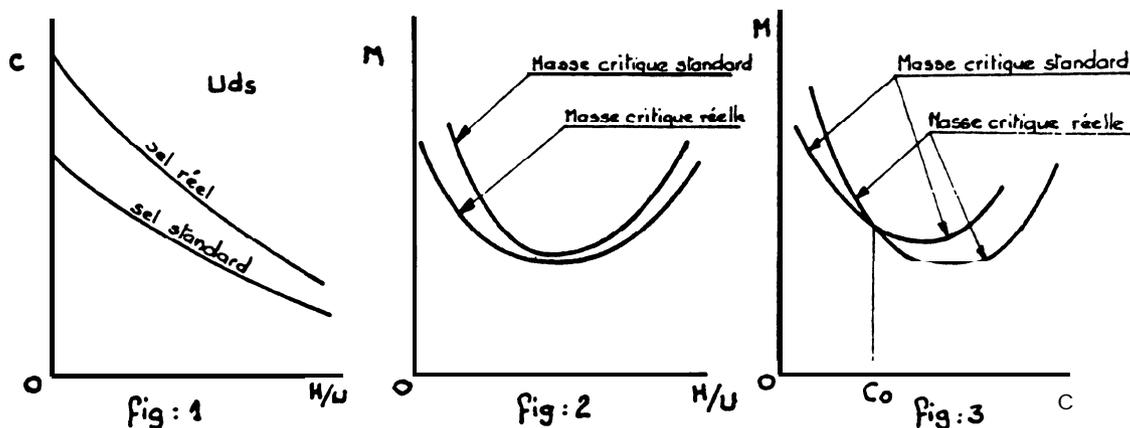
Supposons, en effet, un sel d'uranium dont la courbe de dilution se situe au-dessous de la courbe standard sel (fig. 1).

Pour un rapport de modulation donné, on passe de la courbe standard à la courbe réelle par une augmentation de concentration. Cet effet de densité augmente la réactivité et la courbe critique réelle (courbe de masse par exemple) sera toujours au-dessous de la courbe critique standard

dans le diagramme $M = f\left(\frac{H}{U}\right)$ (fig. 2). Dans ces conditions, on ne pourra pas utiliser sans corrections les normes standard.

Ceci suppose, en toute rigueur, que la composition de la solution réelle soit la même que celle de la solution standard (ici solution d' UO_2F_2 dans l'eau). En fait, si la solution comporte des noyaux différents supplémentaires, on pourra presque toujours négliger leur influence.

Pour une concentration donnée, on passe de la courbe de dilution standard à la courbe réelle par une augmentation du rapport $\frac{H}{U}$. Cet effet peut se traduire, soit par



une augmentation de la réactivité dans la région des fortes concentrations où l'influence de la modulation est prépondérante, soit par une diminution dans la région des faibles concentrations où l'influence de l'absorption par l'hydrogène est prépondérante. Il en résulte que l'on ne sait plus très bien placer la courbe critique réelle par rapport à la courbe standard, dans le diagramme $M = f(c)$. Il pourra se faire, dans certains cas, que ces courbes aient la disposition de la figure 3 et que les normes soient applicables dans un domaine $(0, c_0)$ qu'il s'agit de déterminer.

Inversement, pour un sel dont la courbe de dilution se trouverait au-dessous de la courbe standard, et pour lequel

la norme $M = f\left(\frac{H}{U}\right)$ est toujours applicable il n'est pas impossible que l'on puisse trouver un domaine de concentration où la norme $M = f(c)$ n'aille pas dans le sens de la sécurité.

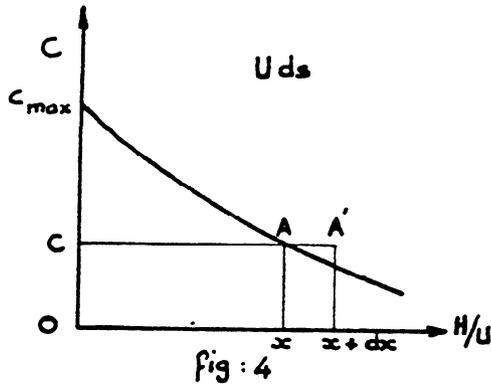
Ainsi il eût été plus souhaitable, du point de vue de la criticité sinon du point de vue du génie chimique, d'utiliser le rapport de modulation et non la concentration.

Il n'en reste pas moins vrai que dans un grand nombre de cas on pourra utiliser directement les normes standard en fonction de la concentration. Nous allons préciser ces cas et voir pour les autres les corrections à faire.

