

PANTHERE - LOGICIEL POUR LA SIMULATION DES DEBITS DE DOSE POUR INSTALLATIONS NUCLEAIRES COMPLEXES

M. Longeot*, B. Dupont*, C. Coatanea*, A. Schumm**, M. Zweers**,
F. Malvagi***, J-C Trama***

* EDF/SEPTEN/TE, 12-14 avenue Dutriévoz, 69628 Villeurbanne Cedex

** EDF/R&D/SINETICS, 1, avenue du Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex

*** CEA/SERMA, 91191 Gif sur Yvette Cedex

RESUME

PANTHERE est un logiciel de radioprotection industriel développé par EDF-SEPTEN. Il permet de déterminer les débits de dose gamma en un point pour des installations industrielles complexes. PANTHERE s'intègre parfaitement à une démarche ALARA en permettant la prévision des débits de dose, et donc l'organisation et l'optimisation d'interventions en milieu irradiant.

Après une introduction, l'article se décompose en trois parties principales. Tout d'abord, le chapitre 2 effectue une présentation de la version industrielle actuelle PANTHEREV1. Ensuite, le chapitre 3 aborde les différentes applications de PANTHEREV1 pour EDF avec un focus particulier sur un type d'étude effectuée au SEPTEN dans le domaine de la qualification des matériels sous irradiation en accident grave. Enfin, le chapitre 4 présente la version en développement PANTHEREv2 qui sera mise en exploitation en 2011.

1 – INTRODUCTION

EDF met en œuvre une politique d'optimisation de la radioprotection suivant le principe ALARA. Pour cela, elle a besoin d'outils de calcul qui permettent la prévision de la dosimétrie individuelle et collective dans une installation nucléaire pour laquelle des mesures ne sont pas possibles (locaux excessivement irradiants ou inaccessibles, constructions neuves en projet, ...) ou insuffisantes. Ces calculs de dosimétrie prévisionnelle, associés à une planification et description des opérations, permettent une optimisation de la radioprotection par un dimensionnement et un choix efficaces des protections biologiques, une simulation potentielle d'une décontamination ou encore une adaptation des postes de travail. Le logiciel PANTHERE (acronyme pour « Prévisions et ANalyses THéoriques de l'Exposition dans les REacteurs ») est un code de calcul de radioprotection puissant et convivial. Il permet de modéliser le transport des rayonnements gamma au sein de la matière, afin de déterminer les débits d'équivalent de dose (DED) ou la fluence gamma due à des sources radioactives. PANTHERE se situe entre les codes de calcul puissants mais complexes (issus de la R&D CEA) et les outils simplifiés réservés aux géométries simples, et est la solution opérationnelle adaptée à la modélisation d'une installation industrielle complexe. Ce logiciel, initialement utilisé en ingénierie pour les centrales de type REP (réacteur à eau pressurisé) peut également être employé pour tout calcul de débit de doses relatif à des sources radioactives, aussi bien en conception (réacteur EPR, bâtiments de stockage de déchets) qu'en exploitation (maintenance, transport...) ou démantèlement. A noter que PANTHERE est qualifié QGE (qualifié générique EDF) et dans ce cadre a notamment fait l'objet de comparaisons avec le code de référence TRIPOLI4 du CEA (d'envergure internationale). Il est reconnu par l'ASN comme code de référence pour les études de dimensionnement de l'EPR.

2 – PRESENTATION DE PANTHEREV1, VERSION EN EXPLOITATION

Les trois éléments constitutifs du logiciel PANTHEREV1 sont le noyau de calcul, l'IHM et la base de données.

2.1 – LE NOYAU DE CALCUL

Le noyau de calcul de PANTHEREV1, basé sur la méthode d'intégration des noyaux ponctuels avec atténuation en ligne droite et facteurs de « Build-up » :

- o calcule les contributions au DED des flux directs, réfléchis et diffusés dans l'air de l'atmosphère (« effet de ciel ») ;
- o permet le traitement rapide et simultané d'un grand nombre d'objets, de sources et de points de calculs.

