

# 5 Les études de sûreté et de sécurité des installations





---

<b>5</b>	<b>LES ÉTUDES DE SÛRETÉ ET DE SÉCURITÉ</b> des installations .....	<b>204</b>
----------	--	------------

---

<b>5.1</b>	<b>ÉTUDE DU POTENTIEL SISMIQUE</b> et de l'enracinement de la faille de la Moyenne Durance .....	<b>206</b>
------------	--	------------

---

flashinfoflashinfoflashinfoflashinfoflashinfoflash

<b>5.2</b>	<b>APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE</b> pour la caractérisation de failles actives : application à la faille du Vuache (Haute-Savoie) .....	<b>215</b>
------------	--	------------

---

<b>5.3</b>	<b>APPLICATION DES EPS DE NIVEAU 2 ET DES TECHNIQUES DE FIABILITÉ DYNAMIQUE</b> à la validation des guides d'intervention en accident grave .....	<b>217</b>
------------	---	------------

<b>5.4</b>	<b>ÉTUDE COMPARATIVE</b> d'une rupture de tube de GV en France et en Finlande sur le réacteur EPR .....	<b>226</b>
------------	---	------------

---

flashinfoflashinfoflashinfoflashinfoflashinfoflash

<b>5.5</b>	<b>PROTECTION DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES</b> contre le risque d'inondation : un important travail en cours pour l'élaboration d'un guide .....	<b>232</b>
------------	--	------------

---

<b>5.6</b>	<b>LES FAITS MARQUANTS</b> en quelques dates .....	<b>233</b>
------------	--	------------

# LES ÉTUDES DE SÛRETÉ ET DE SÉCURITÉ des installations

---

Jean-Luc PASQUIER  
Direction générale

---

Ce dernier chapitre du Rapport scientifique et technique montre que la qualité de l'expertise de l'IRSN repose sur ses recherches, mais aussi que les déficits de connaissances mis en évidence par ses expertises nourrissent ses programmes de recherche. Il s'attache aussi à vérifier, à partir de quelques exemples particulièrement probants, que les travaux de recherche réalisés par l'IRSN contribuent à perfectionner la gestion du risque nucléaire, quelles qu'en soient les causes.

Dans cette perspective, les sujets susceptibles d'être abordés étaient très nombreux, puisqu'ils pouvaient comprendre en fait tout ceux pour lesquels l'expertise de l'IRSN est sollicitée.

C'est le cœur même du métier de l'Institut que de s'efforcer d'appréhender au mieux les risques générés par des situations complexes et, dans la mesure du possible, de les prévenir ou d'en limiter les effets en s'appuyant sur un corpus de connaissances que l'Institut a précisément pour vocation de faire évoluer. Autant dire qu'en raison même du spectre très large des missions confiées à l'IRSN, les exemples ne manquent pas pour illustrer le fait que cette recherche que l'on qualifie de « finalisée » sert effectivement à renforcer la gestion des risques.

Si l'option avait été prise de les décrire tous dans le présent rapport, il aurait fallu traiter de toutes les dimensions de l'expertise, en radioprotection comme en sûreté ou sécurité nucléaires, et de toutes les recherches « amont » correspondantes.

En dépit de l'intérêt de multiplier les exemples où la synergie « recherche et expertise » est passée du statut de nécessité conceptuelle – ou de programme intellectuel – à celui de méthode effective de travail, le parti finalement adopté fut de limiter le champ de cette démonstration à la sûreté des exploitations et de ne considérer que quelques situations accidentelles, liées à des agressions résultant de phénomènes naturels potentiellement cataclysmiques (séismes et/ou inondations) ou à des dysfonctionnements graves d'une installation.

Ces sujets ont été choisis car les situations qu'ils décrivent font appel à des problématiques différentes, aussi bien en termes de nature des recherches supports, d'outils ou de méthodes à mettre en œuvre que de contenu et de finalité de l'expertise. Mais surtout, chacun des sujets sélectionnés met en évidence un aspect particulier de ce transfert des données acquises par la recherche vers l'expertise et des conditions dans lesquelles il s'opère. Ils montrent aussi en retour comment la difficulté rencontrée par l'expertise pour comprendre l'ensemble des enchaînements d'événements initiateurs d'accidents conduit naturellement à interroger la recherche pour réduire les incertitudes. Chacun des sujets, sous des angles et avec des motivations différentes, décrit cette synergie, moteur à double détente de la recherche et de l'expertise à l'IRSN.

L'étude du potentiel sismique de l'enracinement de la faille de la Moyenne Durance combine diverses méthodes d'investigation – éprouvées par des travaux de recherche, dont certains conduits de



longue date par l'IRSN – pour apprécier l'aléa sismique et sa magnitude dans une région où sont implantées un certain nombre d'installations nucléaires. Elle aboutit à encadrer le risque de manière suffisamment prédictive pour agir si nécessaire sur les infrastructures en cause, mais elle met aussi en évidence le besoin de réduire les incertitudes des relations empiriques utilisées à l'heure actuelle et peut-être de reconfigurer le réseau IRSN des mesures d'accélération.

L'approche pluridisciplinaire pour la caractérisation de failles actives, appliquée à la faille du Vuache en Haute-Savoie, procède de la même démarche qui vise à mieux caractériser l'aléa sismique dans une région à forte densité d'installations à risque : mais ici, l'approche est sensiblement d'une autre nature puisqu'elle se veut intégrée, en ayant recours aux apports de disciplines comme la sismotectonique, la sismique pétrolière, la géologie structurale et même la paléosismologie.

L'analyse combinée et l'interprétation de ces données est en soi un travail de recherche, qui conduit à préconiser une méthodologie totalement novatrice et potentiellement généralisable aux régions de faible déformation et de sismicité modérée. Comme la précédente étude, elle contribue directement à enrichir l'analyse de sûreté des exploitations de la région.

L'étude sur la protection des installations nucléaires contre les risques d'inondation constitue un exemple type de fécondation réciproque de la recherche et de l'expertise conduisant à une meilleure prise en compte d'une agression naturelle pour renforcer la sûreté des installations : l'objectif étant *in fine* d'élaborer un guide de référence sur le risque « inondation ».

L'application des études probabilistes de sûreté de niveau 2 et des techniques de fiabilité dynamique à la validation des guides d'intervention en accidents graves est probablement l'exemple qui incarne le mieux l'apport de la recherche sous toutes ses formes (expérimentales, théoriques, méthodologiques) à l'expertise, l'objectif étant clairement de valider – voire de corriger – les actions à conduire en situation d'accident grave. Et donc de renforcer les lignes de défense notamment dynamiques des installations pour mieux protéger les populations. Là encore, le fait de valoriser le capital des EPS dans un but bien précis, permet d'en montrer les limites et d'ouvrir de nouvelles voies de recherche.

L'expertise de la gestion comparée en France et en Finlande en cas d'accident de rupture de tube de générateur de vapeur s'appuie sur des codes de calcul thermohydraulique, eux-mêmes validés et paramétrés par des essais.

Au total, il apparaît qu'à la différence des autres chapitres du RST, la cohérence de ce dernier chapitre ne se trouve pas tant dans l'unité thématique des sujets développés que dans la démonstration que toutes les activités de l'IRSN, conduites au titre de son expertise ou de sa recherche relèvent, en dernière analyse, d'une même ambition, renforcer la sécurité, servie par une même approche méthodologique, adosser l'expertise à la recherche, faire en sorte qu'elles soient complémentaires, indissociables et interactives.

# ÉTUDE DU POTENTIEL SISMIQUE et de l'enracinement de la faille de la Moyenne Durance

---

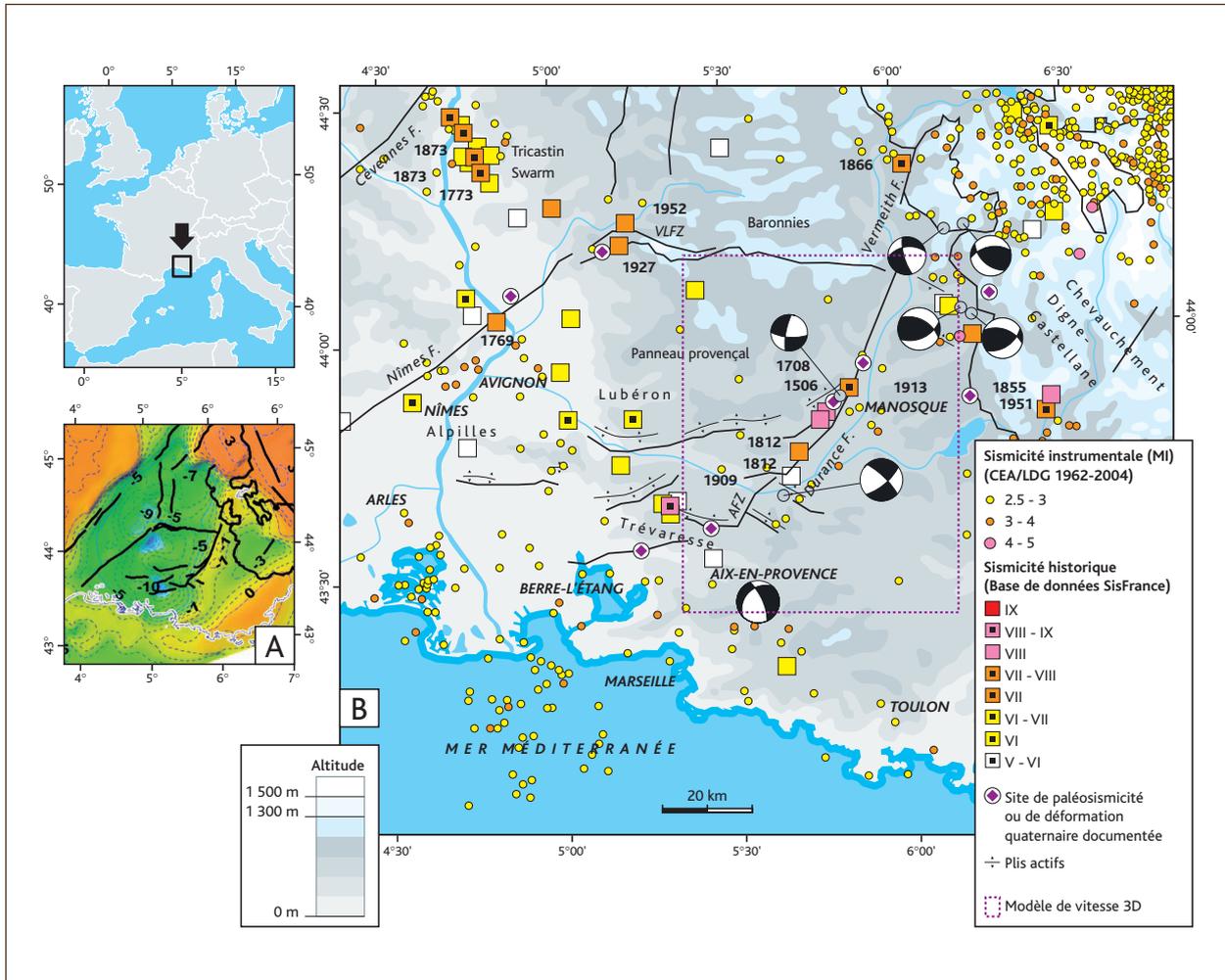
Edward Marc CUSHING, Stéphane BAIZE, Stéphane NECHTSCHHEIN, Pierre DERVIN, Philippe VOLANT  
Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations

---

Le Sud-Est de la France est fréquemment cité comme étant une des régions françaises (hors territoires d'outre-mer) présentant un niveau d'aléa sismique certes modéré, mais non négligeable si l'on en juge à partir des données de sismicité historique (figure 1). Deux séismes ont ainsi eu des conséquences sévères sur les vies humaines et les constructions : le séisme du 23 février 1887 en région Ligure, au sud-est de Nice, et celui du 11 juin 1909 dans les chaînons calcaires de la région de Lambesc et de Salon-de-Provence. Ce dernier a provoqué la mort d'environ 40 personnes.

Outre ces deux séismes d'intensité exceptionnelle, une sismicité régulière de plus faible niveau se produit ; elle s'exprime principalement dans l'arrière-pays niçois et le long d'un axe reliant la région aixoise aux confins des Alpes-de-Haute-Provence et s'étendant jusqu'à la région de la Motte-du-Caire. Sur ce dernier axe, qui correspond à la trace d'une faille très ancienne (300 millions d'années), les séismes modérés se sont produits presque régulièrement depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. Cette faille, ou plutôt cet ensemble de failles, est dénommée par les géologues « faille de la Moyenne Durance » (FMD). Si la magnitude des séismes destructeurs de Ligurie et du pays niçois est estimée à environ 6, celles des séismes de la FMD sont plus faibles, inférieures à 5,3. Le système de failles est par ailleurs caractérisé par une microsismicité régulière. Depuis le début des années 90, les géologues ont également mis en évidence, à l'échelle régionale et sur la FMD en particulier, des traces de séismes préhistoriques qui auraient pu atteindre ou dépasser les magnitudes des séismes de Lambesc et de la région Ligure.

Bien que la région du Sud-Est de la France ait déjà été beaucoup étudiée par les sismologues et les géologues, la connaissance des failles et la quantification de leur « potentialité » à générer des séismes restent encore insuffisantes pour définir précisément l'aléa sismique qui leur est associé. Des études approfondies sont actuellement en cours dans la communauté scientifique nationale. L'IRSN y contribue largement depuis une quinzaine d'années, dans le cadre de ses activités de recherche. L'effort a jusqu'à présent été focalisé sur le système de failles de la Moyenne Durance en tant que cas d'étude typique d'une « faille lente en contexte intracontinental ». L'IRSN a installé depuis une dizaine d'années un réseau de mesures sismiques et un ensemble de stations équipées de récepteurs GPS (de façon permanente ou temporaire). Cette instrumentation a pour but de caractériser l'activité des différents segments constituant le système de failles de la FMD. En participant aux réseaux nationaux (géodésique et sismologique) et en développant des réseaux locaux, l'IRSN contribue ainsi à la recherche en tectonique à différentes échelles, tout en poursuivant son objectif principal : l'estimation de l'aléa sismique pour la sûreté des installations à risque.



