

Etude allemande sur les risques que présentent les centrales nucléaires

par A. Birkhofer

En août 1979 paraissaient les résultats de l'étude allemande sur les risques que présentent les centrales nucléaires. Le rapport principal, qui explique la méthode suivie dans l'étude et les résultats de celle-ci, a paru dès la fin de 1979.

L'étude, réalisée pour le compte du Ministre de la recherche et de la technologie de la République fédérale d'Allemagne, devait, dans la mesure du possible, appliquer les méthodes de l'étude faite aux Etats-Unis sur la sûreté des réacteurs (WASH-1400) aux conditions propres aux centrales allemandes et à leurs sites.

Une transposition directe des résultats de l'étude faite aux Etats-Unis n'a pas été jugée opportune pour deux raisons principales:

- Il existe bon nombre de différences entre la conception des centrales de référence de l'étude WASH 1400 (Surry-1, Peach Bottom-2) et celle des centrales nucléaires allemandes.
- La densité moyenne de population de la République fédérale d'Allemagne est plus de dix fois supérieure à celle des Etats-Unis. A proximité des centrales le rapport est d'environ 3 pour 1.

Le maître d'œuvre de l'étude était la Gesellschaft für Reaktorsicherheit qui a fait la majeure partie de l'analyse des centrales. Le Kernforschungszentrum Karlsruhe a effectué les calculs des conséquences des accidents et, en ce qui concerne les effets des rayonnements sur la santé, c'est la Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung qui a apporté son assistance. D'autres organismes ont participé à l'étude en se chargeant de problèmes spécifiques.

L'installation utilisée comme référence dans la partie technique de l'analyse était un réacteur à eau légère sous pression de type KWU*, Biblis-B, d'une puissance thermique de 3750 MW, dont l'exploitation industrielle a commencé en mars 1976.

Le calcul du risque collectif que présentent les accidents de réacteurs a porté sur un total de 25 installations réparties sur 19 sites différents de la République fédérale d'Allemagne. Il s'agissait de toutes les installations produisant 600 MW d'électricité ou plus et qui étaient exploitées, en construction, ou pour lesquelles une procédure d'autorisation était en cours au 1er juillet 1977. Pour faciliter l'étude, on a supposé que les 25 centrales étaient toutes techniquement identiques à la centrale de référence.

* Kraftwerk Union AG.

M. A. Birkhofer est Professeur à l'Université technique de Munich et Président de la Commission de sûreté des réacteurs de la République fédérale d'Allemagne.

Méthodes et résultats de l'étude

Chaque risque peut se caractériser par la probabilité et l'ampleur des dommages qu'il peut entraîner. En ce qui concerne les centrales nucléaires, aucun de ces éléments ne peut être défini directement par l'expérience acquise. En plus de 25 ans d'exploitation de réacteurs, de nombreux incidents de fonctionnement et même quelques accidents graves se sont produits, mais personne n'a jamais été tué ou blessé à l'extérieur d'une centrale par suite d'un accident nucléaire.

En conséquence, seuls des moyens analytiques permettent d'évaluer le risque qui subsiste en dépit de mesures de sûreté considérables.

Les principes de sûreté appliqués dans les centrales nucléaires garantissent qu'aucun accident n'entraîne de rejet dangereux de matières radioactives dans l'environnement aussi longtemps qu'un minimum de systèmes redondants de sûreté incorporés fonctionne convenablement. Une analyse de risque doit donc délibérément envisager des défaillances des systèmes de sûreté, ces défaillances étant les seuls événements pouvant entraîner un rejet de produits de fission et contribuer ainsi au risque.

Une étude rapide de l'inventaire des matières radioactives d'une centrale nucléaire montre que, en moyenne dans le temps, les produits de fission contenus dans le cœur du réacteur constituent 95% environ de l'inventaire total. C'est pourquoi il convient d'étudier avant tout les événements pouvant entraîner d'importants rejets de produits de fission hors du cœur.

Une estimation des risques peut négliger les rejets tant qu'il n'y a pas endommagement ni, surtout, fusion du cœur. En conséquence, une analyse des risques doit porter sur les excès d'échauffement graves du cœur dont la prévention est un objectif primordial pour la sûreté d'un réacteur.