La méthode « CEA/SERMA » (issu de Mercure6) est utilisée pour évaluer les facteurs de build-up avec découpage en 195 groupes d'énergie (entre 15 keV et 10 MeV). Cette méthode permet d'une part une évaluation correcte pour les milieux multicouches (succession de plusieurs écrans de protection) et d'autre part une meilleure évaluation aux basses énergies.

Pour le calcul de propagation gamma, le noyau de calcul propose des méthodes de calcul plus rapides que celles utilisées dans les codes Monte Carlo de référence comme TRIPOLI et MCNP ; ces méthodes, basées sur des techniques de lancer de rayons sont :

- 1) une méthode dite « A » de lancer de rayons du point de calcul vers les sources, très efficace pour le calcul des sources surfaciques ;
- 2) une méthode dite « B » de lancer de rayons de la source vers le point de calcul avec intégration Monte Carlo des sources, bien adaptée aux sources volumiques ;
- 3) une méthode dite « réflexion » pour calculer la dose due à la réflexion des gamma sur les surfaces selon la formule de « CHILTON et HUDDLESTON » ; ce calcul met en oeuvre les deux modules A et B ; une seule réflexion est considérée ;
- 3) Une méthode dite « effet de ciel » pour calculer les doses par diffusion des gamma dans l'air de l'atmosphère basée sur la méthode B et utilisant la « fonction LBRF » ou « Line Beam Response Function ».

Par l'intermédiaire du choix de la méthode et des options de calcul, le noyau permet d'adapter au mieux le type de calcul effectué à la configuration étudiée. Une méthode « automatique » est proposée par défaut.

2.2 - L'IHM PANTHEREV1

L'Interface Homme Machine (IHM) de PANTHEREV1 permet une saisie conviviale des données, une modélisation et une représentation interactive en 3D de type CAO de l'ensemble des composants importants pour la radioprotection, ainsi que la visualisation, l'analyse et la mise en forme des résultats. L'import de modélisation CAO (Solidworks, PDMS) est possible moyennant un « parseur » adaptée.

La modélisation d'une géométrie complexe dans PANTHEREV1 est réalisée à partir de dix objets élémentaires (cylindre, mur, ...). Chaque objet peut être constitué de 1 à 5 milieux distincts : deux milieux intérieurs séparés par un « niveau d'eau », et 3 épaisseurs successives appelées « métal », « calorifuge » et « protection » (cf. Fig. 1).

Les résultats de PANTHEREV1 sont fournis sous forme de tableaux directement exploitables sous Excel (cf. Fig. 2). Ils peuvent également être visualisés par l'intermédiaire d'un « zoning » (Fig. 3) et de courbes isodoses, par différents niveaux de couleurs paramétrables directement représentatifs des niveaux de doses calculés.