I. EXPOSÉ GÉNÉRAL DU PROBLÈME

Dans la suite de cet exposé et sans cependant en restreindre la portée générale, nous continuerons à raisonner sur des sels d'uranium, en utilisant le paramètre masse et la courbe standard U (93,5) RM par exemple. Pour simplifier l'écriture nous poserons $x = \frac{H}{U}$ rapport de modération.

A un couple de valeurs (x, c) correspond une masse critique $M = f(x, c)$. La courbe de dilution standard (fig. 4)

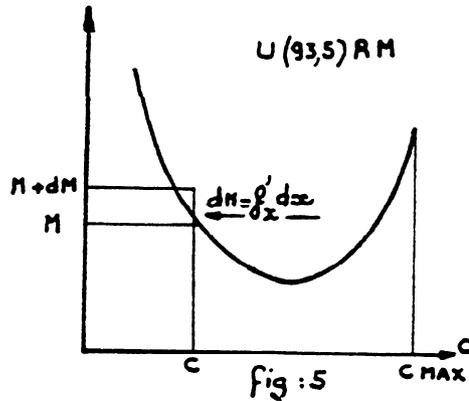


peut être caractérisée par une relation de la forme $x = x(c)$ et la masse critique standard par la courbe : $M = f[x(c), c] = h(c)$ (fig.5)

Considérons un point A de la courbe de dilution Uds correspondant à la concentration c et la modération x (fig. 4) la masse critique correspondante sera $M = f(x, c)$ et la pente de la tangente sera :

$$\frac{dM}{dc} = f_c(c, x) + x'(c) f_x(c, x)$$

si on considère maintenant un point A' voisin de A. de même concentration c mais de modération $x + dx$, la varia-



tion de masse critique sera $dM = f_x dx$ et on pourra appliquer avec sécurité la norme du point A au point A' si :

$$dM = f_x dx = \left[\frac{dM}{dc} f_c(c, x) \right] \frac{dx}{x'(c)} > 0$$

Mettons maintenant en évidence une propriété rappelée plus haut : à toute augmentation de densité, à modération constante, la valeur critique du paramètre diminue.

En fait, on peut montrer que la fonction $f(x, c)$ est de la forme

$$f(x, c) = \frac{g(x)}{C^{n(x)}} = M(x, c) \text{ avec } n(x) > 0$$

d'où

$$f'_c(x, c) = -\frac{n(x) g(x)}{C^{n(x)+1}} = -\frac{n(x) M}{C}$$

Il faut donc discuter le signe de

$$\left[\frac{dM}{dc} + \frac{n(x) M}{C} \right] \frac{dx}{x'(c)}$$

Notons que, pour la plupart des courbes de dilution, $x'(c)$ est toujours négatif.

Dans ces conditions on appliquera avec sécurité la norme standard du point (x, c) au point (x + dx, c) si

$$\left[\frac{dM}{dc} + \frac{n(x) M}{C} \right] dx < 0$$

ou d'une manière plus générale si

$$\left[\frac{dP}{dc} + \frac{n(x) P}{C} \right] dx < 0$$

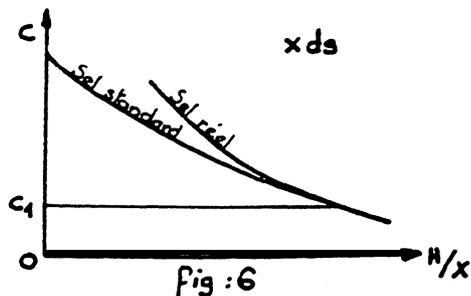
P étant un des paramètres masse ou géométrie.

La discussion de cette inégalité est résumée dans le graphique ci-dessous avec les hypothèses suivantes :

— C_1 est la concentration du point de recroisement de la courbe de dilution du sel réel et du sel standard. La norme standard est, par conséquent, toujours applicable au sel réel pour des concentrations $C < C_1$.

— C_2 est la valeur de la concentration définie de la manière suivante : à C_2 correspond la valeur $P = h(C_2)$ de la courbe de norme. La tangente à cette courbe au point (P, C_2) doit être

$$\frac{dP}{dc} = -\frac{n(x) P}{C_2} < 0$$



Remarquons qu'à C_2 ne peut se situer que dans un domaine de concentration où la courbe de norme $P = h(c)$ est une fonction décroissante de c (on verra plus loin une détermination de C_2).