On regroupe généralement en deux catégories les "événements générateurs" pouvant conduire à un endommagement du cœur par insuffisance du refroidissement:

- i) accidents par perte de fluide de refroidissement dus à une fuite ou une rupture du système de refroidissement du réacteur;
- ii) transitoires entraînant un déséquilibre entre la chaleur produite dans le cœur et la chaleur évacuée du cœur et dus à des événements autres que les accidents par perte de fluide de refroidissement.

Il est plus que probable qu'à la suite d'un événement générateur, la centrale sera ramenée à un état de sûreté au moyen des systèmes de commande et de sûreté. Toutefois, si les systèmes indispensables pour assurer un refroidissement suffisant du cœur ont une défaillance, il en résultera un excès d'échauffement et, finalement, une fusion du cœur. Selon l'événement générateur, une telle situation peut résulter de la défaillance successive d'un certain nombre de systèmes différents. En ce qui concerne les transitoires de fonctionnement, le déclenchement des systèmes de sûreté ne sera en principe nécessaire que si les systèmes de commande ont une défaillance. Des événements plus graves nécessitent cependant un déclenchement immédiat des systèmes de sûreté.

Pour pouvoir clairement consigner les différentes séquences d'événements que peut entraîner un "événement générateur", on a établi des "arbres d'événements". Le tronc de l'arbre d'événements représente l'événement générateur. L'arbre se ramifie en des points où l'événement est déterminé par le bon fonctionnement ou la défaillance des différents systèmes. Les branches de l'arbre représentent donc les séquences d'accidents possibles. La fréquence de chaque séquence d'accident est déterminée par la fréquence de "l'événement générateur" et par la probabilité de bon fonctionnement ou de défaillance des systèmes concernés.

26 **Tableau 1. Résumé des résultats de l'analyse des "arbres d'événements"**

Evénement générateur d'accident	Probabilité de "l'événement générateur" par réacteur et par an (P_1)	Probabilité de défaillance des fonctions de sûreté nécessaires (P_2)	Probabilité de fusion du cœur par réacteur et par an ($P_3 = P_1 \times P_2$)
Accident par perte de fluide de refroidissement important	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	5×10^{-7}
Accident par perte de fluide de refroidissement moyen	8×10^{-4}	$2,3 \times 10^{-3}$	2×10^{-6}
Accident par perte de fluide de refroidissement léger	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$5,7 \times 10^{-5}$
Interruption de l'alimentation à l'extérieur du site	1×10^{-1}	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Interruption de l'alimentation principale en eau	8×10^{-1}	4×10^{-6}	3×10^{-6}
Cas de fonctionnement avec alimentation de secours avec petite fuite au générateur de pression	$2,7 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-2}$	7×10^{-6}
Autres transitoires avec petite fuite au générateur de pression	1×10^{-3}	2×10^{-3}	2×10^{-2}
Transitoires prévus sans arrêt d'urgence	3×10^{-5}	3×10^{-2}	1×10^{-6}

La fréquence des transitoires est évaluée principalement en fonction de l'expérience d'exploitation. Les données utilisées proviennent de la documentation relative aux accidents par perte de fluide de refroidissement.

Les systèmes de sûreté des centrales nucléaires sont conçus pour fonctionner avec un très haut degré de fiabilité. Aussi, l'expérience directe ne permet pas généralement de connaître les probabilités de défaillance de ces systèmes. Ces probabilités ont donc été calculées au moyen d'analyses par "arbres de défaillances". Un "arbre de défaillances" montre l'interaction fonctionnelle des composants des systèmes sous forme de structure logique. En fonction de cette structure, il est possible de calculer la probabilité de la défaillance du système à partir de l'indisponibilité des composants. En principe, l'influence des actions humaines et des chocs extérieurs peut également être prise en compte.

L'analyse de fiabilité doit déterminer la partie du système redondant qui sera suffisante pour accomplir la fonction requise. A cet effet, l'étude utilise l'analyse de sûreté de la procédure d'autorisation. On a supposé qu'un système redondant avait une défaillance totale si le nombre de sous-systèmes disponibles était inférieur au nombre de sous-systèmes considérés dans l'analyse de sûreté. Il existe de bonnes raisons de croire que, dans la réalité, l'intégrité du cœur sera préservée malgré la détérioration des systèmes.