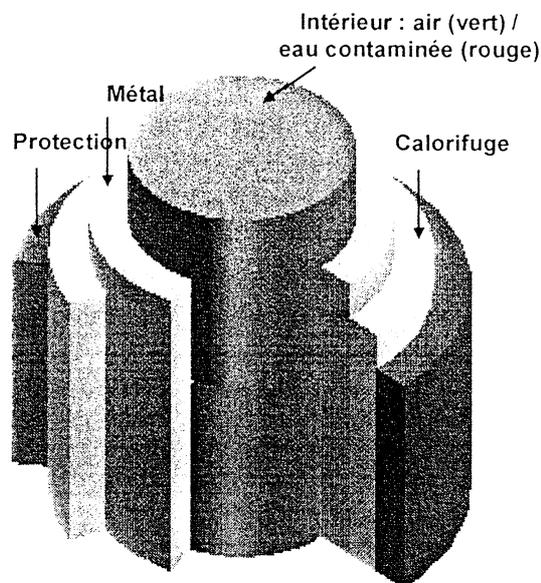


Fig. 1 : Objet cylindres multicouches

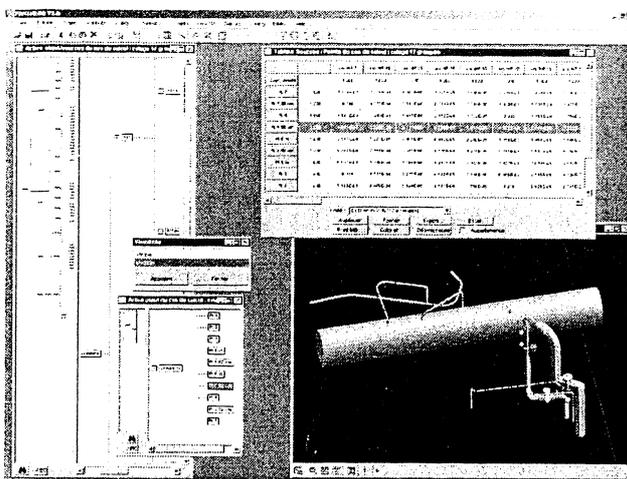


Fig. 2: PANTHEREV1: arbres objet/point et tableur résultats

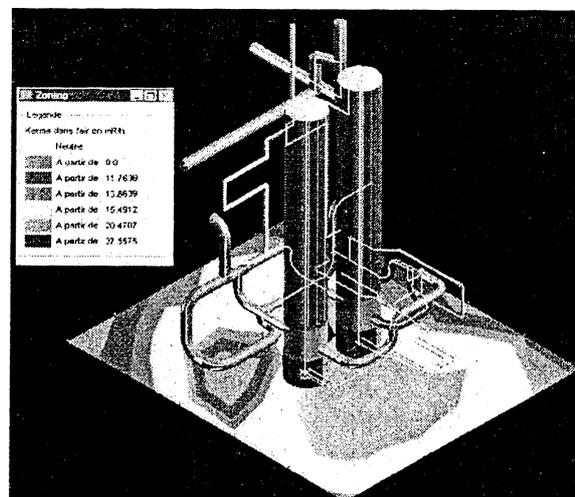


Fig. 3 : Exemple de Zoning des débits de doses.

PANTHEREV1 dispose de plusieurs fonctionnalités utiles :

- une fonction de calage ajustant les sources afin de minimiser les écarts entre DED simulés et DED mesurés sur site.
- une fonction de dimensionnement automatique des protections pour la détermination des épaisseurs de protection nécessaires au respect de contraintes de dose en un point.
- des fonctions pour « décroissance radioactive » et « filiation radioactive » afin de prendre en compte l'évolution dans le temps du terme source.

2.3 – LA BASE DE DONNEES

Une BDD ORACLE™ permet de gérer la persistance de toutes les données relatives à une étude PANTHEREV1 : objets géométriques, sources, points, données radionucléides, spectres, matériaux, options de calcul.

Les bibliothèques des matériaux, des spectres et des options de calcul peuvent être incrémentées par l'utilisateur PANTHERE, certaines données étant disponibles dès l'installation du logiciel.

PANTHERE possède un fonctionnement de type « multi-utilisateurs » permettant une protection des données et des résultats d'un utilisateur avec identification tout en permettant un partage des données entre utilisateurs de la même base de données. Enfin, PANTHERE offre des possibilités d'import/export pour faciliter la saisie et le partage de certaines données.

2.4 – ASSISTANCE UTILISATEUR

PANTHERE dispose d'une assistance téléphonique (hot-line) et d'une aide en ligne contextuelle. Un site internet (<https://panthere.c-s.fr>) permet de partager la documentation et fournir un service optimum aux utilisateurs.

3 – UTILISATIONS DE PANTHEREV1 POUR EDF – FOCUS PARTICULIER SUR UNE ETUDE DE QUALIFICATION DE MATERIELS EN ACCIDENT GRAVE

3.1 – CALCULS PANTHEREV1 EN FONCTIONNEMENT NORMAL

Le logiciel PANTHEREV1 est fortement utilisé dans les centres d'ingénierie de la Division Ingénierie Nucléaire (DIN) d'EDF ainsi qu'à UTO (ingénierie de la Division Production Nucléaire (DPN)) ainsi que dans leurs bureaux d'études de proximité. De manière plus réduite, le CEA et AREVA NC sous traitent également des études PANTHERE. Les principaux champs d'application sont :

