

CRISTAL : UN OUTIL DE CALCUL DE CRITICITÉ DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Le risque de criticité existe dans les installations nucléaires et les emballages de transport dès lors que des quantités significatives de matières fissiles sont mises en œuvre au cours des opérations de fabrication, d'entreposage, de transport ou de traitement. Pour évaluer ce risque, un ensemble intégré de logiciels de calcul de sûreté-criticité de nouvelle génération, baptisé Cristal, a été mis au point.

Les conditions de criticité

L'évaluation des conditions de **criticité** d'un système passe avant tout par l'étude du comportement de la population **neutronique** et par le traitement des équations de la neutronique, en particulier de celle du **transport** des neutrons dans la matière. Le physicien "criticien" s'intéresse au **facteur de multiplication effectif k_{eff}** , en vue de montrer que toutes les dispositions sont prises pour éviter la criticité, c'est-à-dire que k_{eff} reste strictement inférieur à 1. La résolution d'un problème ou d'une classe de problèmes de criticité nécessite de mettre en œuvre des données nucléaires de base, connues avec une plus ou moins bonne précision, et une suite hiérarchisée de modèles de représentation des phénomènes neutroniques.

Développer un formulaire de nouvelle génération

Au milieu des années quatre-vingt-dix, dans le domaine de la criticité, les outils de calcul employaient des données et des **logiciels de calcul** développés au cours des années 70-80, comme par exemple la bibliothèque de données CEA86 et le logiciel de calcul Apollo1, et ne pouvaient satisfaire les besoins futurs. Leur pérennité à terme n'était pas garantie en raison notamment de leurs domaines d'application trop restreints pour traiter les besoins nouveaux envisageables tels que les combustibles **MOX**, les combustibles



CEA

à haut **taux de combustion**, ainsi que ceux générés par les recherches sur l'aval du cycle. Cette situation a conduit à la décision en 1995 de mettre au point un **formulaire** de sûreté-criticité de nouvelle génération appelé Cristal.

Le formulaire Cristal est élaboré et qualifié dans le cadre d'une collaboration entre l'IPSN, Cogema et la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) du CEA, en tenant compte des besoins relatifs à l'ensemble des applications envisageables. Après quatre ans de développement, de validation et de qualification, la première version (V0.1) du formulaire a été livrée aux utilisateurs en 1999.

L'architecture générale du formulaire Cristal (version V0.1), présentée sur la figure 1, est organisée en deux voies de calcul qui exploitent les données nucléaires de base issues de l'évaluation **JEF-2.2** du projet JEF (*Joint Evaluated File*, biblio-

Des programmes expérimentaux, menés dans le réacteur Éole du CEA/Cadarache, contribuent à la qualification du formulaire Cristal. Ce réacteur, de très faible puissance, est destiné aux études neutroniques de réseaux (ensembles d'éléments identiques appelés "cellules") modérés, en particulier ceux des réacteurs à eau sous pression. Ici, vue de la zone expérimentale, pouvant contenir différents types de cœurs, et des quatre barres de sécurité.



thèque européenne) mené dans le cadre de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (Organisation pour la coopération et le développement économique). La première dite "**standard**" met en œuvre une formulation à plusieurs groupes d'énergie des **sections efficaces** (**sections efficaces multigroupe**) et permet des **calculs probabilistes** avec les logiciels de calcul **Apollo2-Moret4** ou **déterministes** avec le logiciel de calcul **Apollo2 (modules Sn)** pour la détermination de k_{eff} ou de dimensions géométriques pour un k_{eff} donné. La seconde voie dite "**de référence**" s'appuie sur le logiciel de calcul **Tripoli4**.

Les données nucléaires de base

Les données nucléaires de base (sections efficaces, paramètres de **résonance**, **rendements de fission**, cons-

tantes de décroissance radioactive...) sont élaborées, évaluées et gérées au niveau international en dehors du formulaire Cristal selon des programmes de mesures et d'interprétations qui leur sont propres (voir *Améliorer et compléter les données nucléaires indispensables aux neutroniciens*). Sauf exception, les données nucléaires de base actuellement utilisées par le formulaire Cristal sont issues de l'évaluation **JEF-2.2**.