Il a déjà été indiqué que, pour l'analyse des risques, il faut surtout rechercher les événements qui conduisent à une fusion du cœur du réacteur. En effet, ce n'est que dans ce cas qu'il peut y avoir rejet d'une quantité importante de produits de fission.

Pour calculer la fréquence de fusion du cœur, l'étude envisage en détail quelque 70 séquences d'accidents. En réunissant tous les événements pouvant contribuer à une fusion du cœur, on est parvenu à une fréquence générale de fusion d'environ 9×10^{-5} par an. Le tableau 1 résume les résultats des analyses par "arbres d'événements" et par "arbres de défaillances". La figure 1 montre l'influence relative de différents événements générateurs sur cette fréquence générale de fusion du cœur.

Une perte de fluide de refroidissement principal due à une petite fuite d'une conduite du réacteur l'emporte sur toutes les autres causes d'accidents, essentiellement pour les raisons suivantes:

- les petites fuites peuvent se produire plus fréquemment que les ruptures moyennes ou importantes;
- le système secondaire sert à évacuer la chaleur de désintégration et à refroidir le réacteur. Dans la centrale de référence, le fonctionnement de ce système doit être amorcé et commandé par les opérateurs. Ceci réduit sensiblement la fiabilité du système.

Les transitoires représentent, par ordre d'importance, la deuxième cause de fusion, l'arrêt de l'alimentation à l'extérieur du site jouant un grand rôle à cet égard.

Pour de nombreux transitoires, il faut s'attendre à une augmentation de la pression du système primaire. L'actionnement du mécanisme de décompression ou des soupapes de sûreté peut s'avérer nécessaire pour protéger le système d'une surpression excessive. Dans ce cas, un transitoire peut donner lieu à une petite fuite si la soupape ne se referme pas après avoir été ouverte. Cette séquence d'événements jouait un rôle majeur au moment de la publication des résultats provisoires de l'étude en novembre 1977, mais les améliorations apportées aux centrales en ont considérablement réduit la probabilité.

Il n'est pas surprenant que l'éventualité d'une rupture importante soit très limitée. Cet accident est largement étudié depuis de nombreuses années en tant que base de conception et les systèmes de sûreté incorporés ont été optimisés pour lui faire face.

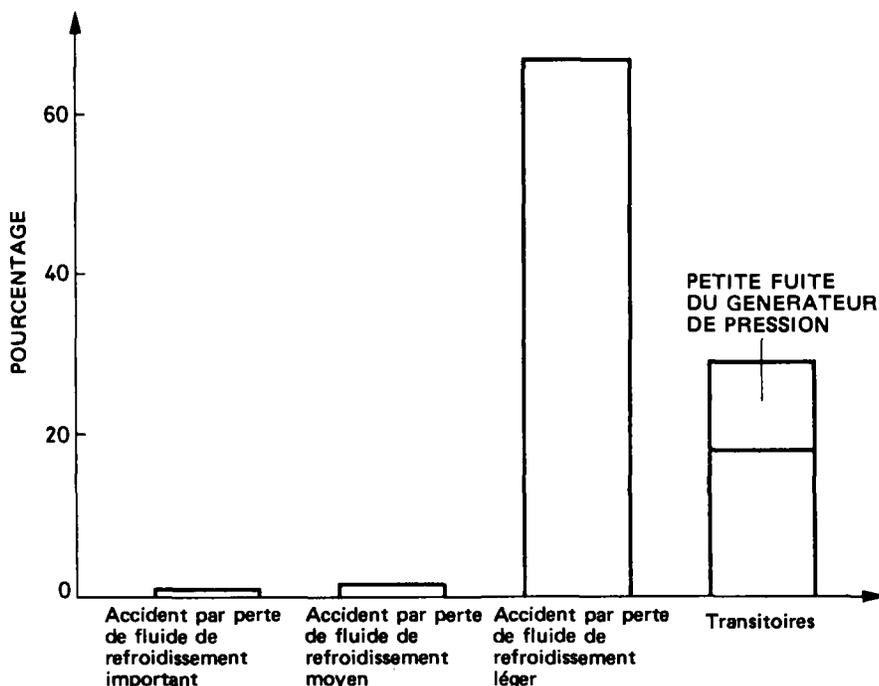


Figure 1. Contribution relative de divers événements générateurs d'accidents à la probabilité d'une fusion du cœur.