- 1) La conception (calculs en fonctionnement normal et accidentel) : a) dimensionnement et zoning des locaux de l'EPR (France, Angleterre, ...) au CNEN; b) conception de centre d'entreposage (CIDEN), ...; c) calcul de conséquences radiologiques et accessibilité de locaux en accident grave, ...d) qualification des matériels en accident grave au SEPTEN (application développée dans le § 3.2).
- 2) Des calculs de prévisionnel dosimétrique lors de chantiers dosants :
 - a) Ingénierie d'exploitation : maintenance sur circuit primaire en arrêt de tranche (UTO) ;
 - b) Ingénierie de modification : interventions de modification comme par exemple remplacement de générateurs de vapeur (CIPN) ;
 - c) Ingénierie d'assainissement : interventions de décontamination de circuits (CIDEN) ;
 - d) Démantèlement: optimisation de la radioprotection en chantier de déconstruction (CIDEN).
- 3) La caractérisation radiologique : calculs de fonctions de transfert : par exemple, problématiques de transport (UTO) ou problématique de déchets (CIDEN).

3.2 UTILISATION DE PANTHERE POUR LA QUALIFICATION DES MATERIELS DE CNPE EN CONDITIONS ACCIDENTELLES

3.2.1 Contexte

EDF est engagé dans une démarche de sûreté à la conception sur l'ensemble de ses centrales nucléaires en exploitation et sur le futur palier EPR. Dans les études d'accidents, une liste de matériels a été identifiée comme nécessaire soit à la conduite de l'accident pour ramener la tranche dans un état sûr, soit au confinement des bâtiments de la tranche en cas de perte d'intégrité des gaines des crayons combustibles. Dans ce cadre, un chapitre des rapports de sûreté est consacré à la qualification des matériels. Ce chapitre donne des profils enveloppes des scénarios accidentels étudiés en dimensionnement, en fonction de la localisation, pour les items suivants : pression, température et irradiation. Une partie du chapitre est consacrée aux conditions d'ambiance en fonctionnement normal : cela constitue le l'irradiation de vieillissement des matériels. Ces profils servent de données d'entrée pour des qualifications ou par essai, soit par analyse (comparaison avec qualifications existantes).

Les profils enveloppes en irradiation sont très pénalisants : la contamination volumique et surfacique est maximisée, et aucune protection n'est placée entre la contamination et le point de calcul.

Pour EPR, où les accidents avec fusion totale du cœur (accident grave) sont pris en compte dans le dimensionnement, les profils enveloppes en AG (Accident Grave) sont souvent trop sévères pour les matériels aux durées de mission longues, en regard de la technologie existante. Dans le cas des matériels où la dose enveloppe est trop contraignante, on peut, grâce à l'utilisation du logiciel PANTHERE, valoriser une géométrie et des contaminations de l'équipement réalistes.

La méthode de calcul, dans le cas des profils enveloppes et des calculs réalistes est détaillée ci-après. Un exemple est ensuite pris sur un équipement pour illustrer comment PANTHERE permet de valoriser les modifications de design dans les calculs de doses intégrées d'irradiation.

3.2.2 Méthode et hypothèses

Dans toute la démarche de calcul de dose d'irradiation, les rayonnements pris en compte sont les rayonnements α avec le code de calcul PANTHERE, et les particules β avec le code de calcul DOBERMAN d'EDF. On ne s'intéressera ici qu'au traitement des rayonnements γ , mais le principe est le même pour les β , même si les géométries prises en compte sont beaucoup plus restreintes dans DOBERMAN.

Sources de contamination

Pour la partie vieillissement, les sources de rayonnement γ en fonctionnement normal sont soit le fluide primaire (essentiellement des produits de corrosion activés), soit les assemblages combustibles.

En fonctionnement accidentel, la source de rayonnement γ principale est créée par les produits de fission relâchés par le combustible lors des ruptures de gaines voire de la fusion du combustible.

Les sources sont alors de trois types :

- ◆ Contamination volumique de l'air des locaux,
- ◆ Contamination volumique du circuit primaire, des circuits de refroidissement du primaire et d'aspersion enceinte fonctionnant en recirculation,
- ◆ Contamination surfacique des locaux (dépôt des produits de fission).