En amont du logiciel de calcul Apollo2, développé par la DEN, pour les calculs selon la voie standard, il est nécessaire de fabriquer une bibliothèque de données nucléaires d'application à plusieurs groupes d'énergie. Elle est obtenue directement à partir des informations contenues dans l'évaluation **JEF-2.2** à l'aide du logiciel de traitement **Themis/NJOY**. La bibliothèque **CEA93** avec un découpage à 172 groupes d'énergie, initialement incomplète pour les applications de criticité, a été étendue pour intégrer l'ensemble des **nucléides** indispensables aux calculs de criticité, comme par exemple le chlore, le calcium, le zinc, l'étain...

mulaire, afin de minimiser le travail de l'utilisateur, et l'emploi de schémas de calcul préalablement validés et de procédures préalablement optimisées (**procédures aproc**), dans le but de guider l'utilisateur dans le choix des options des différents logiciels. L'IHM comprend deux outils principaux : le logiciel de calcul Cigales et le logiciel graphique EGM.

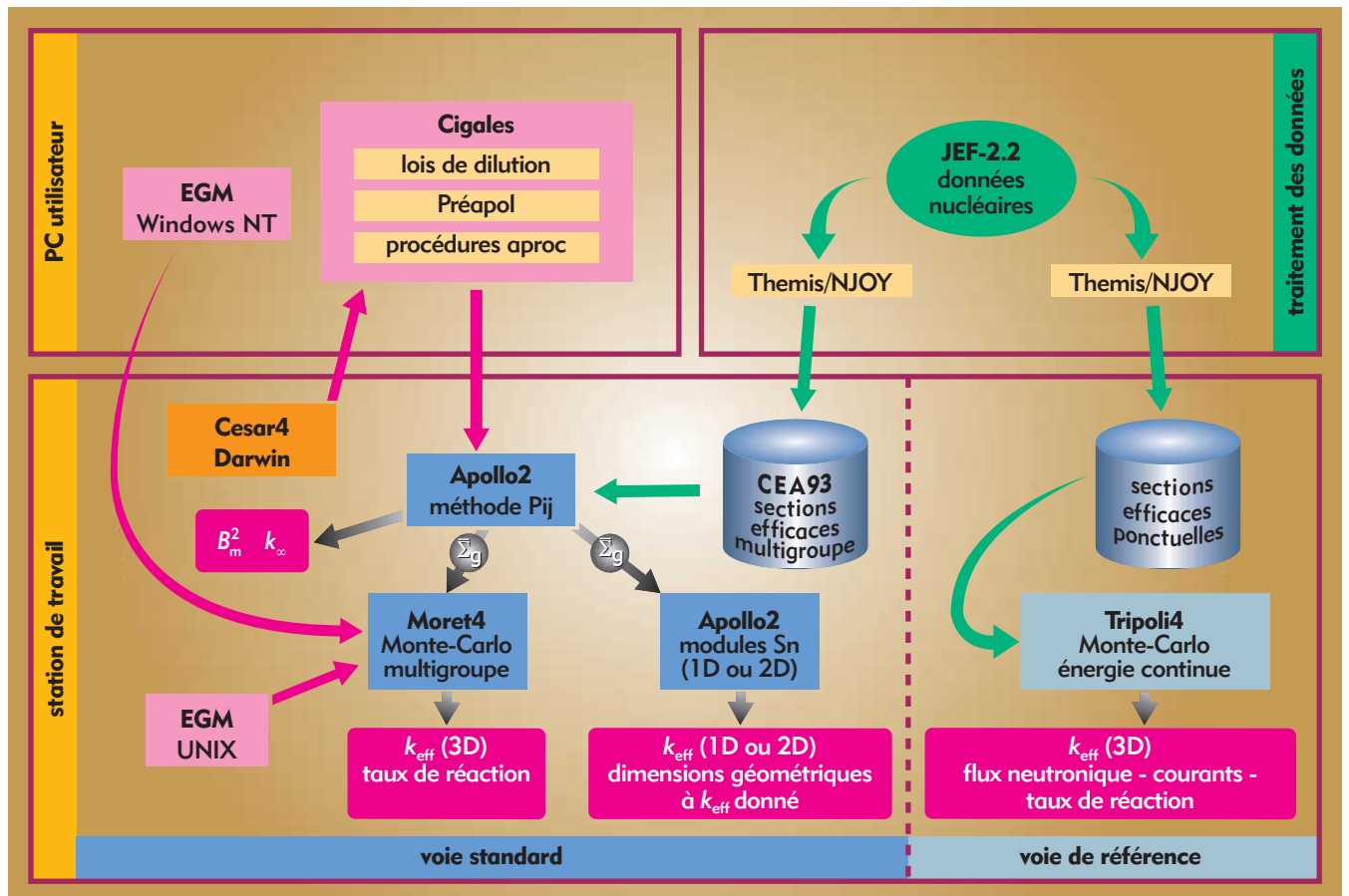
Le logiciel **Cigales** (Cristal interface générant des Apollo liés aux études de sûreté-criticité) est une interface pour la détermination des compositions atomiques des milieux **fissiles** de la criticité (en faisant appel aux **lois de dilution**) et pour la préparation automatique des fichiers de données pour les calculs avec le logiciel Apollo2 (**Préapol**). En outre, Cigales établit un couplage avec le logiciel **Cesar4**, et à terme avec le formulaire **Darwin** (voir *La criticité des combustibles usés*), qui donne accès au bilan matière des combustibles usés.