A la suite du rejet de produits de fission hors du cœur, les processus de dépôt dans l'atmosphère de confinement et le degré d'intégrité de l'enceinte de confinement déterminent l'importance du rejet à l'air libre des produits de fission.

Au cours de la fusion, de la matière fondue tomberait au fond de la cuve sous pression. On suppose que la chaleur de désintégration du combustible fondu suffit pour que celui-ci traverse par fusion le fond de la cuve sous pression du réacteur et pénètre même les structures en béton du puits du réacteur ainsi que les fondations de l'enceinte de confinement. On a calculé que la traversée par fusion des fondations du bâtiment du réacteur surviendrait 100 heures environ après le début de l'accident.

Pendant la fusion et la traversée par fusion, non seulement une partie du stock radioactif est rejetée hors du cœur, mais il se forme également d'importantes quantités de vapeur et d'hydrogène, ce qui accroît la pression et la température de l'enceinte de confinement. On a calculé que, 25 heures environ après le début de l'accident, l'enceinte de confinement se romprait sous l'effet de la surpression.

Avant cette "défaillance tardive par surpression", l'enceinte de confinement peut perdre son intégrité du fait de la perte d'isolation ou d'une "explosion de vapeur". Lorsque le cœur fondu tombe dans l'eau du bas de la cuve, cette eau s'évapore rapidement. Toutefois, un dégagement d'énergie suffisant pour compromettre l'intégrité du système primaire suppose une fragmentation très fine de grandes parties du cœur fondu.

En combinant les résultats de l'analyse de la fusion du cœur et de l'analyse du comportement de l'enceinte de confinement, on détermine l'importance et la fréquence des rejets de produits de fission de la centrale dans l'atmosphère.

Tableau 2. Délai s'apparition du rejet et probabilités des catégories de rejet

Numéro de catégorie du rejet	Description	Délai d'apparition du rejet (en heures)	Probabilité ¹ par réacteur et par an (moyenne)
1	Fusion du cœur, explosion de vapeur	1	2×10^{-6}
2	Fusion du cœur, grosse fuite de l'enceinte de confinement (300 mm ϕ)	1	6×10^{-7}
3	Fusion du cœur, fuite moyenne de l'enceinte de confinement (80 mm ϕ)	2	6×10^{-7}
4	Fusion du cœur, petite fuite de l'enceinte de confinement (25 mm ϕ), "Défaillance tardive par surpression de l'enceinte de confinement"	2	3×10^{-6}
5	Fusion du cœur, "défaillance tardive par surpression de l'enceinte de confinement", défaillance des systèmes de filtration	25	2×10^{-5}
6	Fusion du cœur, "défaillance tardive par surpression de l'enceinte de confinement"	25	7×10^{-5}
7	Accident de référence, grosse fuite de l'enceinte de confinement (300 mm ϕ)	0	1×10^{-4}
8	Accident de référence ²	0	1×10^{-3}

¹ Probabilités calculées compte tenu d'une contribution de 10% correspondant à des catégories de rejet voisines.

² Sans fusion du cœur.

Pour simplifier la suite de l'analyse, on a regroupé les séquences d'accidents en plusieurs catégories de rejet selon le mode de défaillance de l'enceinte de confinement qu'elles entraînent.

Les caractéristiques de ces catégories sont indiquées dans le tableau 2:

Les catégories 1 à 6 comprennent les accidents par fusion du cœur. La probabilité qu'une fusion du cœur soit suivie d'une "défaillance tardive par surpression" de l'enceinte de confinement est de 95%. Les événements correspondants constituent les catégories 5 et 6.