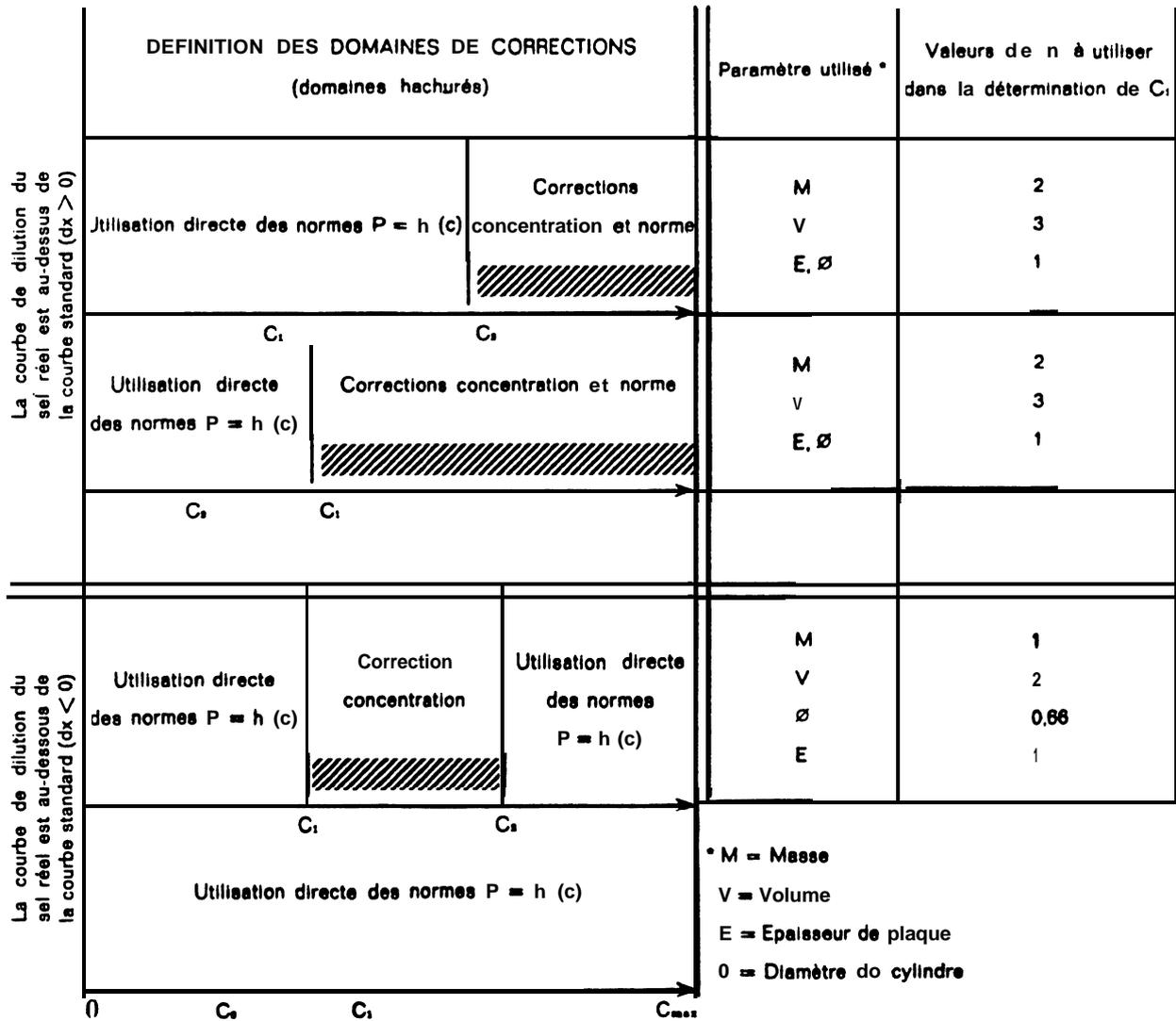


Fig. 7

Dans les domaines de concentration hachurés, on ne peut utiliser directement les normes données en fonction de la concentration. Il conviendra alors de faire des corrections de concentration et éventuellement de normes.

II. DÉTERMINATION DE LA CONCENTRATION C_2 LIMITANT LES DOMAINES DE CORRECTIONS

C_2 est solution des équations $P = h(c)$ (courbe de norme) et $\frac{dP}{dc} + \frac{n(x) P(x, c)}{C} = 0$, où $n(x)$ est une fonction du rapport de modération ; on peut cependant le supposer constant à condition de choisir une valeur allant dans le sens de la sécurité, c'est-à-dire donnant des valeurs de C_2 qui augmentent l'étendue des domaines hachurés du graphique précédent (domaines où des corrections sont nécessaires). Ces valeurs sont indiquées dans la fig. 7. C_2 est

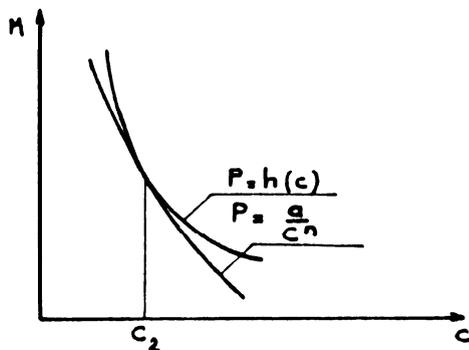


fig. 8

l'abscisse du point de tangence de la courbe de norme $P = h(c)$ et d'une hyperbole de la famille $\frac{a}{C^b}$ (fig. 8).