**Figure 1** Carte générale de la sismicité régionale et des principales failles.

## Caractérisation de l'aléa sismique : les questions posées

Parmi les missions de l'IRSN concernant la sûreté des installations nucléaires, l'une d'elles consiste à évaluer le niveau de protection vis-à-vis de « l'agression externe » que peuvent constituer les séismes. Le risque sismique résulte de la combinaison de l'aléa (mouvement du sol généré par un séisme) et de la vulnérabilité du bâti ou des infrastructures. La pratique réglementaire prévoit que le maintien des fonctions importantes de sûreté d'une installation nucléaire de base en surface, notamment et selon ses caractéristiques précises, l'arrêt sûr, le refroidissement et le confinement des produits radioactifs, puisse être assuré pendant et/ou à la suite de séismes plausibles pouvant affecter le site de l'installation considérée.

La pratique actuelle d'évaluation de l'aléa sismique en France pour les installations à risque (installations nucléaires et chimiques, barrages) est une approche déterministe. Cette approche estime le niveau d'accélération qui serait produit par le plus fort séisme historique ramené au plus près du site, augmenté d'une marge de sécurité. Cette marge est définie en augmentant d'un demi-degré la magnitude du séisme retenu.

D'une manière générale, pour évaluer l'aléa, il est nécessaire d'identifier les « sources » capables de produire les séismes agresseurs et de caractériser leur potentialité. Généralement, dans les zones de faible sismicité où les failles sont mal connues, l'approche déterministe revient à considérer des régions comme sources possibles de séismes. Ces zones sont définies sur la base de leur homogénéité en termes de géologie et de sismicité. Dans les régions un peu plus actives comme la Provence, l'Alsace et les Pyrénées par exemple, les failles sont souvent mieux connues et, surtout, des

séismes importants peuvent être associés (par leur position cartographique) à ces failles-sources.

Il reste qu'estimer l'aléa relève d'une démarche plus large qui nécessite d'apporter des réponses aux questions suivantes :

■ quelle est la taille des failles qui peuvent générer des séismes ? La magnitude d'un séisme, et donc sa dangerosité, est directement liée à ce paramètre. La taille et l'extension d'une faille active peuvent être déterminées par la cartographie en surface et la localisation des microséismes, ainsi que par l'imagerie en profondeur. La caractérisation de séismes majeurs « préhistoriques » permet également d'évaluer ce paramètre ;

■ avec quelle vitesse se déforme la région affectée par les failles en question ? Il s'agit d'un critère important pour savoir avec quelle périodicité reviendront les séismes majeurs. En plus de la datation des marqueurs géologiques, les mesures géodésiques apportent des données utiles pour évaluer cette vitesse.

Évaluer l'aléa sismique associé à un système de failles actives consiste à répondre aux questions précédentes grâce à la mise en œuvre d'études. Les principaux résultats de celles menées par l'IRSN sur la FMD sont présentés ci-après, avec la description et l'analyse des données récentes concernant la microsismicité, la géométrie en profondeur de la faille, la vitesse de déformation. L'approche correspondante est complémentaire de l'approche réglementaire mentionnée ci-avant et permet d'appréhender l'aléa spécifique d'une faille lente active, pour laquelle la sismicité historique donne accès à une période trop courte pour être représentative de l'historique complet de son activité.

## Taille des failles du système FMD pouvant produire les séismes

### Potentialité de séismes majeurs liée à la connaissance de l'enracinement des failles

La FMD n'est pas une structure unique et continue. Il s'agit d'un système complexe de failles plutôt discontinues, pour la plupart héritées d'épisodes tectoniques anciens, qui s'étend sur 70 km et qui affecte vraisemblablement toute l'épaisseur de la croûte jusqu'à une trentaine de km de profondeur. Ce système de failles a joué un rôle majeur pendant l'ère Mésozoïque (250 à 65 Ma), puis à l'Oligo-Miocène (35 à 15 Ma) lors de la formation des bassins sédimentaires de Manosque-Forcalquier et d'Aix-en-Provence, puis du bassin de Valensole (de 10 Ma à maintenant). À ces époques, les failles ont joué en étirement pendant la formation de la Méditerranée. Par la suite, ces mêmes failles ont joué en raccourcissement pendant les épisodes alpins (Mio-Pliocène, entre 15 et 2 Ma). Elles ont donc été récemment remobilisées en failles inverses ou décrochantes, suivant

leur orientation par rapport à la direction de raccourcissement de la croûte.

Des études de paléosismicité (étude des traces des séismes « préhistoriques » dans les couches géologiques récentes) ont révélé une déformation qui a été interprétée comme la preuve d'un paléoséisme près de Manosque. D'après les auteurs [Sébrier *et al.*, 1997], un déplacement vertical métrique aurait pu se produire pendant un événement sismique entre 27 000 ans BP et 9 000 ans BP. La FMD aurait donc été capable de produire un séisme important, dont la magnitude est estimée entre 6,0 et 6,5 en s'appuyant sur des relations empiriques reliant dimension de la faille et énergie du séisme. Une telle magnitude conduit à admettre que la faille a affecté, lors de ce séisme majeur, non seulement la série sédimentaire superficielle (entre 0 et 5 km), mais aussi une partie profonde jusqu'à 10-15 km. Ceci implique que la FMD serait une faille « enracinée » dans le socle cristallin.

Les interprétations des déformations superficielles sont souvent ténues et leur signification en termes de paléoséismes (surtout de magnitude) est délicate et parfois sujette à caution. Si les déformations observées près de Manosque ne correspondaient pas à une trace de paléoséisme, aucune autre preuve de rupture impliquant largement la croûte n'existerait pour la FMD.

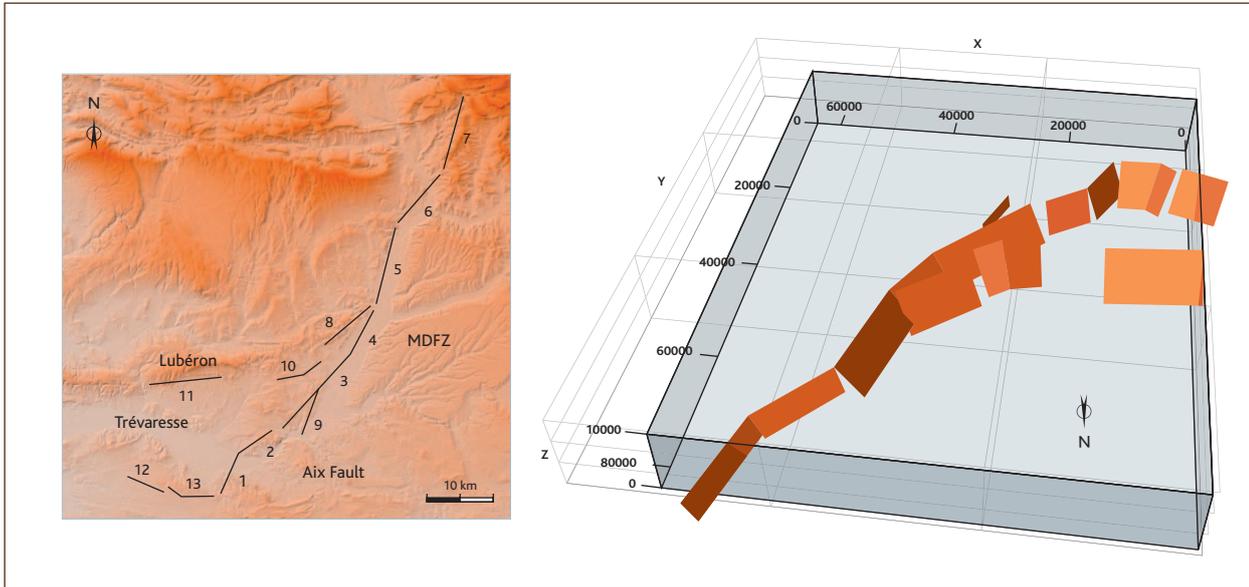
Dans ce contexte, les seules données qui permettent de déterminer les caractéristiques des séismes maximaux sont les observations historiques (1509, 1708, 1812, 1913). Elles conduisent à des magnitudes voisines de 5 et à des séismes de faible profondeur. Dans ce cas, seule la partie supérieure de la croûte (couverture sédimentaire) serait active.

La levée de l'indétermination entre ces deux hypothèses d'activité superficielle ou profonde sur l'enracinement est importante en termes d'aléa sismique puisqu'elle conditionne, *in fine*, le choix des caractéristiques des séismes à prendre en compte pour la FMD.

Deux approches complémentaires ont été mises en œuvre afin d'évaluer les dimensions des sources sismogéniques : d'une part, l'examen des lignes sismiques disponibles pour imager les failles en profondeur, d'autre part, l'étude de l'activité microsismique pour bien localiser en profondeur les zones actives des segments de faille.

### Connaissance de la structure (3D) de la FMD à partir de l'imagerie géophysique (dont données pétrolières)

Les dimensions des sources sont conditionnées par la répartition spatiale des « segments » de faille. Décrire cette segmentation revient donc, dans un premier temps, à détailler les traces des branches de faille qui peuvent être cartographiées en surface. Dans un deuxième temps, il faut évaluer l'extension en profondeur des différents segments de faille qui constituent autant de zones possibles de rupture individuelle. L'aire de chacun de ces segments



**Figure 2** Segmentation de la FMD (détail de la région de Manosque). Segmentation simplifiée en vues 2D & 3D.

conditionne la taille des séismes maximaux susceptibles de se produire sur la faille. On dispose de relations empiriques reliant certains paramètres géométriques tels que la surface de la rupture instantanée lors d'un séisme, la longueur de la trace de la faille en surface pendant cette rupture, à l'énergie du séisme exprimée par sa magnitude. Ces relations ont été établies à partir d'observations géologiques et sismologiques, pendant les trente dernières années, lors de séismes survenus en différentes régions de la planète.

Depuis la fin des années 50, les compagnies pétrolières se sont intéressées aux réserves en hydrocarbures sur le territoire national et, dès 1960, un certain nombre de forages d'exploration ont été réalisés dans le sous-sol provençal, notamment dans la région de la Durance. On dispose ainsi aujourd'hui de données géologiques détaillées sur les séries sédimentaires qui constituent cette région. Ces forages ont localement atteint le « substratum cristallin » de la série sédimentaire, en particulier à l'est de la vallée de la Durance. En plus de l'étude de la géométrie des couches sédimentaires, preuve a été apportée de la forte dissymétrie géologique entre la couverture sédimentaire épaisse à l'ouest de la FMD (bassin de Forcalquier) et une couverture plus mince (1 à 2 km) à l'est (*figure 2*).

Les recherches pétrolières ont ensuite été poursuivies par des campagnes exhaustives de sismique-réflexion, visant à imager les premiers kilomètres des séries sédimentaires. Ces campagnes, réalisées dans les années 1970 et 1980, ont amélioré significativement la connaissance structurale régionale. Si les données interprétées sont toujours non publiques, les données brutes sont, en revanche, disponibles et peuvent être « déstockées » (dix ans

après leur acquisition selon la loi). Jusque dans les années 1980, la représentation de la structure de la FMD a reposé sur l'hypothèse d'une faille à fort pendage, s'ancrant profondément dans la croûte cristalline, affectant de concert le socle pré-Mésozoïque et sa couverture sédimentaire. Cette interprétation reposait sur les données de forages et les campagnes de sismique des années 1970 (société Elf).

L'analyse des données de sismique-réflexion acquises par la société Total en 1985-1986 a permis à Benedicto-Esteban (1996) de proposer une nouvelle interprétation structurale de la FMD entre Saint-Paul-lez-Durance et Peyruis. Par rapport à l'interprétation initiale, cette nouvelle représentation décrit un système de failles inclinées s'aplatissant vers la base de la série sédimentaire dans les niveaux ductiles de gypses et de sel du Trias (faciès parfois qualifiés de « couches-savons »), réputés pour favoriser le glissement en masse de la pile sédimentaire sus-jacente. Dans l'interprétation de Benedicto-Esteban (1996), ces failles dites listriques surplombent d'autres failles qui provoquent l'enfoncement vers l'ouest du socle cristallin.

L'IRSN a également interprété quelques autres lignes sismiques. Le CEA a fourni quatre lignes de 1971, tandis que la société Coparex en a fourni trois (campagne Total de 1985-1986). Sur la base de ces sept profils et de sa connaissance géologique de la région, l'IRSN a lui aussi identifié deux ensembles de failles superposées. Ainsi, sur la base de l'ensemble des données précédentes, l'existence de failles profondes ne peut pas être écartée et la question

de leur activité reste en suspens. C'est pour répondre à ces incertitudes que l'IRSN a décidé de tirer également parti des données instrumentales disponibles depuis l'installation dans les années 1990 de son réseau sismométrique.

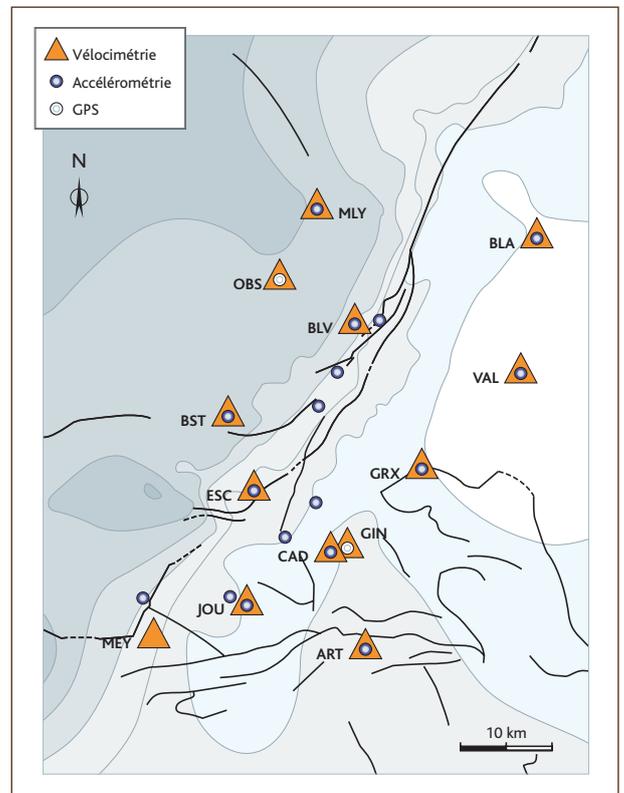
### Utilisation par l'IRSN de la microsismicité pour connaître la géométrie de la faille et le mécanisme de déformation Moyens mis en œuvre

L'IRSN étudie la sismicité de la FMD afin d'améliorer la compréhension de sa structure et de son fonctionnement. C'est en 1992 que l'IRSN a entrepris la conception et la mise en place de son réseau de surveillance sismique, constitué alors de six points de mesure et centré sur le village de Beaumont-de-Pertuis (Vaucluse). L'objectif de ce dispositif était de pouvoir localiser les séismes se produisant sur la FMD et d'en calculer la magnitude afin de connaître le plus finement possible le fonctionnement de cette faille active.