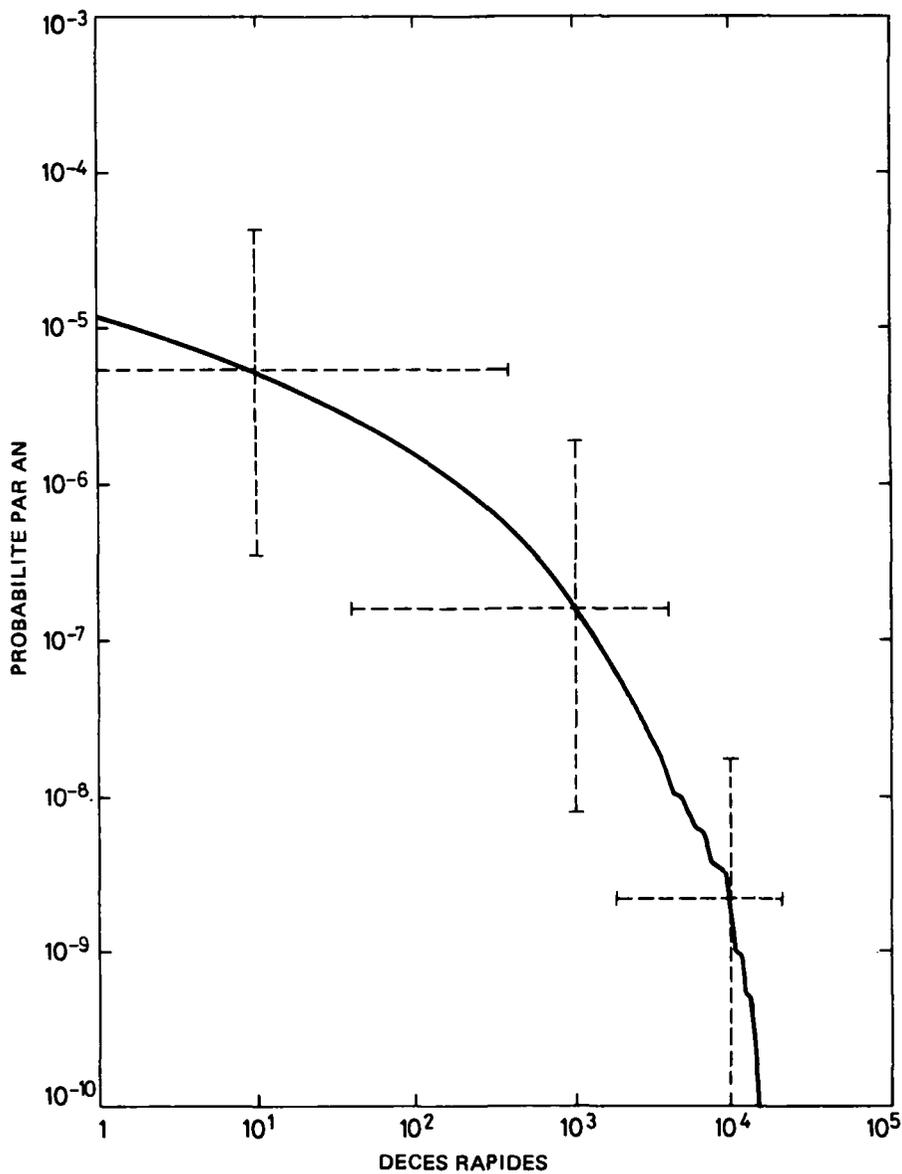


Figure 2. Fonction de distribution cumulative complémentaire pour les décès rapides par an pour 25 centrales (les lignes en tirets indiquent des intervalles de confiance de 90%).

Dans la catégorie 5, on suppose qu'une défaillance des systèmes de filtration précède la "défaillance tardive par surpression" de l'enceinte de confinement. Les catégories 2 à 4 comprennent les accidents par fusion du cœur avec perte d'isolation de l'enceinte de confinement, les fuites étant provoquées par une gamme d'orifices allant de 300 mm d'équivalent de diamètre (grosses fuites) à 25 mm d'équivalent de diamètre (petites fuites). Dans ces cas, en particulier pour une grosse fuite, les rejets de produits de fission sont sensiblement plus importants que ceux indiqués dans les catégories 5 et 6. La catégorie 1 comprend les rejets les plus graves. On a supposé que la cuve sous pression du réacteur et l'enceinte de confinement étaient gravement endommagées par une explosion de vapeur survenant après la fusion du cœur. Au stade actuel, les analyses et l'expérience montrent qu'un tel événement est extrêmement improbable. Toutefois, on a très prudemment émis l'hypothèse que, tout comme dans l'étude WASH-1400, une fusion du cœur suivie d'une explosion de vapeur détruisant l'intégrité de l'enceinte de confinement représentait une probabilité de 2%.