Démarche de calcul

Le SEPTEN a développé une démarche de calcul en 4 étapes (itératives pour certaines) dont seulement les trois premières sont présentées dans ce paragraphe. Concernant la quatrième étape (relative au calcul inverse avec dose intégrée réaliste pour adaptation aux essais), elle utilise PANTHERE de la même manière que dans les étapes précédentes.

Etape 1 : Inventaire cœur en PF

L'inventaire cœur complet en produits de fission est déterminé en fonction des caractéristiques du combustible (type, enrichissement), de la distribution de puissance, de la puissance du réacteur et de la longueur de campagne.

Etape 2 : transport des PF

Les transports des produits de fission depuis le combustible jusqu'au local/matériel étudié sont déterminés à l'aide de codes de calcul spécifiques de thermodynamique tenant compte des caractéristiques géométriques et de fonctionnement (ventilation) des bâtiments, et donnant des contaminations surfacique et volumique des locaux. Un calcul de décroissance

est ensuite effectué (à l'aide du code de calcul DARWIN du CEA) sur les termes sources ainsi obtenus, sur une durée correspondant à la durée de mission du matériel.

Etape 3 : transport rayonnement

Le transport des rayonnements γ est réalisé avec le code de calcul PANTHERE. Les calculs sont réalisés avec des spectres unitaires, afin de s'affranchir des évolutions du terme source.

Dans le cas d'un calcul de dose maximal, la modélisation est réalisée de façon très simplifiée, en prenant en compte les sources de contamination dans le local considéré mais pas les caractéristiques géométriques de l'équipement.

Dans le cas d'une approche réaliste, l'ensemble des caractéristiques de l'installation et de l'équipement est valorisé, en particulier les épaisseurs de protection entre les parties radiosensibles du matériel et la contamination.

La dose intégrée est ensuite calculée en effectuant une intégration numérique trapèze des débits de dose.

3.2.3 Exemple d'utilisation de PANTHERE

Des calculs de doses intégrées d'irradiation en accident grave ont été effectués pour les joints d'étanchéité du Tampon d'Accès Matériel (TAM) de l'EPR Flamanville 3. Une vue de la modélisation sous PANTHERE est donnée en Figure 4. Le calcul initial correspond à une contamination surfacique sur toutes les surfaces ainsi qu'une contamination volumique dans l'air ambiant. Les parties radiosensibles sont les joints d'étanchéité entre les brides de fermeture du TAM.

Au cours des études, des modifications de design ont été apportées, comme l'orientation des buses d'aspersion EVU (diminution du terme source surfacique sur le TAM du fait de l'aspersion directe), et la mise en place d'un capot de protection au-dessus des joints. Le terme source a également subi des modifications. Les influences sur les calculs sont tracées dans le graphique ci-dessous :