En fait, la courbe de norme étant presque toujours tracée

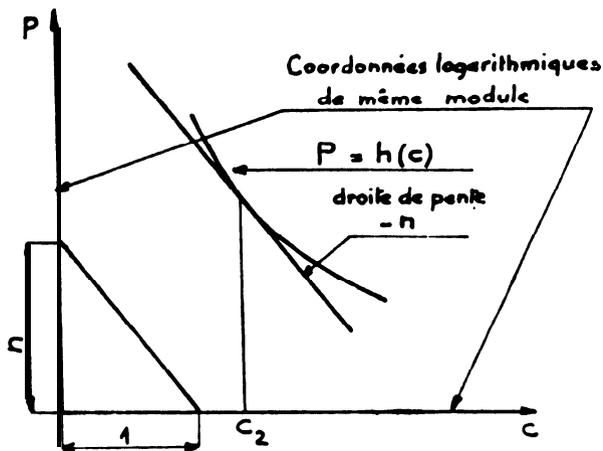


fig. 9

sur un graphique à coordonnées logarithmiques et de même module, il suffira de déterminer le point de tangence de la courbe de norme avec une droite de pente $-n$ (fig. 9).

III. UTILISATION DES NORMES DANS LES DOMAINES DE CORRECTIONS

III.1. Corrections de concentration

Si on se trouve dans un domaine de concentration hachuré (fig. 7) il faudra dans tous les cas faire une correction de concentration de façon à utiliser les normes à H/X constant.

Il faut faire correspondre à toute concentration c du sel réel, quelle que soit la position de sa courbe de dilution par rapport à la courbe standard, une concentration c_1

du sel standard (correspondant au même $\frac{H}{X}$) et définir

les domaines restreints de concentrations à partir de ces concentrations ainsi modifiées.

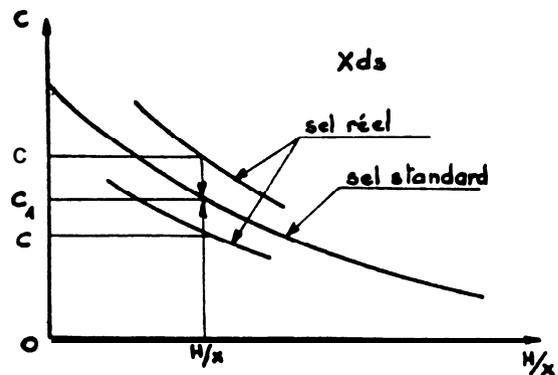


fig. 10

En particulier pour les solutions organiques ayant une teneur en hydrogène plus faible que celle de l'eau, il conviendra de faire cette correction pour les concentrations critiques limites (courbes URC et PuRC).

III.2. Corrections de normes

Il faudra en plus, lorsque la courbe de dilution réelle est au-dessus de la courbe standard, faire une réduction de normes :

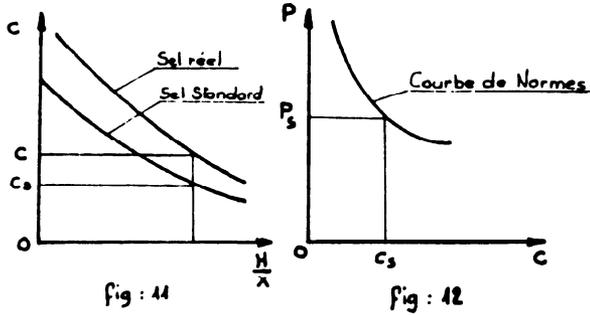
si P_1 est la norme standard correspondant à la concentration

c., on appliquera la norme P au sel réel ayant la concentration c.

$$P = P_s \times \left(\frac{C_s}{c} \right)^n$$

n ayant les valeurs ci-contre selon la nature de P .

Nature de P	n
Masse	2
Volume	3
Épaisseur plaque	1
Ø cylindre	1



IV. UTILISATION DES NORMES DANS LE CAS OU LE SOLVANT EST DE L'EAU

Dans ce cas, on a presque toujours $C_s < C$. On n'aura donc pas à déterminer de concentration C_s . Si la courbe de dilution du sel réel est toujours au-dessous de la courbe standard, on pourra utiliser directement les normes en fonction de la concentration. Dans le cas contraire, il faudra faire les corrections de concentration et de norme dans le domaine de concentration où la courbe de dilution réelle est au-dessus de la courbe standard.

Manuscrit reçu le 14-10-1966