Le réseau sismique IRSN de la Durance est actuellement composé de 12 vélocimètres et de 18 accéléromètres (*figure 3*). Les stations vélocimétriques comprennent des capteurs « L4 » de fréquence de résonance 1 Hz, associés à des chaînes d'acquisition « M88/MC » de fabrication Lennartz. Le parc accélérométrique est composé d'instruments « Etna » et « K2 » fabriqués par Kinematics. Toutes ces stations sont à trois composantes (deux composantes horizontales, une composante verticale). L'ensemble des vélocimètres, ainsi que les accéléromètres de Cadarache, Pierrevert, Manosque, Jouques, Saint-Michel-l'Observatoire et la Vigie sont télé-métrés. La combinaison de ces deux types d'instrument permet, d'une part, de surveiller la sismicité locale avec une très haute sensibilité grâce aux vélocimètres, d'autre part, d'avoir des signaux non saturés en cas de mouvement fort grâce aux accéléromètres.

### Premiers résultats

Les premiers résultats sur la microsismicité de la FMD ont été publiés par Volant [Volant *et al.*, 2000 et 2003]. Un travail plus exhaustif sur l'activité sismique enregistrée de 1999 à 2006 a été réalisé en 2006. Cette étude a permis de localiser la microsismicité plus finement et de préciser les modalités de répartition des contraintes autour de la FMD (Cushing *et al.*, 2008). Auparavant, il a été nécessaire de réaliser une synthèse des données géologiques et géophysiques disponibles afin d'établir, d'une part, un modèle à petite échelle de la segmentation de la FMD [Cushing et Bellier, 2003] et, d'autre part, un modèle de vitesse « 3D » (des ondes P) à l'échelle régionale. Ce modèle s'attache à décrire la géométrie de la croûte terrestre en termes de superposition et de juxtaposition de couches de propriétés différentes (notamment en termes de vitesse de propagation des ondes sismiques). Compte tenu du faible nombre de lignes sismiques et de forages disponibles, ce modèle reste schéma-



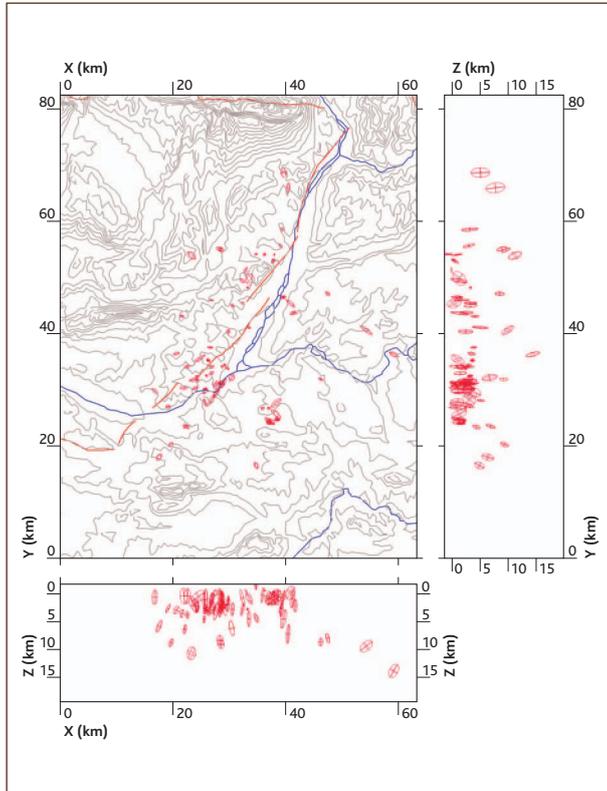
**Figure 3** Réseaux instrumentaux de la FMD (accélérométrie, vélocimétrie, GPS).

tique, mais il est plus adapté pour la localisation de la microsismicité que le modèle « 1D » utilisé auparavant.

La localisation des séismes a été obtenue en utilisant ce modèle de vitesse 3D et le programme d'inversion « NonLinLoc » développé par A. Lomax [Volant *et al.*, 2003]. La méthode utilisée permet de minimiser les incertitudes sur la localisation en trois dimensions. Ainsi, 155 événements ont été localisés. Leur magnitude de moment a été calculée à partir des spectres de déplacement [Nechtschein, 2003 ; Volant *et al.*, 2003] : elle est comprise entre 1 et 3. Pour réaliser une interprétation sismotectonique, seuls les « meilleurs » séismes remplissant les deux conditions suivantes ont été retenus : ils ont été enregistrés par au moins cinq stations et ils ont été suffisamment bien localisés (incertitude inférieure ou égale à 2 km). Ces critères ont conduit à ne conserver que 59 événements localisés correspondant à des séismes « tectoniques ». Il n'a été possible de calculer des mécanismes au foyer<sup>(1)</sup>, décrivant la cinématique du déplacement de la faille mobilisée pendant le séisme, que pour 27 d'entre eux, en utilisant le code « FPFIT » [Reasenber & Oppenheimer, 1985].

### Répartition de la sismicité

La distribution des épicentres (*figure 4*) montre une image moins diffuse que celle de la microsismicité décrite par les réseaux nationaux



**Figure 4** Localisation 3D de la microsismicité enregistrée par le réseau IRSN.

(Rennass, CEA/LDG). L'activité microsismique est quasi nulle sous le panneau provençal (à l'ouest de la FMD), sous la montagne de Lure et le Lubéron. La majorité des événements se produit dans une bande de 5 km de large environ, tout au long des 50 km des branches du système de failles entre Peyruis et Meyrargues. Une densité plus marquée est notée entre Saint-Paul-Lez-Durance et Oraison.

La grande majorité des événements se situe à une profondeur inférieure à 4 km ; l'activité microsismique se produit donc majoritairement dans la couverture sédimentaire, au-dessus du *substratum* antétriasique. Un essaim de sismicité est localisé au sud-est du secteur, dans les environs du chevauchement à vergence sud du Mont Major. La sismicité y est très superficielle et traduit vraisemblablement l'activité du décollement de cette structure au-dessus du trias salifère peu profond à cet endroit. Quelques événements sont situés dans le prolongement méridional de la FMD (au niveau de la faille de Jouques), entre 4 et 9 km de profondeur. Ils se sont vraisemblablement produits dans le socle antétriasique, puisque le toit du socle est assez superficiel dans

ce secteur, comme l'atteste le sondage de Jouques (socle à 2 km). Des événements profonds (entre 8 et 15 km) ont été localisés au nord du plateau de Valensole. Ils pourraient attester le fonctionnement de failles profondes, non localisées car n'émergeant pas à la surface, situées sous les plis de Mirabeau et Lambruissier.

### Processus de déformation

La majorité des 27 mécanismes au foyer associés aux événements enregistrés montre des axes en compression subméridiens, induisant pour l'essentiel des cinématiques en coulissage (*figure 5*). Ceci est cohérent avec le régime tectonique en décrochement senestre de la FMD, déduit des données géologiques qui indiquent un raccourcissement méridien. Quelques mécanismes correspondent toutefois à des cinématiques en failles inverses ou en failles normales. Les jeux inverses sont localisés sur l'ensemble du secteur d'étude, alors que les jeux normaux se trouvent uniquement près de l'extrémité méridionale de la FMD. Cette particularité peut résulter d'une modification locale du régime des contraintes à la terminaison de faille. L'analyse de la distribution des axes de contrainte conduit à proposer une direction moyenne de compression N-S à NNO-SSE autour de la faille. La forte proportion de séismes localisés dans la couverture suggère l'existence d'un découplage mécanique situé au niveau des évaporites triasiques. Par ailleurs, la différence de distribution des axes de compression entre le socle (NE) et sa couverture (NNO) pourrait indiquer l'existence d'un découplage des régimes tectoniques entre le *substratum* et le panneau provençal chevauchant. L'étude des mécanismes au foyer déduits de l'analyse de la microsismicité conduit à caractériser une contrainte maximale horizontale moyenne orientée N165°E, c'est-à-dire SSE.

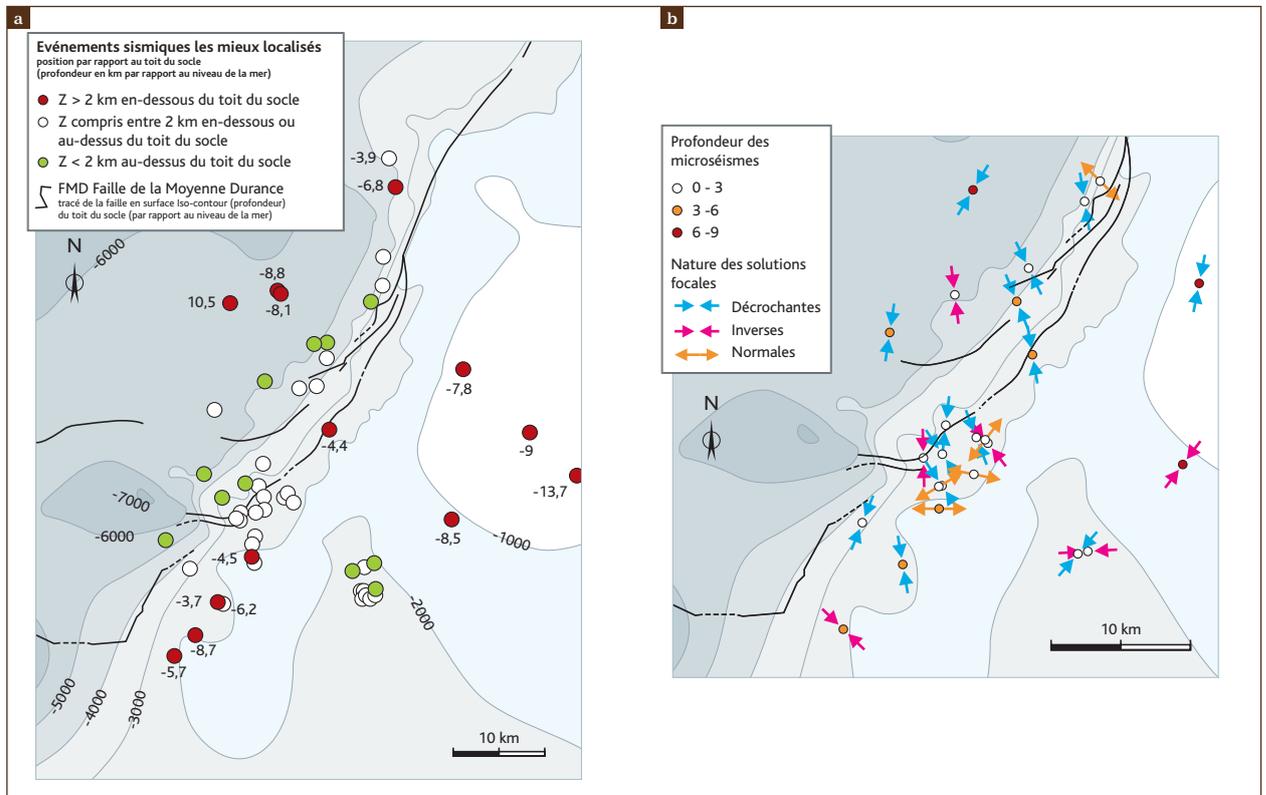
## Évaluation de la vitesse de glissement de la FMD

### Vitesse de la faille et période de retour

Les séismes de magnitude importante ( $M > 6,0$ ) peuvent produire une rupture en surface. La taille de cette rupture reflète le déplacement instantané des lèvres de la faille. Plus la magnitude est élevée, plus le déplacement (ou « dislocation ») est important. Par exemple, un séisme de magnitude 6,0 provoquera un déplacement en surface de l'ordre de 20 à 50 cm, un séisme de magnitude 6,5 provoquera un déplacement de 0,5 à 1 m. Après un tel séisme, il est possible que la faille se « bloque » et que les contraintes s'accumulent sans provoquer de glissement ultérieur. C'est au déclenchement du séisme suivant que les contraintes sont libérées par le glissement de la faille. Ce processus est appelé cycle sismique.

Le déplacement cumulé intégrant plusieurs cycles sismiques peut être déterminé directement en mesurant le déplacement de mar-

(1) Un mécanisme au foyer consiste en la détermination de l'orientation de la faille qui glisse lors du séisme, ainsi que de la direction de glissement relative des blocs le long de cette faille.



**Figure 5** a : Localisation des événements sismiques vis-à-vis de la position de la segmentation et du socle cristallin. La profondeur du toit du socle cristallin est indiquée par des courbes isobathes en pointillés (altitude de référence = niveau de la mer).  
 b : direction des axes principaux des contraintes déduites des mécanismes au foyer des séismes.

queurs géologiques assez anciens et datés. Les vitesses de glissement des failles peuvent également être estimées à partir de mesures indirectes de plus court terme, issues des méthodes géodésiques. Compte tenu des déplacements unitaires associés à chaque classe de magnitude, on peut calculer une période de retour pour la classe de séismes correspondante, et ainsi évaluer la durée du cycle sismique.