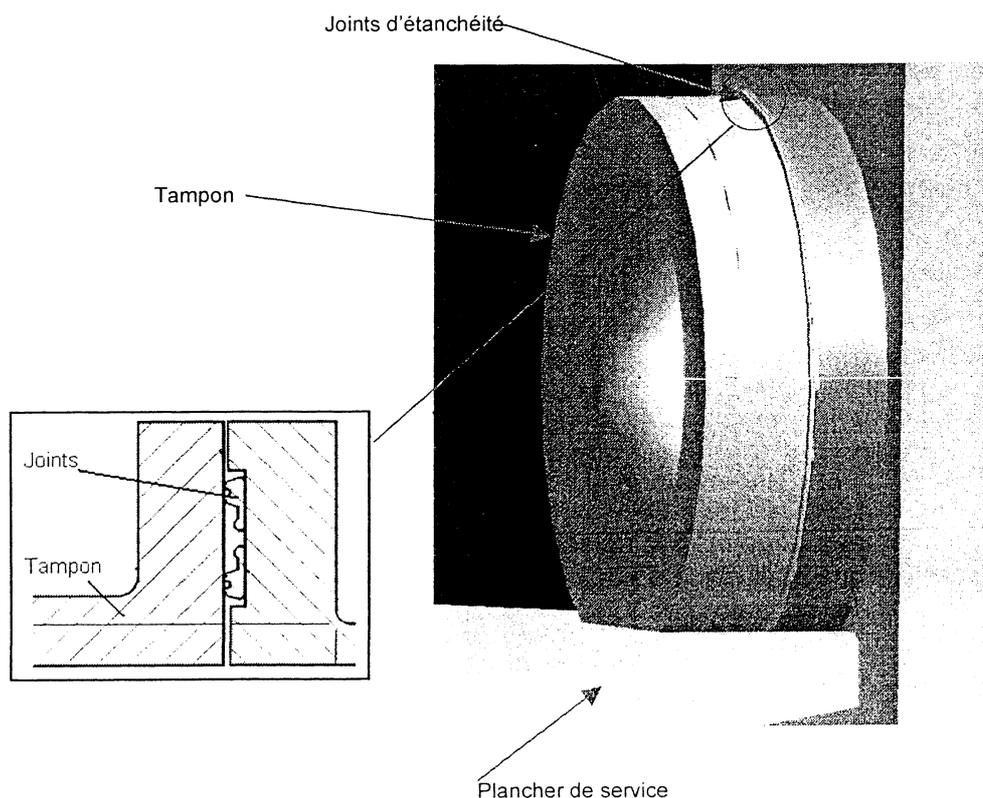


Figure 4 : Vue de côté de la modélisation sous PANTHERE du TAM de l'EPR

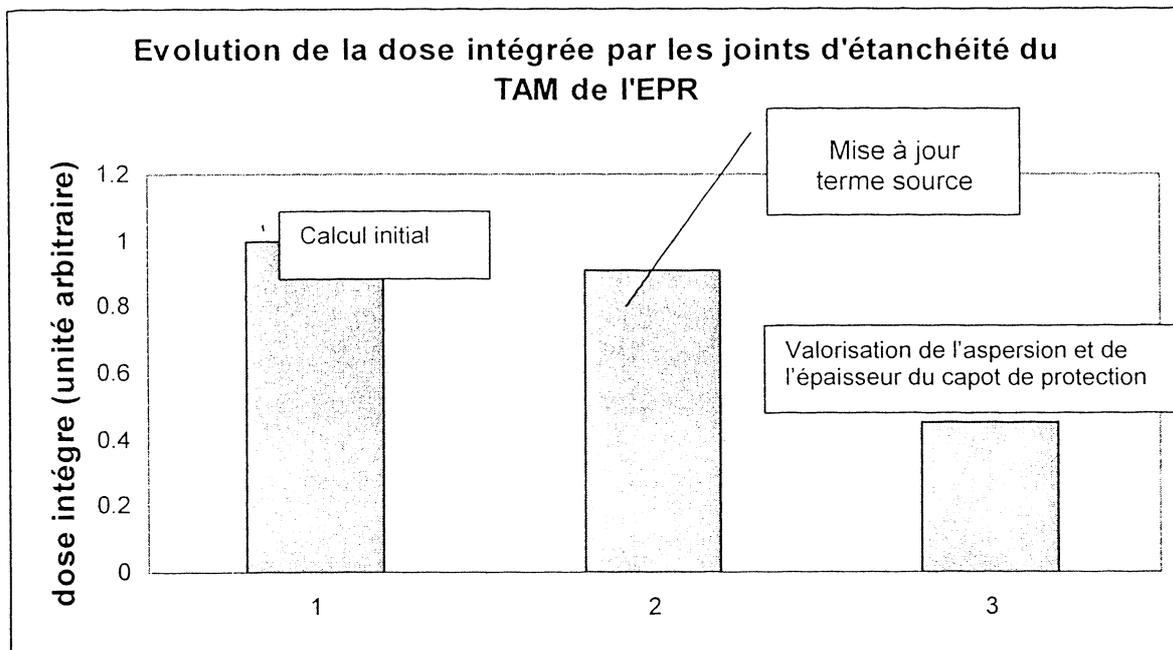


Figure 5 – Prise en compte avec PANTHERE des modifications de design

Le code de calcul PANTHERE a donc permis de valoriser les modifications de conception et de terme source, pour obtenir des résultats de calcul réaliste.