Par ailleurs, l'analyse des accidents par perte de fluide de refroidissement suppose que les systèmes de secours pour le refroidissement du cœur assurent un refroidissement suffisant. Ces événements sont groupés dans les catégories 7 et 8. Des produits de fission ne sont rejetés que par suite de ruptures de gaine hypothétiques. Pour la catégorie 7, on a supposé une perte d'isolation de l'enceinte de confinement due à une grosse fuite. La partie technique de l'étude est suivie d'une analyse de la dispersion des produits de fission par voie et diffusion atmosphériques. Les conditions météorologiques ont été établies d'après des données réelles portant sur divers secteurs météorologiques. Pour finir, on a calculé les radioexpositions résultant de ces accidents, leurs effets sur la santé et, d'après des données démographiques, le nombre d'individus affectés. Pour cela, on a tenu compte des procédures d'intervention en cas d'urgence établies sur la base des recommandations gouvernementales existant en République fédérale d'Allemagne.

Principaux résultats des calculs relatifs aux conséquences

Les principaux résultats des calculs relatifs aux conséquences peuvent se résumer comme suit:

La figure 2 indique la relation entre le nombre et la fréquence des accidents mortels que peut entraîner une radioexposition du public à la suite d'un accident par fusion du cœur. Avec 25 centrales en fonctionnement, la fréquence de ces accidents a été évaluée à environ 10^{-5} par an. Ce chiffre permet de conclure que des événements aux conséquences importantes sont extrêmement peu probables.

En ce qui concerne les résultats, on a tenté, dans cette étude, de quantifier les intervalles de confiance qui sont indiqués en des points sélectionnés.

Les taux de fréquence très faibles calculés dans l'étude résultent de la convergence de plusieurs facteurs (figure 3).

Si l'on considère un total de 25 centrales, les calculs indiquent une fréquence de fusion du cœur de 1 sur 400 par an. Dans la plupart des hypothèses d'une fusion du cœur, l'enceinte de confinement limite très efficacement le rejet de produits de fission dans l'atmosphère. Il n'y a qu'une chance sur seize que des doses potentiellement mortelles se produisent à la suite d'une grave défaillance de l'enceinte de confinement. Dans ce cas, les conséquences dépendraient des conditions météorologiques et de la répartition de la population. Il y a une chance sur dix que des décès surviennent rapidement à la suite d'une grave défaillance de l'enceinte de confinement.