Cette démarche est appliquée aux failles rapides des contextes très actifs (Californie par exemple), mais reste discutable pour un contexte intra-plaque où le cycle sismique peut être très long. Faute de disposer de méthode spécifique pour évaluer des périodes de retour pour les failles lentes, les paramètres du cycle sismique sont évalués à partir d'estimations de la vitesse de glissement à long terme de la faille et de la taille unitaire des dislocations sismiques maximales possibles.

#### Décalage de marqueurs géologiques

Depuis le milieu des années 1990, l'IRSN collabore avec les institutions universitaires Orsay-Terre puis Cerege pour caractériser le contexte géologique et cinématique de la FMD. Ces études ont été

concrétisées par une thèse [Baroux, 2000] et par une étude de quantification cinématique [Siame *et al.*, 2004]. Ces travaux, fondés sur la quantification du déplacement de marqueurs géologiques datés (utilisation de cosmonucléides), conduisent à proposer un taux de glissement à long terme de la FMD inférieur au millimètre par an.

#### Géodésie spatiale (GPS)

La géodésie spatiale, mise en œuvre pour l'étude de la tectonique active depuis le début des années 1990 en France, constitue une approche complémentaire des études géologiques et permet d'accéder aux champs de déplacement « instantanés ». Elle fait l'objet de recherches à l'IRSN depuis de nombreuses années. L'Institut a ainsi procédé à l'installation d'un réseau de mesures temporaires (dans les Pyrénées-Orientales), semi-permanentes et permanentes (dans le Jura et en Provence). Grâce aux mesures continues des stations Gina (Ginasservis, Var) et Mich (observatoire de Saint-Michel-de-Provence, Alpes-de-Haute-Provence), il dispose aujourd'hui d'environ sept années et demie d'observations à proximité de la FMD, de part et d'autre de celle-ci. Cette longue série temporelle, l'une des plus longues d'Europe, permet d'évaluer la

vitesse de rapprochement relatif des deux points concernés à  $-0,1 \pm 0,6$  mm/a à  $2 \sigma$  compte tenu du modèle de bruit utilisé. L'extrapolation de ces vitesses « géodésiques » au glissement « long terme » reste pour le moment délicate. Le résultat obtenu montre cependant que la tendance est très faible, mais cohérente avec les vitesses de glissement long terme. Par ailleurs, l'analyse en tenseur de déformation sur différentes paires de stations en Provence donne toujours la même direction de raccourcissement Nord-Sud.

Concernant cette instrumentation géodésique, l'IRSN a installé, en collaboration avec l'UMR Géosciences Azur (université de Sophia-Antipolis, Alpes-Maritimes), un réseau de sites semi-permanents régulièrement implantés autour du segment de Manosque. Ce réseau permettra, en cas de séisme majeur sur la FMD, de mesurer précisément les déplacements induits et ainsi de mieux comprendre la cinématique des failles associée aux événements sismiques locaux.

## Premières réponses apportées en termes d'aléa sismique

### Concernant la magnitude maximale des séismes

Toutes les études et travaux mentionnés précédemment, combinés avec la connaissance géologique de la région, permettent de proposer un modèle géométrique de segmentation 3D du système de failles de la Durance. Sur la base de ce modèle, il est possible d'évaluer l'aléa sismique associé à la FMD. À la suite des travaux de Baroux [Baroux, 2000] et de l'interprétation susmentionnée des lignes sismiques par l'IRSN [Aochi *et al.*, 2006] a été estimée la potentialité maximale de la FMD à une magnitude de 6,9. Cette estimation est en accord avec celles obtenues par d'autres études académiques [voir par exemple Sébrier *et al.*, 1997]. Dans tous les cas, l'estimation repose sur l'hypothèse de failles actives profondément enracinées dans le *substratum* cristallin.

L'étude de la microsismicité montre qu'au niveau de la FMD, l'activité réside, pour l'essentiel, dans la couverture sédimentaire « décollée » sur le Trias salifère et gypseux. En considérant ce résultat et les données cartographiques, ainsi que celles obtenues par l'interprétation des profils sismiques, la dimension maximale du plus grand segment cartographié est de 18 km  $\times$  6 km. En utilisant les relations empiriques reliant magnitude de séisme et dimension de faille [Wells et Coppersmith, 1994], cela implique que la magnitude maximale individuelle par segment ne peut pas dépasser  $M_w = 6,0 \pm 0,2$ . Une autre estimation de  $M_w$ , suivant la relation de [Hanks et Kanamori, 1979] donne  $M_w = 6,1$  avec un coulissage de l'ordre de 0,5 m (dislocation co-sismique) le long de la faille. Bien entendu, le déclenchement d'un séisme peut impliquer

simultanément plusieurs segments de faille ; dans cette configuration, la magnitude maximale sera plus importante.

### Au sujet de la période de retour des événements maximaux

Différentes approches géologiques ou géomorphologiques convergent vers une vitesse de glissement « long terme » inférieure au millimètre de la FMD entre 0,01 et 0,07 [Baroux, 2000 ; Siame *et al.*, 2004]. L'analyse des données GPS aboutit aussi à une vitesse de glissement « très court terme » inférieure à 0,1 mm/an.

Les périodes de retour de séismes peuvent être estimées à l'aide de relations empiriques reliant dislocation co-sismique et surface des failles mobilisées. Ces estimations conduisent à proposer des scénarios impliquant un ou plusieurs segments de faille, avec des périodes de retour comprises entre 5 000 et 10 000 ans pour des magnitudes comprises entre 5,8 et 6,5 respectivement, cette dernière valeur étant considérée comme une borne supérieure, puisqu'elle correspond à la dislocation de la totalité des segments identifiés.

L'utilisation des relations empiriques mentionnées précédemment reste toutefois délicate pour des failles « lentes », notamment à cause de la méconnaissance de leur comportement. De plus, aucun élément ne permet d'inclure ou d'exclure une part de glissement asismique (glissement continu d'une faille sans séisme). Malgré toutes ces incertitudes, l'utilisation de relations empiriques permet au moins de donner un ordre de grandeur majorant de la magnitude et de la période de retour des séismes attendus sur la FMD.

## ■ Conclusion

La localisation fine de la microsismicité à l'aide du réseau IRSN permet de considérer aujourd'hui que l'activité actuelle de la faille est principalement localisée dans la partie supérieure de la croûte (dans la pile sédimentaire), impliquant une dimension réduite des segments de faille actifs du fait de leur faible profondeur d'enracinement. Ce résultat permet d'estimer une magnitude maximale compatible avec les caractéristiques géométriques retenues aujourd'hui. Associé aux résultats issus de nombreuses études géologiques et de l'interprétation des données géodésiques acquises par l'IRSN, il permet également d'estimer la période de retour des événements maximaux plausibles. Les études montrent, d'une part, que la FMD est une faille « lente » apte à produire des séismes avec des ruptures en surface (comme à Valvèranne, près de Manosque), d'autre part, que la dimension des sources est cependant limitée par la forte segmentation verticale et horizontale, conduisant à estimer des séismes maximaux de l'ordre de  $M_w \sim 6,5$ .

La localisation 3D des séismes enregistrés entre 1999 et 2006 a révélé l'existence d'une activité sismique profonde. Cette activité n'est pas directement associée à des failles connues en surface et se situe à la périphérie du système de failles, notamment au nord du plateau de Valensole.

Un certain nombre d'actions relatives à la caractérisation des failles du secteur de la Moyenne Durance est en cours (interprétation de 400 km de lignes sismiques dans le cadre d'une collaboration CEA-Cadarache/IRSN/BRGM/Cerege ; relocalisation fine de la microsismicité enregistrée par le réseau IRSN dans le cadre d'une collaboration IRSN/Collège de France ; synthèses géologiques dans le cadre de la thèse (CEA/Cerege) de S. Molliex ; tirs de nouveaux profils sismiques par le CEA dans le cadre du programme CASHIMA (programme de R&D du CEA dédié à l'étude de l'aléa sismique autour du site de Cadarache). L'ensemble de ces actions devrait permettre d'améliorer encore la connaissance des failles actives du secteur.

Les résultats acquis par le réseau de surveillance sismique de l'IRSN ont permis de caractériser la microsismicité de la FMD et des structures environnantes et de proposer une évaluation de l'aléa sismique plus précise. Une acquisition de plus longue donnée de cette surveillance sismique ne devrait pas modifier l'image d'ores et déjà obtenue, sauf peut-être en cas de crise sismique majeure. Compte tenu de la sismicité historique récurrente observée sur la FMD, il est envisagé que le réseau IRSN soit reconfiguré en accélérométrie uniquement afin d'enregistrer d'éventuels mouvements forts lors d'événements significatifs possibles. Pour ce qui concerne l'évolution du réseau vélocimétrique, une discussion est en cours quant à son devenir avec la communauté académique.

#### Références

- H. Aochi, M. Cushing, O. Scotti & C. Berge-Thierry, 2006, *Estimating rupture scenario likelihood based on dynamic rupture simulations: the example of the segmented Middle Durance fault, southeastern France*. *Geophysical Journal International*, 165 (2), 436-446.
- E. Baroux, 2000, *Tectonique active en région à sismicité modérée : le cas de la Provence (France)*. Apport d'une approche pluridisciplinaire. Thèse université Paris-Sud, France.
- A. Benedicto-Esteban, 1996, *Modèles tectono-sédimentaires de bassins en extension et style structural de la marge passive du Golfe du Lion (partie Nord), Sud-Est, France*. Thèse université de Montpellier II, France.
- E.M. Cushing & O. Bellier, 2003, *La Faille de la Moyenne Durance : précision concernant le tracé en surface de la faille entre Pertuis et Château-Arnoux*. Rapport interne IRSN DP/RE/SERGD n° 03-21.
- E.M. Cushing, O. Bellier, S. Nechtschein, M. Sébrier, A. Lomax, Ph. Volant, P. Dervin, P. Guignard, L. Bove, 2008, *A multidisciplinary study of a slow-slipping fault for seismic hazard assessment: the example of the Middle Durance Fault (SE France)*. *Geophysical Journal International* 172 (3), 1163-1178. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03683.x
- T.C. Hanks & H. Kanamori, 1979, *A moment-magnitude scale*. *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350.
- S. Nechtschein, 2003, *Calcul d'une magnitude de moment Mw pour les séismes enregistrés par le réseau de la Durance*. Rapport interne IRSN DEI/SARG n° 03-01.
- P.A. Reasenber & D. Oppenheimer, 1985, *FPFIT, FPLOT, & FPPAGE: Fortran computer programs for calculating & displaying earthquake fault-plane solutions*. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 85-739.
- M. Sébrier, A. Ghafiri & J.-L. Blès, 1997, *Paleoseismicity in France: fault trench studies in a region of moderate seismicity*. *J. Geodyn.*, 24, 207-217.
- L. Siame, O. Bellier, R. Braucher, M. Sébrier, M. Cushing, D. Bourles, B. Hamelin, E. Baroux, B. De Voogd, G. Rasebeck & F. Yiu, 2004, *Local erosion rates versus active tectonics: cosmic ray exposure modelling in Provence (south-east France)*. *Earth Planet. Sci.*, 220, 345-364.
- Ph. Volant, C. Berge-Thierry, P. Dervin, M. Cushing, G. Mohammadioun & F. Mathieu, 2000, *The South Eastern Durance fault permanent network: Preliminary results*. *Journal of Seismology*, 4, p. 175-189.
- Ph. Volant, A. Lomax, S. Nechtschein, M. Cushing, T. Ait-Ettajer, C. Berge-Thierry & P. Dervin, 2003, *Localisation 3D et calcul de magnitude pour les événements du réseau Durance*. 6<sup>e</sup> colloque national de l'Association française de génie parasismique, École Polytechnique, Palaiseau (France), 1-3 juillet 2003. I, 21-32.
- D. Wells, K.J. Coppersmith, 1994, *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area & Surface Displacement*. *Bull. of Seismol. Soc. Am.*, 84, 4, p. 974-1002.

## 5.2

## APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE pour la caractérisation de failles actives : application à la faille du Vuache (Haute-Savoie)

**Stéphane BAIZE**  
Bureau d'évaluation des risques  
sismiques pour la sûreté  
des installations

■ La faille du Vuache est une structure majeure parcourant le bassin molassique, constitué de sédiments accumulés, depuis les Alpes jusqu'au Jura. Elle présente une activité sismique significative, comme la plupart des failles de même direction affectant le sud du Jura jusqu'à l'île Crémieu. La présence de sites nucléaires dans cette région (Creys, Bugey) a conduit l'IRSN à engager des études pour améliorer la connaissance de l'aléa sismique associé à cette famille de failles, en commençant par la faille du Vuache.