4 – DEVELOPPEMENTS DU LOGICIEL PANTHERE V2

Compte tenu des évolutions techniques et de l'intégration des outils informatiques au poste de travail, EDF a engagé depuis 2007 le développement du logiciel PANTHEREV2 qui sera mis en exploitation dans les ingénieries EDF en 2011. Les objectifs principaux de PANTHEREV2 sont :

- 1) rassembler les codes de radioprotection (γ , β , voire neutron) sous un unique code de radioprotection avec une IHM (Interface Homme Machine) et un modeleur géométrique uniques ;
- 2) améliorer la saisie et la gestion des données et l'intégration du logiciel dans le processus industriel (assurance qualité, chaîne de calcul...) ;
- 3) pouvoir utiliser « directement » des modèles CAO (Solidworks, ...) dans PANTHERE;
- 4) intégrer les derniers développements R&D (NARMER, DOBERMAN (β), et envisagé à long terme TRIPOLI4 (γ , voire neutron)).

Pour ce développement EDF associe son partenaire industriel CEA et son prestataire C-S.

L'architecture de PANTHEREV2 est décrite au Schéma 1. Les caractéristiques principales du logiciel sont les suivantes :

- Une Interface Homme Machine ou IHM (cf. Fig. 4) développée à partir de la plate-forme de développement SALOMEV5 (<http://www.salome-platform.org/>) et permettant d'importer les études PANTHEREV1, de visualiser les objets en 3D et de réaliser un calcul de débit de dose. L'IHM fonctionne sous Linux ;
- Un noyau de calcul utilisant la méthode d'atténuation en ligne droite composé :
 - o du logiciel LIBCAD : librairie de poursuite géométrique développée par EDF/R&D/SINETICS ;
 - o du solveur NARMER développé par le CEA/SERMA ;
 Ce noyau de calcul est le plus performant parmi ceux utilisant cette méthode.
- Une base de données MySQLV5 pour la persistance et la gestion administrée des données des études (rôles utilisateur, données de référence ...).

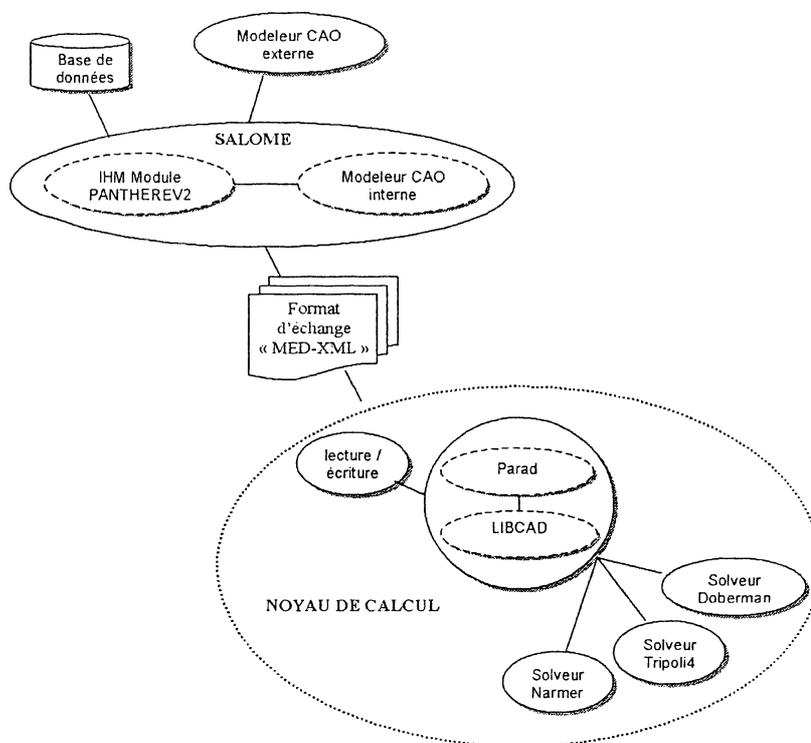


Schéma 1 : Architecture du logiciel PANTHEREV2

PANTHEREV2 reprend les mêmes fonctionnalités que PANTHEREV1 (y compris à terme les fonctions réponses de réflexion et effet de ciel) avec les améliorations importantes liées à l'import direct de modèles CAO (SolidWorks, ..) et à la simplification de la construction des modèles géométrique et radiologique.