Le logiciel **EGM** (Éditeur graphique pour Moret) est une interface de construction et de génération des géométries à trois dimensions pour le logiciel Moret4. Cette interface utilise la plate-forme de

L'interface homme-machine

Dans le domaine de la criticité, le champ d'application très étendu, la variété des configurations géométriques et des milieux chimiques traités et la grande richesse des spectres neutroniques nécessitent des formalismes généraux et robustes. L'Interface homme-machine (IHM) du formulaire Cristal permet une mise en œuvre aisée du for-

Figure 1. Architecture générale du formulaire de sûreté-criticité Cristal.



développement Cas.cade (modélisation géométrique à trois dimensions, visualisation graphique et module d'entrées-sorties) de Matra Datavision et l'éditeur d'interfaces graphiques Ilog Views.

L'enchaînement Apollo2-Moret4

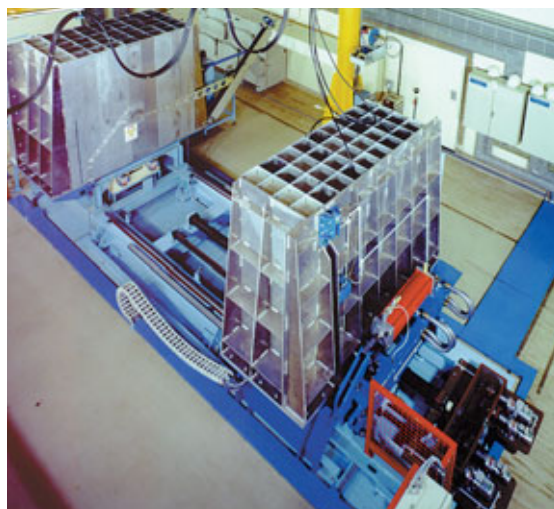
Dans une première étape, l'utilisateur procède à la recherche de paramètres macroscopiques définissant les milieux étudiés. Un calcul fin, effectué avec le logiciel Apollo2 (calcul de flux neutronique par la méthode des probabilités de collision (**méthode Pij**)), conduit à la détermination des caractéristiques neutroniques d'un milieu équivalent. Le système étudié est décrit dans le logiciel Moret4 comme un ensemble de zones homogènes caractérisées par un nombre réduit de paramètres tels que les sections efficaces macroscopiques multigroupe ($\bar{\Sigma}_g$) pour tout type de milieu, le **facteur de multiplication infini** k_∞ et le **laplacien matière** B_m^2 pour un milieu fissile.