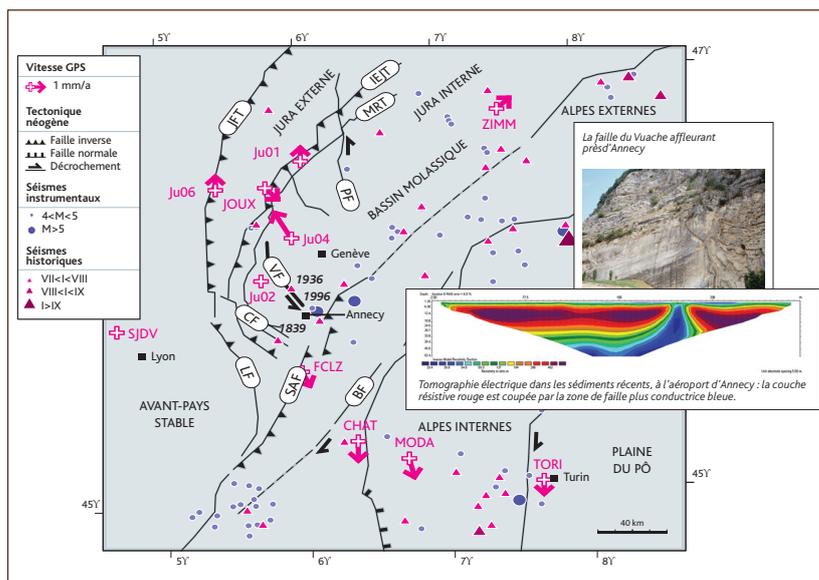
■ La connaissance sismotectonique de cette faille s'est améliorée depuis le séisme d'Epagny-Annecy, séisme de magnitude modérée ( $M = 5,3$ ) et superficiel (3 km) survenu en 1996. L'analyse du choc principal et de ses répliques indique que le séisme s'est produit sous la plaine d'Epagny selon un mécanisme en décrochement senestre, sur une faille verticale décomposée en deux segments. Les séismes historiques (1839, 1936, 1980) connus sur cette faille sont des événements comparables en termes de magnitude et profondeur. Dès 2000, l'IRSN a implanté des stations de mesures par GPS dans le Jura sud. Les données recueillies depuis six ans montrent un déplacement senestre de part et d'autre de la faille, entre les stations Ju02 et Ju04. La valeur de déplacement relatif est élevée (1 mm/an), et les incertitudes sur celle-ci devraient être diminuées en poursuivant les mesures. Les données de la sismique pétrolière fournissent une image en profondeur de la faille et permettent de relier les observations de surface à des accidents majeurs profonds, ce qui complète la car-

tographie issue d'investigations classiques de géologie structurale ou de géomorphologie. Cette cartographie montre que la faille du Vuache est discontinue et constituée de segments de quelques kilomètres de long. La connaissance de l'extension en profondeur permet d'estimer la surface totale de la faille active qui, d'après les lois empiriques, renseigne sur la magnitude des séismes maximaux envisageables. Dans le cas de la faille du Vuache, les données retraitées montrent que la faille superficielle (au-dessus de 4 km) se situe à l'aplomb d'une faille enracinée dans le socle. Ceci suggère que des séismes plus profonds et plus forts (que ceux connus historiquement) sont possibles. L'IRSN s'est donc attaché depuis deux ans à rechercher la trace éventuelle de tels événements (paléoséismes) dans les couches géologiques âgées de quelques milliers d'années. Avant d'engager les travaux de tranchées, il a fallu localiser précisément cette trace éventuelle au moyen de diverses techniques géophysiques légères (tomographie électrique, électromagnétisme, bruit de fond, radar et sismique de haute résolution). Les résultats encourageants fournis par la tomographie électrique ont conduit à creuser une première tranchée en novembre 2007, à proximité de l'aéroport d'Annecy, là où des fissures se sont ouvertes lors du séisme de 1996.

■ L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre fournit des informations complémentaires sur la nature et la localisation de la faille qui, lorsqu'elles sont recoupées, permettent de préciser l'aléa sismique. La sismicité apporte des informations sur les paramètres du

séisme récurrent le plus fréquent, la géodésie sur les taux et le mécanisme de déformation, la géologie et les méthodes connexes sur le comportement à long terme de la faille. Cette étude pluridisciplinaire intégrée, menée par l'IRSN, est un cas rare

en France et en Europe du Nord-Ouest, où elle représente un intérêt fort, compte tenu du contexte de faible déformation et de sismicité modérée qui caractérise la région d'Anney.



**Figure 1** Carte sismotectonique de la région (faille du Vuache en gras), miroir de faille affleurant et imagerie géophysique dans le sous-sol.

# APPLICATION DES EPS DE NIVEAU 2 ET DES TECHNIQUES DE FIABILITÉ DYNAMIQUE à la validation des guides d'intervention en accident grave

Emmanuel RAIMOND, Bruno LAURENT, Nadia RAHNI, Karine CHEVALIER-JABET, Thomas DURIN  
Bureau d'évaluation probabiliste des accidents graves

Depuis l'accident survenu le 28 mars 1979 sur le réacteur n° 2 de la centrale nucléaire américaine de Three Mile Island (TMI-2), ayant entraîné la fusion partielle du cœur du réacteur et des rejets limités de produits de fission, les organismes impliqués dans la sûreté nucléaire se sont investis dans des programmes de recherche visant à mieux comprendre ce qui pourrait survenir lors d'un accident grave, afin de prendre des dispositions permettant de prévenir un tel accident ou d'en limiter les conséquences.

Ces dispositions peuvent consister en l'installation de matériels nouveaux sur les réacteurs ou le renforcement de matériels existants, mais également en l'amélioration des guides d'intervention en cas d'accident grave.

Dans le cadre de ses missions, l'IRSN apprécie le bien-fondé et la suffisance des dispositions retenues par les exploitants et s'appuie pour cela sur les résultats des programmes de recherche sur les accidents graves, des simulations numériques et, aujourd'hui, sur des études probabilistes de sûreté de niveau 2.

Dans ce contexte, l'article qui suit présente le rôle des guides d'intervention en cas d'accident grave et l'apport des études probabilistes de sûreté dans la vérification de leur pertinence.

## Le rôle des guides d'intervention en cas d'accident grave

Un accident grave sur un réacteur à eau sous pression (REP) est un accident au cours duquel le combustible serait significativement dégradé (fusion), entraînant un risque de rejets radioactifs à l'extérieur de l'installation. Un tel accident, compte tenu de la conception des installations (*figure 1*) et de leur conduite, ne pourrait résulter que d'un enchaînement de défaillances matérielles et humaines.

Les séquences accidentelles pouvant conduire à un scénario d'accident grave sont étudiées puis hiérarchisées en fonction de leur gravité possible en termes de conséquences. À titre d'illustration,

la *figure 2* présente certains des phénomènes physiques susceptibles de survenir lors d'un accident grave. Le rapport en référence [R&D relative aux accidents graves dans les réacteurs à eau pressurisée, 2006] propose une description plus complète.

Le rôle d'un guide<sup>(1)</sup> de gestion en situation d'accident grave est de proposer aux opérateurs de conduite et aux équipes de crise des actions de conduite à entreprendre lorsque la situation évolue vers une fusion du cœur, en vue d'éviter ou de minimiser les rejets et leurs conséquences à l'extérieur de l'enceinte de confinement, et ce sans introduire de risque supplémentaire d'aggravation de la situation. La priorité est alors donnée à la sauvegarde du confinement.

(1) Ces guides doivent être élaborés par les exploitants (EDF en France).

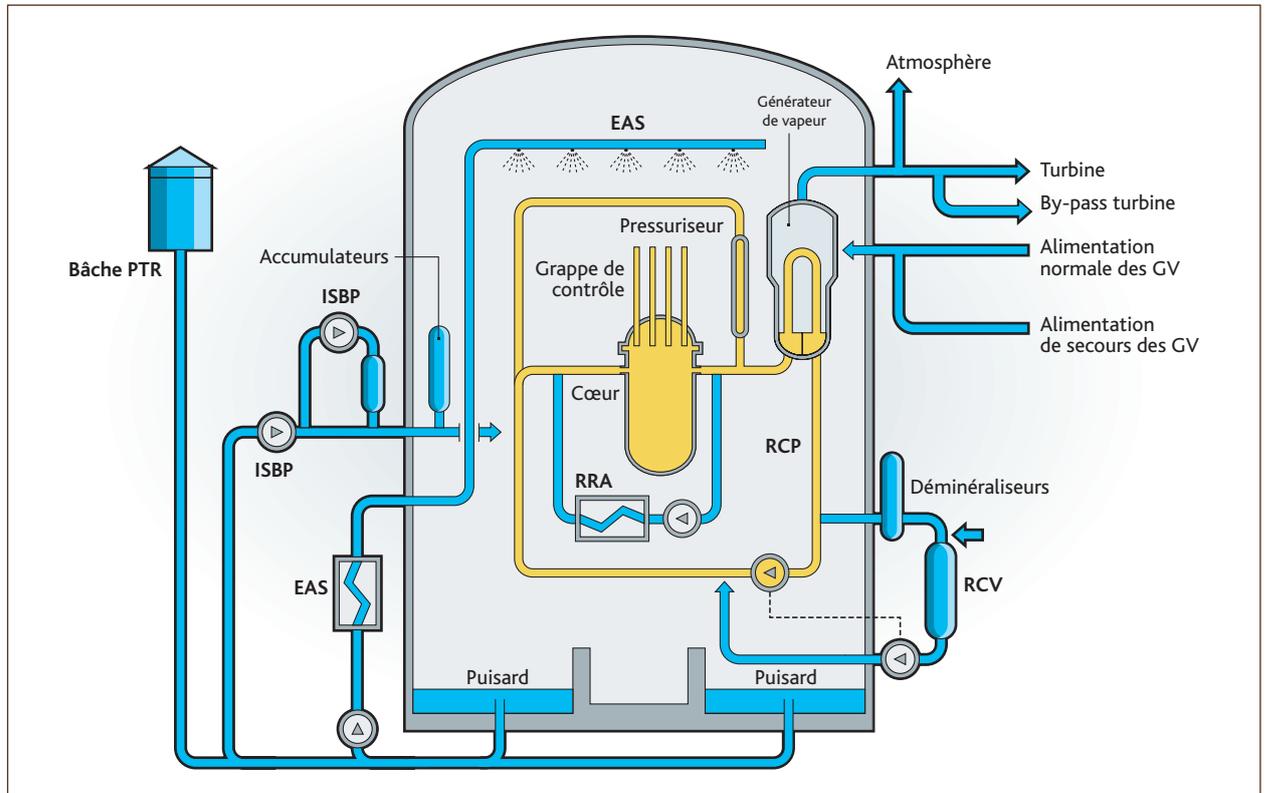


Figure 1 Système de sauvegarde d'un REP (schéma de principe).

Ainsi, dans une situation où le risque de rupture de la cuve du circuit primaire apparaîtrait élevé aux opérateurs, les actions de conduite viseront en priorité à limiter l'amplitude des phénomènes physiques pouvant porter atteinte à l'intégrité du confinement plutôt qu'à préserver à tout prix l'étanchéité de la cuve. L'exemple ci-après permet d'illustrer ce propos.

#### Faut-il stopper la fusion du combustible en cuve ?

En cas de dénoyage prolongé du cœur du réacteur, le combustible s'échauffe progressivement sous l'effet de la puissance résiduelle des produits de fission et des noyaux lourds (issus de captures de neutrons). Une réaction exothermique d'oxydation des gaines de combustible (en zircaloy) par la vapeur d'eau se développe et s'accroît avec la température, entraînant une production importante d'hydrogène et un surcroît de puissance thermique. L'atteinte de températures élevées entraîne la fusion et la relocalisation de matériaux dans le cœur. Une partie des produits de fission du combustible serait alors relâchée dans le circuit primaire, puis dans l'enceinte de confinement.

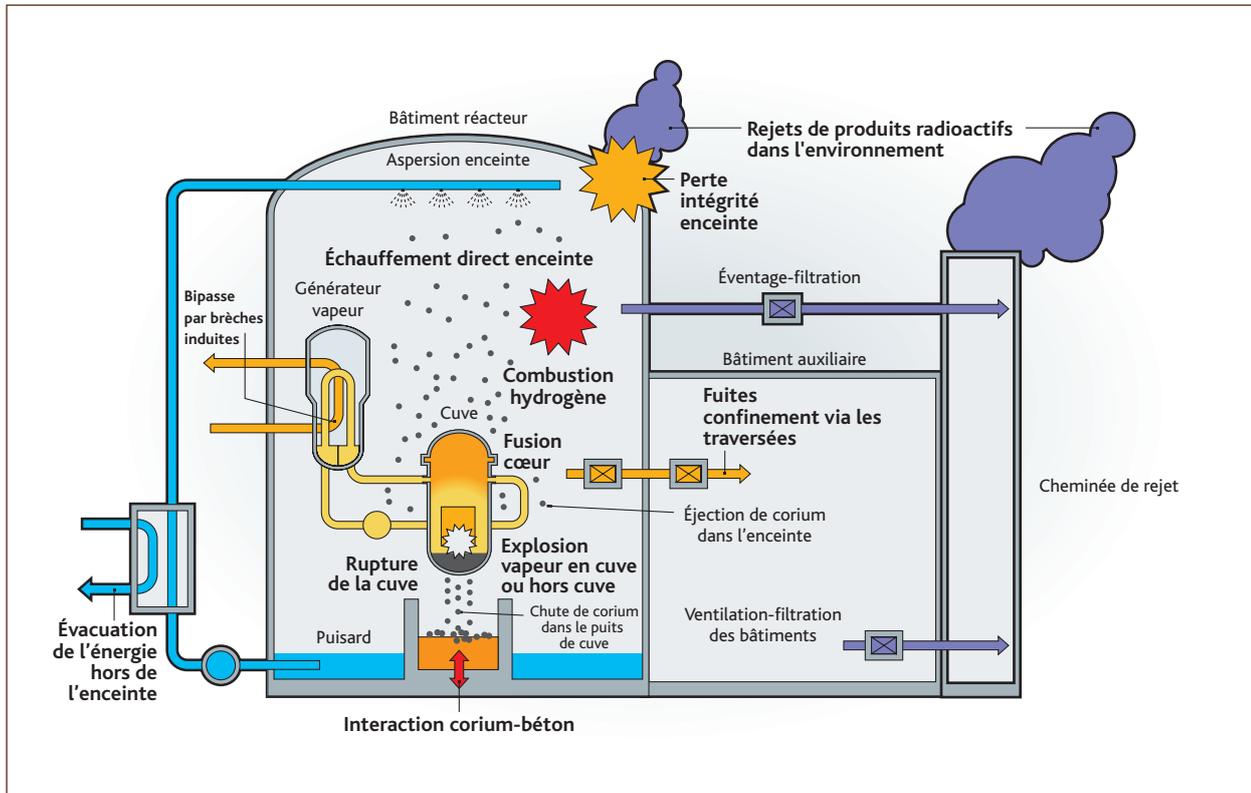
La seule manière de stopper la progression de l'accident à ce stade est d'envoyer de l'eau borée dans le circuit primaire, de manière à

refroidir à nouveau le combustible. Pourtant, cette action comporte des risques et ne peut pas être réalisée sans précaution :

- si le débit d'injection d'eau borée est relativement faible, il peut s'avérer insuffisant pour refroidir efficacement le combustible et peut au contraire entretenir la réaction d'oxydation du zircaloy, et ainsi accroître la production d'hydrogène dans le circuit primaire ; l'hydrogène ainsi produit serait relâché dans l'enceinte de confinement, entraînant un risque accru d'explosion dans l'enceinte ;
- si le débit d'injection d'eau borée est élevé, mais que l'injection s'effectue alors que la cuve était sur le point de perdre son intégrité (du fait de l'interaction avec le corium<sup>(2)</sup> qui peut s'y être déposé), l'eau injectée pourrait alors entraîner un surcroît de production de vapeur dans le circuit primaire, puis un accroissement temporaire de pression, et enfin un risque de rupture en pression de la cuve du réacteur ; cette situation est particulièrement redoutée car elle induit un risque d'éjection du corium présent dans la cuve vers l'enceinte de confinement, pouvant entraîner un pic de pression de nature à menacer son intégrité<sup>(3)</sup>.