Son architecture modulaire permettra l'intégration à court/moyen terme de NARMER et DOBERMANV3 (respectivement pour les γ et les β) et sera compatible avec une intégration à plus long terme de TRIPOLI4 (pour les calculs de DED γ de référence (géométries complexes) et de DED neutron de protection).

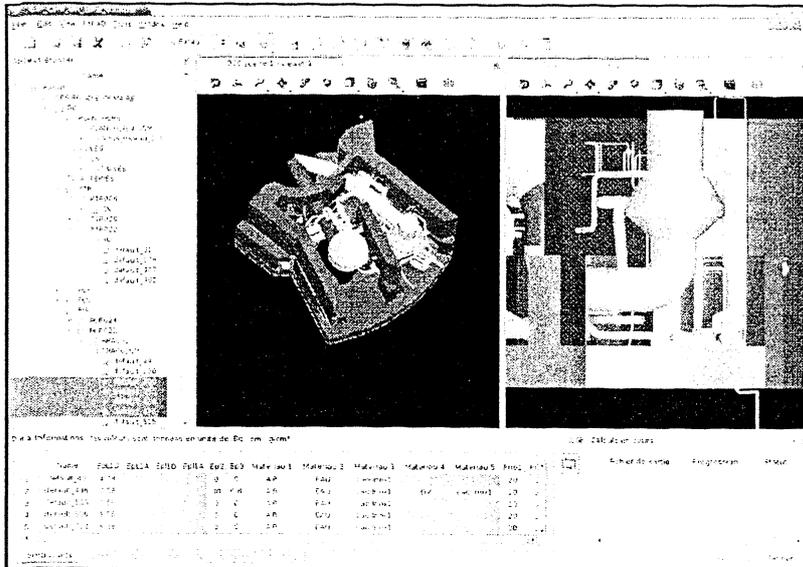


Fig. 4 : Illustration de l'IHM PANTHEREV2 : réalisation d'un calcul de DED à partir d'un modèle importé.

Le noyau « Libcad-Narmer » de PANTHEREV2, utilise la même méthode de calcul que PANTHEREV1, c'est-à-dire atténuation en ligne droite avec « build-up factor ». L'intégration des sources se fait par méthode Monte Carlo avec importance.

A noter qu'une démonstration de PANTHERE est proposée lors de la Conférence pour une vision plus concrète des améliorations de PANTHEREV2 par rapport à la version V1.

5 – PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Le logiciel PANTHERE s'intègre dans la démarche réglementaire ALARA en participant à la maîtrise de la dosimétrie individuelle et collective dans une installation nucléaire. L'utilisation de méthodes de calcul de débit de dose simplifiées et d'une interface utilisateur conviviale et dédiée à la radioprotection permet un usage industriel fiable et rapide pour participer à l'élaboration des prévisionnels dosimétriques.

Le logiciel est commercialisé depuis 2007. PANTHEREV1 est aujourd'hui largement utilisé dans les ingénieries spécialisées d'EDF ainsi que chez leurs partenaires sous-traitants. Cet article a permis la présentation d'études actuellement réalisées au SEPTEN avec PANTHEREV1 pour la démonstration de tenue sous irradiation de matériels en conditions accidentelles.

Le nouveau logiciel PANTHEREV2 en développement (destiné à remplacer la version précédente) sera mis en exploitation en 2011. Il a pour objectif de devenir le code de radioprotection de référence pour les ingénieries EDF, voire dans les ingénieries hors EDF (en France comme à l'international). PANTHEREV2 permettra des calculs de DED pour des sources surfaciques et volumiques directement sur des modèles CAO (SolidWorks, ...). La simplification de son utilisation améliore notablement la productivité.

Même si seuls les noyaux « Libcad-Narmer » et « Libcad-Doberman » seront à court/moyen terme intégrés dans PANTHEREV2, l'intégration du noyau « Libcad-Tripoli4 » est envisagé sur un plus long terme, pour les calculs de protection multi rayonnement.