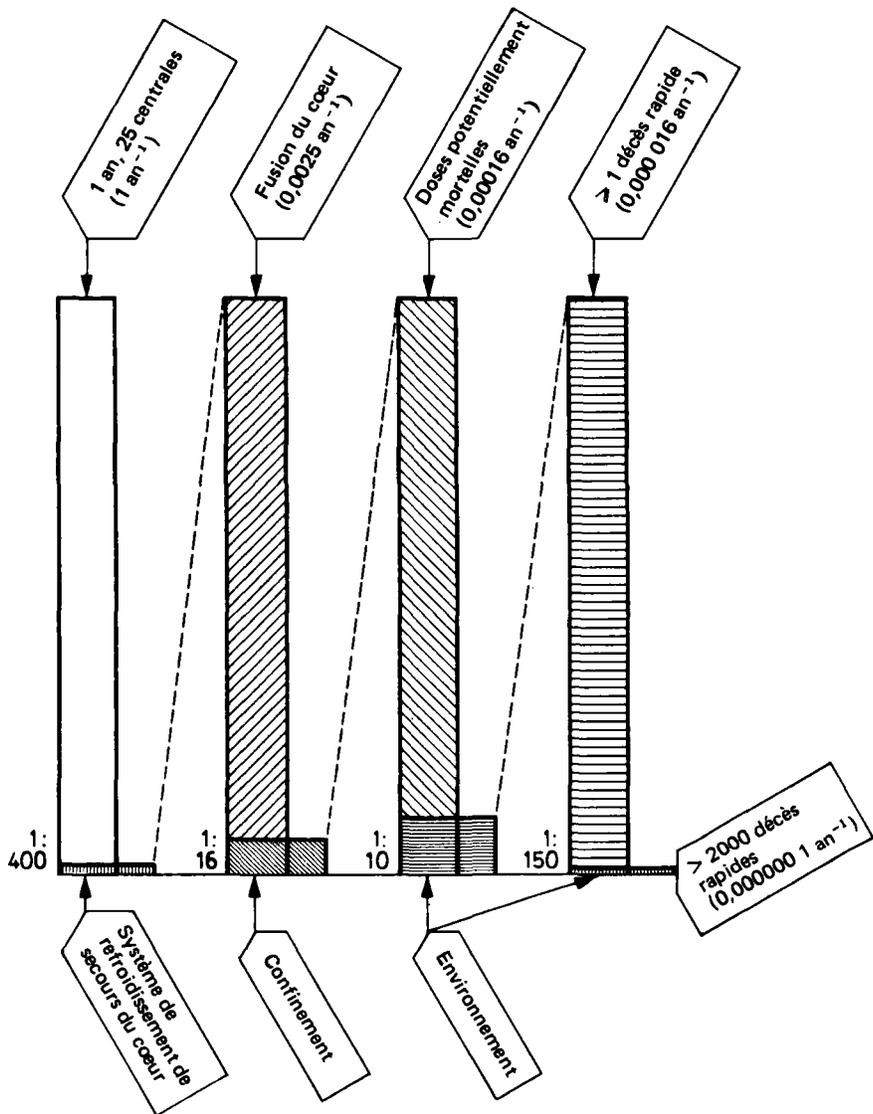


Figure 3. Fréquence des conséquences des accidents (par an, pour 25 centrales)

En tout, il existe plus de 99 chances sur 100 pour qu'une fusion du cœur n'entraîne pas de décès rapides. Un grand nombre de décès ne se produirait que si de mauvaises conditions atmosphériques coïncidaient avec des caractéristiques de site défavorables et des accidents extrêmement graves. La probabilité d'événements aux conséquences importantes est donc très faible.

La situation est différente en ce qui concerne les effets tardifs sur la santé. Les calculs font également apparaître un grand nombre de décès tardifs pour des accidents moins graves (figure 4). Il ne faut pas perdre de vue que l'étude utilise une relation linéaire dose-risque.