(2) Le corium est un mélange de combustible et de métaux initialement présents dans la cuve, porté à très haute température (2 000 à 3 000 K) du fait de la puissance résiduelle des produits de fission.

(3) Phénomène dit d'« échauffement direct de l'enceinte ».



**Figure 2** Phénomènes physiques envisageables lors d'un accident grave.

Cet exemple permet d'illustrer le fait que, compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, la stratégie de conduite doit avoir été réfléchi bien en amont d'une situation réelle (même si la fusion du cœur est un événement jugé peu probable, compte tenu des dispositions de conception et de conduite des réacteurs).

### Les guides existants sur les réacteurs à eau pressurisée en France

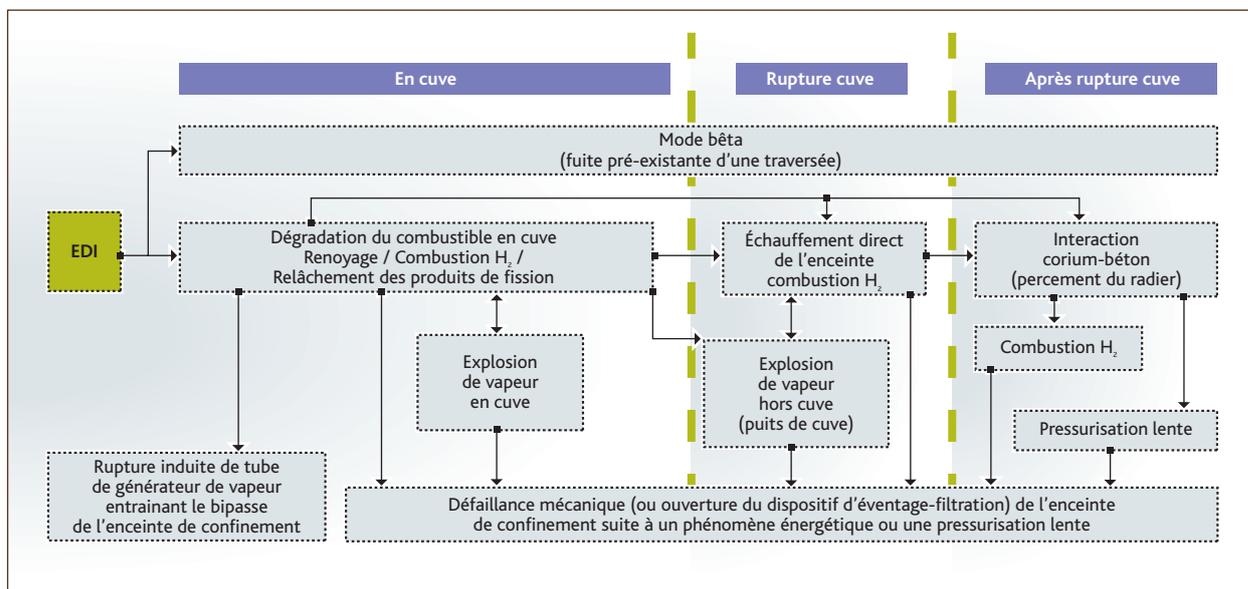
Pour définir la conduite de ses réacteurs dans une situation d'accident grave, EDF a mis en place des guides d'intervention en accident grave (GIAG), qui définissent les actions spécifiques que les opérateurs sur site devraient entreprendre dans une telle situation. Ces documents ont été élaborés par l'exploitant sur la base de l'état des connaissances sur la physique des accidents graves et ont connu plusieurs évolutions.

À la différence de la mise en œuvre des procédures du domaine incidentel ou accidentel, les opérateurs de conduite s'appuieraient alors sur les équipes nationales de crise d'EDF, avant d'engager certaines actions du GIAG pour lesquelles une réflexion sur la meilleure stratégie de conduite est nécessaire.

Ces guides étaient, à l'origine, assez simples et mettaient en avant

quelques actions essentielles telles que l'ouverture immédiate des soupapes Sebim du pressuriseur, pour éviter la rupture en pression du circuit primaire ; pour les versions les plus récentes, un effort important a été entrepris pour mieux prendre en compte la phénoménologie des accidents graves, telle qu'elle ressort des programmes expérimentaux et des simulations numériques d'accident. Les guides sont devenus plus précis en ce sens qu'ils apportent des informations quantitatives sur les phénomènes susceptibles de se produire et sont plus directifs, en proposant des actions immédiates qui doivent être réalisées au plus tôt par les opérateurs et des actions différées qui doivent être préparées avec les équipes nationales de crise.

Pour l'IRSN, les évolutions des guides de gestion des accidents graves constituent un réel progrès, car un effort est mené pour valoriser les acquis des programmes de recherche dans la définition d'actions opérationnelles. Il faut néanmoins souligner que la conduite de l'installation s'est complexifiée et suppose, dans certains cas, une compréhension très fine de la situation par les opérateurs et les équipes nationales de crise. Or, il est admis que des situations accidentelles conduisant à l'endommagement du combustible pourraient en fait résulter d'une mauvaise compréhension de la situation réelle...



**Figure 3** Quelques événements physiques de l'arbre d'événements de l'EPS2 REP 900.

Compte tenu des incertitudes importantes attachées à la phénoménologie des accidents graves, de la complexité des phénomènes physiques et de la multiplicité des scénarios accidentels que ces guides couvrent, l'identification d'améliorations probantes des guides existants est aujourd'hui plus difficile. À l'inverse, la démonstration que ces guides permettent une gestion optimale de toutes les situations ne peut pas être apportée de manière simple.

Pour l'IRSN, l'analyse des guides existants, la vérification qu'ils permettent de couvrir de manière satisfaisante les situations envisageables et que les actions proposées sont cohérentes avec l'état actuel des connaissances dans le domaine des accidents graves constituent un sujet de réflexion important.

Dans ce contexte, compte tenu des progrès effectués ces dernières années, les études probabilistes de sûreté (EPS) apportent une démarche structurée pour vérifier la robustesse de ces guides. La mise en œuvre récente de techniques dites de « fiabilité dynamique » apporte également une voie innovante pour progresser dans l'analyse de la robustesse des guides existants.

## Utilisation des EPS de niveau 2 pour la validation des guides de gestion des accidents graves

### Les trois niveaux d'EPS

Il convient tout d'abord de rappeler l'organisation des études probabilistes de sûreté en trois niveaux :

- les EPS de niveau 1 visent à identifier les séquences accidentelles

(enchaînements de défaillances matérielles et humaines) susceptibles de mener à une fusion partielle ou totale du combustible et à évaluer leur fréquence (par année et par réacteur) ;

- les EPS de niveau 2 permettent de prolonger ces séquences au-delà du début de dégradation du combustible (accident grave) et d'évaluer les risques en termes de modes de défaillance du confinement, de cinétique et d'amplitude des rejets radioactifs ; les fréquences des scénarios envisagés sont également estimées ;

- les EPS de niveau 3 permettent de quantifier les conséquences sanitaires et économiques, en fonction du site considéré.

### Les EPS de niveau 2 réalisées par l'IRSN

L'IRSN a développé des EPS de niveau 1 pour les réacteurs de 900 MWe et 1 300 MWe ainsi qu'une EPS de niveau 2 pour les réacteurs de 900 MWe. Une EPS de niveau 2 est en cours de réalisation pour les réacteurs de 1 300 MWe.

Alors que les EPS de niveau 1 ont atteint une certaine maturité en termes de méthode (la première version complète pour les initiateurs internes d'accident et les états en puissance et à l'arrêt du réacteur date de 1990), l'achèvement d'une EPS de niveau 2, prolongeant toutes les séquences de l'EPS de niveau 1 pour les réacteurs de 900 MWe (EPS2 REP 900), est très récent. La démarche retenue pour le développement des EPS de niveau 2 consiste à représenter de manière détaillée l'ensemble des éléments qui conditionnent le déroulement des accidents graves par un arbre d'événements. Il s'agit notamment de tenir compte, de la manière la plus complète possible, des défaillances de certains systèmes (et des possibilités de leur récupération), mais également des actions humaines et de

l'ensemble des phénomènes physiques (*figure 4*) susceptibles de se produire au cours de l'accident.

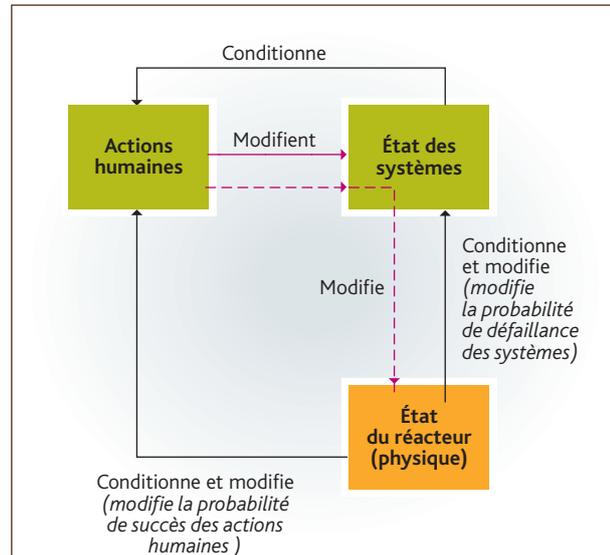
Dans l'EPS2 REP 900 réalisée par l'IRSN, une centaine d'événements relatifs aux phénomènes physiques, aux actions humaines et au comportement des systèmes peuvent se succéder, ce qui génère un très grand nombre de branches (ou de séquences accidentelles). Pour limiter cette prolifération, une fréquence dite « de coupure » est appliquée pour supprimer les séquences considérées comme de très faible probabilité.

Les interactions entre l'arbre d'événements et les modèles physiques sont effectuées de la manière suivante. Des variables dites « influentes » pour chaque phénomène physique sont définies et quantifiées par l'arbre d'événements en amont de chaque modèle. Le modèle physique permet alors de quantifier le phénomène concerné, soit par appel aux résultats d'un calcul physique jugé représentatif de la situation rencontrée, soit, lorsque c'est possible, par une fonction (surface de réponse) permettant de reproduire dans l'arbre d'événements la réponse que donnerait un code de calcul plus détaillé pour ce phénomène. Les variables « influentes » peuvent concerner aussi bien l'état des systèmes que certaines données physiques, telles que la pression dans l'enclume de confinement.

Un modèle physique de l'arbre d'événements ne génère pas de nouvelles branches. Il permet simplement d'évaluer l'état de l'installation avant et après un phénomène particulier. Cette approche, par blocs successifs dans l'arbre d'événements, nécessite notamment de définir les changements de configuration (systèmes, actions humaines) traités par l'arbre d'événements, à des instants prédéfinis. L'échange d'informations entre les paramètres physiques et les paramètres systèmes n'est réalisable qu'avant l'entrée ou après la sortie d'un modèle physique.

Compte tenu du fait qu'il existe une grande variété de situations accidentelles envisageables de par les initiateurs d'accidents retenus dans les EPS de niveau 1, mais également de par la multiplication des situations dès lors que l'on envisage le succès ou l'échec des actions des opérateurs, l'IRSN considère que les enseignements d'une EPS de niveau 2 n'ont de sens que si l'arbre d'événements s'appuie sur un nombre suffisant de simulations de scénarios accidentels. Ainsi, pour l'EPS2 REP 900, une centaine de séquences accidentelles ont été simulées avec le code ASTEC<sup>(4)</sup> pour les états en puissance du réacteur et une quarantaine pour les états à l'arrêt du réacteur, soit beaucoup plus que dans nombre d'études EPS 2 réalisées par d'autres organismes.

L'IRSN considère par ailleurs que l'introduction, dans l'arbre d'événements, de véritables modélisations des phénomènes physiques



**Figure 4** Interactions logiques et temporelles entre systèmes, actions humaines et état physique du réacteur.

présente l'avantage d'obtenir, pour chaque séquence accidentelle, une description de l'état physique de l'installation au cours de la progression de l'accident, ce qui donne également accès à une quantification des incertitudes épistémiques (c'est-à-dire liées à un manque de connaissances).

#### L'utilisation des EPS de niveau 2 pour la validation des guides d'intervention en cas d'accident grave

Pour analyser la robustesse des guides d'intervention en cas d'accident grave, les EPS de niveau 2 constituent un outil puissant permettant de repérer, parmi les très nombreux scénarios accidentels identifiés, ceux pour lesquels les guides pourraient être mis en défaut. À ce titre, elles constituent aujourd'hui un complément très utile à l'analyse déterministe.

Les résultats obtenus avec l'EPS2 REP 900 ont d'ores et déjà permis de mettre en exergue quelques pistes de réflexion qui font l'objet d'échanges techniques approfondis avec l'exploitant, dont par exemple :

- la pertinence des dispositions d'arrêt des appoints d'eau à faible débit après le début de découverture du combustible ;
- la pertinence des précautions retenues pour la remise en service tardive de l'aspersion de l'enclume, compte tenu des risques d'explosion d'hydrogène ;
- la prise en compte de la forte incertitude sur la cinétique de progression de l'accident en cuve et sur les délais disponibles avant la rupture de la cuve ;
- la maîtrise des risques d'explosion de vapeur dans le puits de cuve après la rupture de la cuve.