Dans une deuxième étape, en se servant des caractéristiques neutroniques des différents milieux équivalents, l'utilisateur traite de façon détaillée le système dans son ensemble dans une géométrie à trois dimensions avec le logiciel de simulation neutronique Moret4, développé par l'IPSN. Ce logiciel fait appel à la **méthode de Monte-Carlo** pour la résolution de l'équation du transport des neutrons dans la matière et détermine le facteur de multiplication effectif k_{eff} du système étudié.

Les calculs avec la voie étalon Tripoli4

Le principe de la voie de référence est d'utiliser le minimum d'approximations physiques et de modélisations pour calculer le k_{eff} . Pour suivre la voie de référence ou voie "étalon", il faut employer le logiciel Tripoli4, développé par la DEN. C'est un logiciel de calcul du transport des particules (neutrons, photons gamma), tridimensionnel et à **énergie continue**, fondé sur la **méthode de Monte-Carlo**.

(1) Du point de vue géométrique, un réseau est un volume subdivisé en mailles.



IPSN

Il permet de déterminer le k_{eff} ainsi que le flux neutronique, le courant de neutrons à travers une surface, les taux de réaction, taux de fission par exemple. Doté de deux types de description géométrique à trois dimensions, le logiciel Tripoli4 offre également les moyens de décrire des réseaux et des réseaux de réseaux⁽¹⁾. Il a la possibilité de fonctionner en mode parallèle sur ordinateur massivement parallèle ou sur réseau de stations de travail.

La qualification du formulaire Cristal

La qualification est le processus mis en œuvre pour comparer les résultats du formulaire Cristal à des résultats expérimentaux. La compréhension de l'origine des écarts entre le calcul et l'expérience permet d'en déduire l'incertitude à introduire sur le facteur de multiplication effectif k_{eff} calculé dans les situations réelles à traiter.

Le formulaire de sûreté-criticité Cristal a donné lieu à un très important effort de qualification par l'exploitation systématique de résultats d'expériences critiques issus de différentes sources (programmes expérimentaux menés par l'IPSN, le CEA, aux États-Unis, au Japon...), expériences évaluées par l'ICSBEP (*International Criticality Safety Benchmark Experimental Program*) qui émane de l'OCDE. La base de qualification comporte environ 520 configurations expérimentales représentatives des divers milieux et géométries rencontrés dans les opérations du cycle du combustible (usines, installations, laboratoires, transports).

Vue de Maracas (Machine de rapprochement pour la criticité d'assemblages solides) à Valduc où des expériences de criticité ont été menées par l'IPSN et contribuent à la qualification du formulaire Cristal. Dans ces expériences, deux masses de matière fissile, posées sur deux tables, une mobile et une fixe, sont rapprochées l'une de l'autre, ce qui a pour conséquence de réduire les fuites de neutrons et donc d'augmenter la valeur du facteur de multiplication effectif. La valeur critique de la distance entre les deux masses de matière fissile est ainsi déterminée.



Les programmes expérimentaux liés aux combustibles usés, conduits par l'IPSN à Valduc et par la DEN dans le réacteur Minerve du CEA/Cadarache, permettront d'étendre le domaine de qualification du formulaire Cristal en vue d'évaluer plus précisément le risque de criticité des combustibles usés. Cette évaluation fera, à partir de 2002, l'objet de la version V1 du formulaire Cristal avec notamment la possibilité de prendre en compte le crédit *burn-up* (voir *La criticité des combustibles usés*).

Le domaine d'application

Le formulaire Cristal est élaboré pour répondre aux besoins des industriels et des autorités de sûreté dans les domaines des installations du cycle du combustible nucléaire et du transport des matières fissiles. Il s'applique à des études de criticité (conception et exploitation d'un large éventail d'installations nucléaires) et à des études de qualification (emploi des résultats expérimentaux pour qualifier les voies de calcul associées; définition et mise au point des programmes expérimentaux; utilisation pour les études de Groupes de travail internationaux). À plus long terme, il permettra la prise en compte du crédit *burn-up*.

Jean-Michel Gomit

Département de prévention et d'étude des accidents
Institut de protection et de sûreté nucléaire
Fontenay-aux-Roses