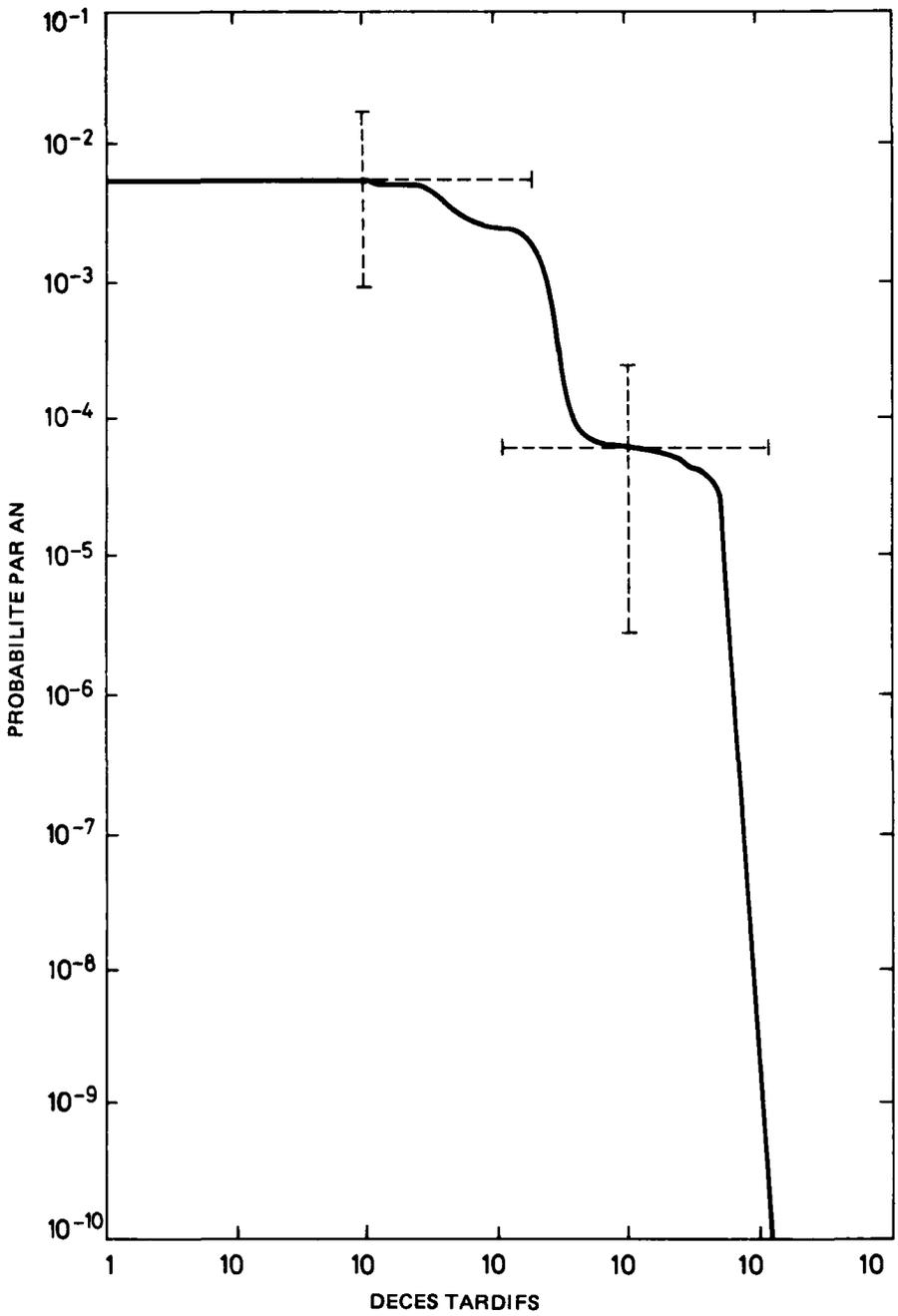


Figure 4. Fonction de distribution cumulative complémentaire pour les décès tardifs par an, pour 25 centrales (les lignes en tirets indiquent des intervalles de confiance de 90%).

Cela signifie que la moindre radioexposition est également censée accroître les risques de cancers.

Les effets tardifs des rayonnements sur la santé n'apparaîtraient qu'après un délai de 10 à 20 ans et se feraient sentir sur de vastes secteurs et pendant plusieurs décennies.

En moyenne, la moitié environ des effets des accidents pourrait se faire sentir hors de la République fédérale d'Allemagne. Ceci met en lumière l'importance internationale de la sûreté des réacteurs. Il convient peut-être de situer dans son contexte le nombre d'effets tardifs calculé dans l'étude. Si l'on applique la relation linéaire dose-risque utilisée dans l'étude, on peut en déduire qu'un demi pour cent environ de tous les cancers mortels sont dus aux rayonnements naturels. Bien qu'il s'agisse là d'un pourcentage relativement faible, le nombre de décès pour toute une durée de vie, c'est-à-dire 71 ans, est de plus de 50 000 pour l'Allemagne et d'environ 600 000 pour l'Europe.

Conclusions

Les analyses de risques sont un moyen tout à fait nouveau, mais efficace, d'évaluer le niveau de sûreté des grands systèmes techniques. Les marges d'incertitude des résultats obtenus restent considérables, mais ces analyses n'en donnent pas moins des informations intéressantes, à condition de les interpréter en tenant compte des limites des méthodes employées. L'étude considérée a permis de définir un certain nombre d'améliorations possibles des systèmes de la centrale de référence. Dans certains cas, on pourrait obtenir une réduction appréciable de la probabilité de fusion du cœur en apportant de légères modifications à la conception de la centrale.

Les résultats généraux de l'étude permettent une première évaluation comparative des risques que présentent différentes sources. Si on ne peut pas, en théorie, exclure purement et simplement la possibilité d'accidents nucléaires aux graves conséquences, l'étendue possible des effets pour la santé n'est pas, d'après les calculs de l'étude, supérieure à celle que peuvent avoir d'autres accidents d'origine naturelle ou humaine. Quoi qu'il en soit, les probabilités de catastrophe nucléaire restent très faibles et cette conclusion confirme celle de l'étude WASH-1400.