Bien sûr, il faut rappeler que les scénarios envisagés dans les EPS

(4) ASTEC : code de calcul des accidents graves sur les réacteurs, développé par l'IRSN (DPAM) et son homologue allemand GRS.

de niveau 2 ont des probabilités très faibles, mais l'examen de ces scénarios permet de structurer et de hiérarchiser la recherche de possibilités de renforcement des installations. Cela constitue *de facto* l'objectif premier de ces études au-delà de la quantification chiffrée.

### Les limites des EPS globales

Si les EPS de niveau 2 bénéficient des avantages de l'approche par arbre d'événements, qui permet d'assembler de manière cohérente de nombreux événements et de tenir compte des dépendances, elles comportent aussi certaines limitations, notamment pour les aspects temporels des accidents. En effet, il est impossible, dans un arbre d'événements, de prendre en compte avec précision les instants des différents événements, ce qui peut, pour certains aspects, remettre en cause la pertinence des résultats obtenus. Cette difficulté de méthode a été identifiée depuis longtemps par les spécialistes des études probabilistes de sûreté et a donné lieu à de nombreux travaux au niveau international pour la surmonter. Ce sujet fait actuellement l'objet, par exemple, d'échanges dans le cadre du réseau d'excellence européen SARNET sur les accidents graves [P.E Labeau, SARNET, conférence ERMSAR 2005; B. Chaumont, SARNET et E. Raimond *et al.*, SARNET, conférence ERMSAR 2007]. L'IRSN a par ailleurs financé une thèse sur ce sujet dans le cadre d'une action de collaboration avec l'université de Bruxelles [Thèse Agnès Peeters].

Le paragraphe ci-après vise à montrer l'intérêt des techniques de fiabilité dynamique dans ce domaine.

## Apport des techniques de fiabilité dynamique pour la validation des guides d'intervention en cas d'accident grave

### Un embryon de fiabilité dynamique dans l'EPS2 globale...

Dans l'arbre d'événements de l'EPS2 REP 900, il s'est avéré nécessaire d'utiliser les résultats des calculs physiques de chaque séquence accidentelle une première fois, pour déterminer la chronologie de la séquence en l'absence de toute action humaine. Cela permet d'évaluer les délais disponibles pour les actions des opérateurs et donc de quantifier les probabilités conditionnelles de succès ou d'échec de chaque action. Lorsque des actions humaines doivent être prises en compte, les résultats d'un autre calcul physique de la séquence accidentelle sont alors utilisés dans l'arbre d'événements.

Il s'agit là d'une première ébauche de prise en compte de la fiabilité dynamique, permettant de quantifier les risques d'erreur humaine dans l'application de la conduite préconisée en fonction

de chaque situation. Toutefois, cette approche reste très incomplète, car les instants de réalisation des actions humaines sont fixés *a priori*; ce sont ceux définis dans les simulations réalisées avec le code ASTEC en support de l'EPS2 et dont les résultats sont tabulés pour pouvoir être utilisés dans l'arbre d'événements.

### L'interdépendance entre l'état des systèmes, les actions humaines et les phénomènes physiques

La *figure 5* tente de résumer les relations qui peuvent s'établir dans la réalité entre les trois blocs de modélisation apparaissant dans l'EPS2, à savoir les événements à la fois discrets et aléatoires (relatifs au fonctionnement des systèmes, d'une part, à la gestion des décisions et actions humaines, d'autre part), et les événements continus et déterministes (phénomènes relatifs à la physique du réacteur endommagé).

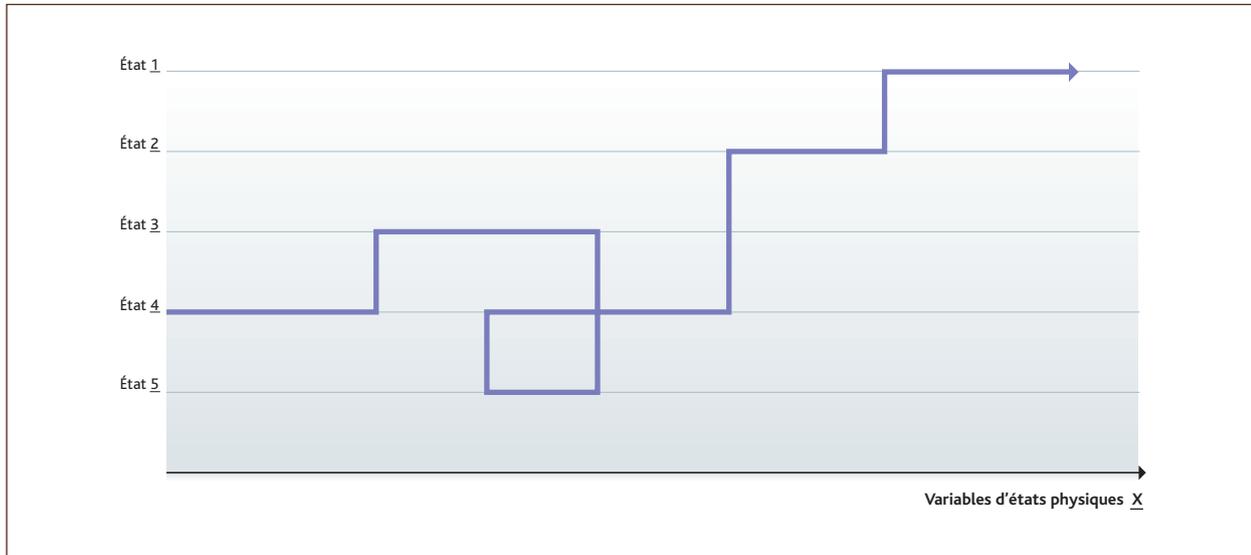
L'une des grandes difficultés des EPS en général et des approches par arbres d'événements en particulier est de prendre en compte les interactions dynamiques qui existent entre les paramètres physiques du réacteur, le comportement normal ou dégradé des systèmes en situation accidentelle, et les actions des opérateurs. De fait, l'IRSN cherche, depuis quelques années, à introduire des éléments de fiabilité dynamique dans l'EPS2, ce qui apparaît globalement délicat.

### La recherche de modélisations adaptées

Les techniques de fiabilité dynamique doivent permettre de résoudre de manière moins empirique les différents problèmes d'interaction entre les modèles physiques et un arbre d'événements (ou toute autre représentation des phénomènes stochastiques, par exemple par des réseaux de Pétri...). Plusieurs approches sont envisageables, mais aucune ne paraît idéale.

Par exemple, l'utilisation des techniques de réseaux de Pétri, couplés aux modèles physiques impliquerait l'abandon de la structure actuelle en arbres. Les calculs physiques s'enchaîneraient alors avec un réajustement des paramètres principaux à chaque interface, en fonction de l'état du réseau de Pétri. Un tirage de Monte Carlo effectué sur l'ensemble {modules physiques + réseau de Pétri} exposerait à une croissance rapide du nombre de combinaisons et à des tirages de Monte Carlo de plus en plus longs à effectuer. Surtout, une telle approche ferait perdre beaucoup de visibilité sur le scénario. Le résultat serait connu, mais le chemin pour y parvenir serait difficile à remonter. Pour tracer un scénario, il faudrait en effet stocker l'état de chaque cellule du réseau de Pétri à chaque instant.

La méthode la plus immédiate serait l'intégration des codes de calcul déterministe dans l'arbre d'événements. À chaque situation d'entrée correspondrait alors un calcul effectif global. Cette solution est pourtant inenvisageable à l'heure actuelle, les codes numériques



**Figure 5** Évolution d'un scénario (par transitions successives) sur un arbre d'événements continu.

correspondant à certains modèles étant beaucoup trop lents.

De multiples méthodes et outils de simulation ont été développés dans le monde pour approcher de meilleure manière le fonctionnement dynamique des systèmes.

Nous mentionnons ici deux grandes approches de quantification auxquelles se rattachent de près ou de loin toutes les approches possibles.

La première approche repose sur des arbres d'événements dynamiques discrets (en anglais DDET, pour *Discrete Dynamic Event Trees*). Un DDET est un arbre d'événements classique, qui contient l'ensemble des scénarios imaginés par l'utilisateur. Dans cette approche, toutes les séquences envisageables sont pré-modélisées. La transition d'un scénario (ou branche) à l'autre s'effectue en évaluant à chaque pas de temps ( $\Delta t$ ) les évolutions des différents processus (état des systèmes et facteur humain). L'exhaustivité des scénarios dépend du pas de temps retenu. Un pas de temps plus important générera moins de branches et certains scénarios seront éliminés. Un pas de temps plus petit devrait permettre d'accroître la précision du calcul, mais au prix d'une combinatoire et donc d'un nombre de séquences accidentelles à simuler très élevé. Une telle approche s'avère réhibitoire pour des systèmes complexes et n'est exploitable que pour de petits systèmes ou des sous-systèmes.

Une seconde approche consiste à ne pas modéliser *a priori* toutes les transitions possibles d'un scénario (ou branche) à un(e) autre, mais à générer aléatoirement dans le temps des transitions entre états des systèmes, par tirages de Monte Carlo (suivant des lois de probabilité de transition, dépendant elles-mêmes des grandeurs physiques et de l'état des systèmes).

On parle cette fois d'arbres d'événements continus. L'utilisateur

définit ici une limite à la quantité de branches générées (critère d'arrêt de la simulation), afin d'éviter l'explosion combinatoire de l'arbre. Dans cette approche, il peut ne pas y avoir d'exploration suffisante de tous les scénarios possibles et les événements rares peuvent être facilement omis (ou difficilement mis en évidence de façon statistique), si la simulation est trop restreinte.

Les arbres discrets et continus sont complémentaires, raison pour laquelle des techniques combinant ces deux approches sont actuellement développées par différents acteurs en Europe.

### Des applications pratiques

Alors que, dans une EPS de niveau 2 complète, il est impossible d'étudier finement l'impact de l'instant de déclenchement d'une action, il est tout à fait envisageable de le faire sur quelques scénarios d'accidents particuliers.

Dans ce contexte, l'IRSN a proposé à neuf partenaires du réseau SARNET un test de comparaison des méthodes de fiabilité dynamique appliquées à la quantification de la probabilité de défaillance du confinement par combustion d'hydrogène, en cas de renoyage tardif du combustible pour un réacteur de 900 MWe.

L'exemple proposé consiste à évaluer, pour un scénario hypothétique de rupture du circuit primaire, avec absence de démarrage des systèmes d'injection de sécurité et d'aspersion de l'enceinte, le risque de rupture du confinement, sachant que les trois événements suivants peuvent survenir pendant la dégradation du cœur en cuve<sup>(5)</sup> :

(5) Dans ce scénario hypothétique, la dégradation du cœur en cuve est supposée suffisamment lente pour considérer comme plausible la récupération d'une injection d'eau et du système d'aspersion de l'enceinte avant le percement de la cuve du réacteur.

■ le démarrage d'une injection d'eau dans le circuit primaire qui permet d'éviter la rupture de la cuve, mais conduit à une production accrue d'hydrogène dans l'enceinte de confinement ;

■ l'occurrence d'une combustion d'hydrogène totale ou partielle dès lors que l'atmosphère est inflammable ;

■ le démarrage du système d'aspersion dans l'enceinte qui permet de dépressuriser l'enceinte (par condensation de la vapeur d'eau relâchée par la brèche du circuit primaire), mais accroît en même temps l'inflammabilité des gaz présents dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement.

La tenue de l'enceinte de confinement a été modélisée par une courbe de fragilité (probabilité de perte d'étanchéité de l'enceinte de confinement en fonction du niveau de pression engendré par une combustion d'hydrogène).

L'IRSN a défini un jeu d'hypothèses sur la physique des phénomènes à partir de résultats de calculs menés avec le code ASTEC (par exemple la cinétique de chute de pression dans l'enceinte de confinement après démarrage du système d'aspersion), de jugements d'experts (par exemple, l'accroissement de la cinétique de production d'hydrogène en cas de renoyage du combustible en cours de fusion) ou de données expérimentales (comme la cinétique de recombinaison de l'hydrogène par les recombineurs passifs auto-catalytiques).

Les travaux menés dans le cadre de SARNET ont montré que ce type d'évaluation pouvait être réalisé avec diverses méthodes [SARNET, conférence ERMSAR, 2007] :

■ une simulation de Monte Carlo directe ;

■ une approche par macro-événements regroupant les événements pris en compte et dupliqués en fonction du découpage temporel que l'on souhaite retenir (méthode retenue par l'IRSN avec le logiciel KANT<sup>(6)</sup>, en raison de sa simplicité) ;

■ un couplage d'arbre d'événements avec un algorithme de Monte Carlo dédié (méthode MCDET développée par GRS<sup>(7)</sup>) ;

■ la théorie des *stimuli*, développée par l'ULB<sup>(8)</sup> et le CSN<sup>(9)</sup>, qui propose un formalisme mathématique plus générique que les arbres d'événements.

Ces travaux ont montré que des approches relativement simples permettent de modéliser les situations pour lesquelles la chronologie des événements ne peut pas être établie de manière déterministe. Ainsi, pour le scénario considéré dans le cadre de SARNET, les travaux menés montrent que le démarrage de l'aspersion dans

l'enceinte, avant celui de l'injection d'eau, permet de diminuer très fortement les risques de défaillance de l'enceinte de confinement par déflagration d'hydrogène.

Si ce résultat était confirmé pour d'autres transitoires, il pourrait conduire l'IRSN à recommander une évolution des guides d'intervention en préconisant un démarrage de l'aspersion dans l'enceinte avant toute injection d'eau tardive dans la cuve.

Pour l'IRSN, la mise en œuvre des méthodes de type fiabilité dynamique pour quelques scénarios représentatifs devrait apporter des enseignements intéressants sur certains des points les plus délicats des guides d'intervention en cas d'accident grave, notamment la gestion des moyens d'injection d'eau et du système d'aspersion dans l'enceinte, compte tenu du fait que les risques induits sont liés aux instants de réalisation des actions.

## ■ Conclusion

Les guides d'intervention en cas d'accident grave des réacteurs à eau sous pression constituent une des lignes de défense des installations pour la protection des populations.

Ces guides, rédigés par l'exploitant, ont beaucoup progressé ces dernières années et prennent aujourd'hui en compte de façon plus explicite et quantifiée les retombées des programmes expérimentaux menés dans le domaine des accidents graves.

Il faut néanmoins souligner que ces guides deviennent de plus en plus complexes et que leur application demande aux équipes de crise et de conduite d'avoir une bonne appréciation de l'état de l'installation, de manière à déclencher les actions de conduite « au bon moment ». Pour l'IRSN, il devient également plus difficile de porter un jugement sur la robustesse de ces guides, supposés couvrir de manière optimale les multiples situations susceptibles de survenir.

Les EPS de niveau 2, grâce aux nombreux scénarios d'accident étudiés et au remontage d'ensemble associant phénomènes physiques, quantification du succès des actions des opérateurs et défaillances ou restaurations des systèmes, constituent un outil utile pour apprécier le bien-fondé des dispositions actuellement retenues dans les guides.

Lorsque l'enchaînement chronologique des actions humaines sur les systèmes de l'installation a une importance sur la quantification des risques, des méthodes de type « fiabilité dynamique » constituent une voie innovante permettant de dépasser les limites des arbres d'événements globaux utilisés dans les EPS de niveau 2.

Ces méthodes, appliquées sur un nombre restreint de scénarios, devraient permettre à l'IRSN de porter un avis sur les options retenues dans les guides d'intervention en cas d'accident grave, en termes de cadencement des actions.

(6) KANT : code de développement et de quantification de l'arbre d'événements EPS2, développé par l'IRSN (DSR).

(7) GRS : *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH*.

(8) ULB : Université libre de Bruxelles.

(9) CSN : *Consejo de Seguridad Nuclear*.

**Références**

- F. Charpin, E. Raimond, B. Chaumont, Petten. *Technical basis for off-site emergency planning in France, Seminar on Emergency & Risk Zoning around Nuclear Power Plants, 2005 The Netherlands.*
- B. Chaumont. SARNET, *Conference ERMSAR 2007, FZK Karlsruhe, Overview of progress in level 2 PSA activitie.*
- Koln, E. Raimond, C. Caroli, B. Chaumont. *Status of IRSN level 2 PSA, CSNI/WG risk, workshop level 2 PSA and severe accident management, 2004.*
- Koln, E. Raimond, R. Meignen, J. Dupas, D. Plassard, B. Laurent. *Advanced modelling and response surface method for physical models of level 2 PSA event tree, CSNI/WG risk, workshop level 2 PSA and severe accident management, 2004.*
- P.E Labeau. SARNET, *Conference ERMSAR 2005, Aix-en-Provence, France, Accident simulation methods based on dynamic reliability concepts.*
- A. Peeters. *Application of the Stimulus-Driven Theory of Probabilistics to the hydrogen issues in level 2 PSA, thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles.*
- E. Raimond, N. Rahni, M. Villermain, *Method implemented by the IRSN for the evaluation of uncertainties in level 2 PSA. Some examples, Workshop on evaluation of uncertainties in relation to severe accidents and level 2 PSA, Cadarache, France, 2005.*
- E. Raimond, K. Chevalier, F. Picherea. *Link between Level 2 PSA and off-site emergency preparedness, PSAM8, New Orleans, USA, 2006.*
- E. Raimond. *Current activities on accident consequences analysis at IRSN, 2007, US-NRC, Bethesda, Regulatory Information Conference (RIC).*
- E. Raimond, T. Durin. SARNET, *Conference ERMSAR 2007, Karlsruhe, Germany, Level 2 PSA, Comparison between classical and dynamic reliability methods. Specification and results of a benchmark exercise on consequences of hydrogen combustion during in-vessel core degradation.*
- R&D relative aux accidents graves dans les réacteurs à eau pressurisée : bilan et perspectives (rapport IRSN 2006-73 rév. 1 - rapport CEA 2006/474). *Research and development with regard to severe accidents in pressurized water reactors: Summary and outlook - rapport IRSN-2007-83.*

# ÉTUDE COMPARATIVE d'une rupture de tube de GV en France et en Finlande sur le réacteur EPR

---

Sébastien ISRAEL, Alexis VERGNAULT  
Bureau d'analyses thermohydrauliques

---

*Dans le cadre de la construction de deux réacteurs de type EPR en Finlande et en France, des échanges réguliers ont lieu entre, d'une part, l'autorité de sûreté finlandaise Stuk, d'autre part, l'ASN et l'IRSN. Cet article présente une étude, réalisée par l'IRSN dans le cadre de ces échanges, portant sur la gestion des accidents de rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV). Areva NP a retenu comme exigence, pour la conception du réacteur EPR français, qu'aucun rejet radioactif à l'atmosphère sous forme liquide ne soit possible en cas d'accident de rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV).*

*La réglementation finlandaise exige pour sa part que : « la gestion de la pression en cas de fuite primaire-secondaire doit être telle qu'aucun rejet de fluide primaire n'est nécessaire », excluant ainsi tout rejet liquide ou de vapeur par le générateur de vapeur affecté par une RTGV.*

*La réglementation finlandaise a conduit le concepteur à proposer des moyens différents pour l'EPR français et l'EPR finlandais, en vue de limiter les conséquences d'une RTGV. Selon l'IRSN, ces moyens ont aussi un impact sur la quantité d'eau non borée transférée du générateur de vapeur (GV) affecté par la RTGV vers le circuit primaire, appelée aussi « rétro-vidange ».*

*Il a donc été convenu entre Stuk et l'IRSN de l'intérêt d'une comparaison plus approfondie des gestions proposées en Finlande et en France. Dans le cadre de cette comparaison, l'IRSN s'est attaché à étudier l'impact des moyens retenus pour gérer un accident de RTGV sur la quantité d'eau non borée transférée du générateur de vapeur vers le circuit primaire. En effet, cette quantité d'eau non borée pourrait, en cas de redémarrage de la pompe primaire sur la boucle affectée après un arrêt intempestif des pompes primaires, être envoyée à l'entrée du cœur et conduire, si cette quantité est trop importante, à un retour incontrôlé en criticité. Ceci aurait des conséquences sur la première barrière (gainés du combustible), sur la deuxième barrière (enveloppe du circuit primaire) et éventuellement sur la troisième barrière, à cause de l'importante énergie dégagée dans un temps très court. Pour mémoire, des études de dilution hétérogène ont montré qu'en cas de redémarrage des pompes primaires, la quantité d'eau non borée doit être limitée à trois tonnes pour éviter tout retour en criticité du cœur.*

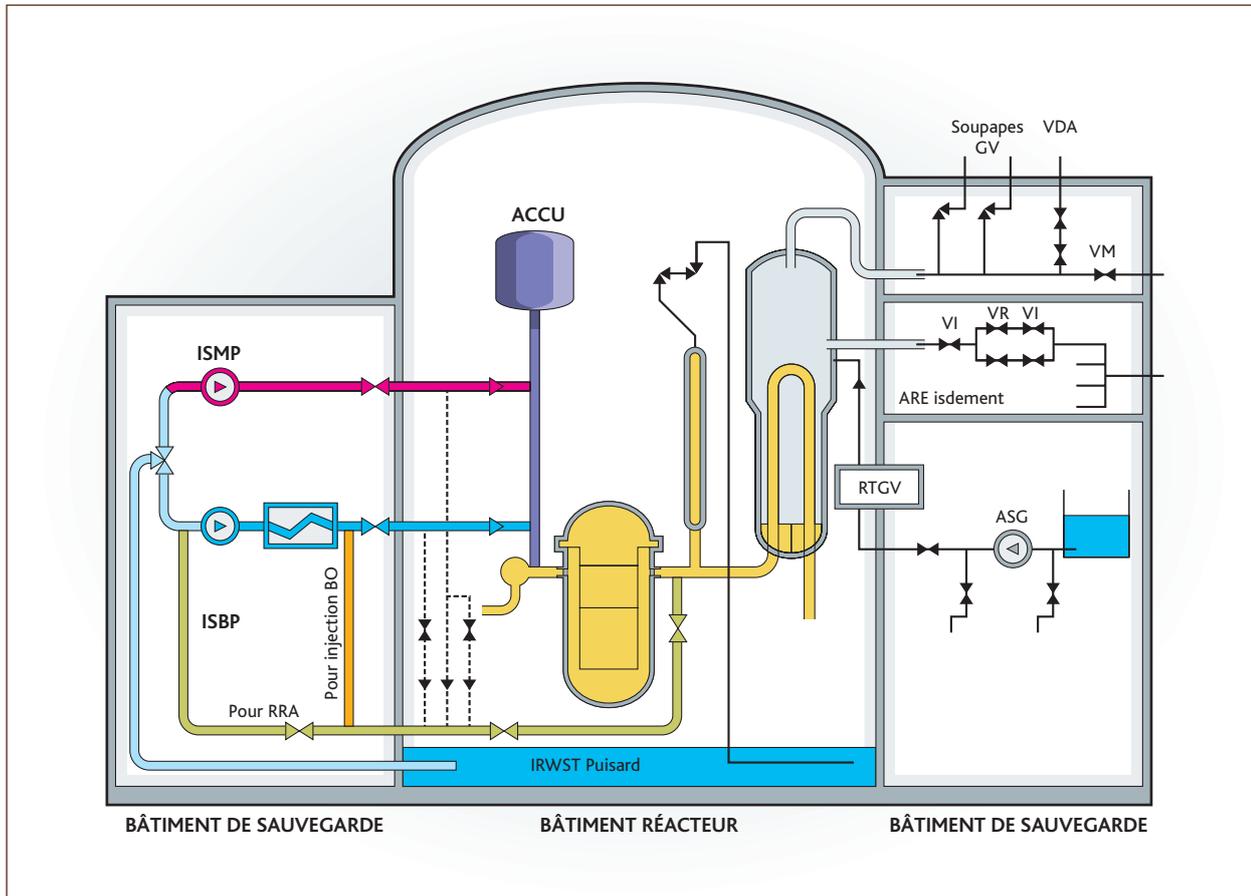


Figure 1 Conception EPR.

## Gestion de l'accident de RTGV

### Gestion de la RTGV sur l'EPR français

#### Phase à court terme

La RTGV conduit à une perte de réfrigérant primaire *via* la rupture du tube de générateur de vapeur. Ceci induit une diminution de la pression primaire et une augmentation de la masse d'eau du circuit secondaire.

Lors de cet accident, l'arrêt automatique du réacteur intervient lors de l'atteinte du seuil « basse pression pressuriseur » ou « haut niveau GV » dans le GV affecté. Le déclenchement de la turbine intervient suite à l'arrêt automatique du réacteur, conduisant ainsi à une augmentation de la pression secondaire, qui peut entraîner une décharge de vapeur dans l'atmosphère par les vannes de décharge à l'atmosphère (VDA).

Par ailleurs, la baisse de la pression primaire résultant de la RTGV déclenche, à une certaine valeur, le démarrage de l'injection de sécurité (IS). En cas d'activation du signal d'injection de sécurité

ou d'atteinte du seuil « très haut niveau GV » dans le GV affecté, un refroidissement partiel automatique est réalisé *via* les vannes de décharge des 4 GV. Ce refroidissement consiste à baisser de manière contrôlée (gradient de 100 °C/heure) la pression secondaire de la valeur de consigne initiale de ces vannes (95,5 bars) jusqu'à 60 bars.

Le refroidissement partiel automatique par les 4 GV permet de faire baisser rapidement la pression primaire jusqu'à une valeur permettant aux pompes d'injection de sécurité moyenne pression (ISMP) d'injecter dans le circuit primaire. À la fin de ce refroidissement partiel, la pression primaire s'établit à une valeur telle que l'injection de sécurité compense le débit de fuite. L'inventaire en eau du circuit primaire est ainsi stabilisé mais de l'eau contaminée entre encore dans le GV affecté.

Puis, le GV affecté est automatiquement isolé par la fermeture de la vanne d'isolement de la vapeur et l'augmentation de la consigne de sa vanne de décharge à l'atmosphère jusqu'à une valeur située

au-dessus de la pression de refoulement de l'ISMP mais en dessous de la pression de consigne des soupapes du GV. Rapidement, les pressions primaire et secondaire s'équilibrent à la pression de l'ISMP et le débit de fuite s'annule.

La phase à court terme de la gestion française de la RTGV est présentée sur la *figure 2*.

### Phase à long terme

À plus long terme, la gestion de l'accident vise à atteindre un état d'arrêt sûr. Il s'agit d'un état dans lequel le cœur est sous-critique, la puissance résiduelle du cœur est évacuée et les rejets à l'atmosphère sont annulés. Pour atteindre cet état, les opérateurs procèdent successivement au refroidissement du circuit primaire accompagné d'une injection de bore, puis à une dépressurisation du circuit primaire et du GV affecté.

#### ■ Refroidissement et injection de bore

L'injection de bore est réalisée à l'aide du circuit d'injection de bore de secours (RBS). Parallèlement, le circuit primaire est refroidi à l'aide des GV non affectés par la RTGV.

Pendant toute la phase de refroidissement, l'ISMP reste en fonctionnement pour ne pas perturber l'équilibre des pressions entre le circuit primaire et le GV affecté.

#### ■ Dépressurisation du circuit primaire et du GV affecté

Une fois le refroidissement terminé et les systèmes d'injection de bore et d'injection de sécurité arrêtés, la dépressurisation du circuit primaire et du GV affecté est réalisée :

- par le circuit primaire dans le cas où les pompes primaires sont en fonctionnement. La dépressurisation par le circuit primaire entraîne une inversion du débit RTGV qui reste acceptable, dans la mesure où les pompes primaires fonctionnent, évitant ainsi une dilution hétérogène inacceptable (bouchon d'eau non borée) ;
- par le circuit secondaire dans le cas où les pompes primaires sont arrêtées afin de minimiser le débit RTGV inverse.

### Gestion de la RTGV sur l'EPR finlandais

La stratégie d'isolement du GV affecté en Finlande diffère de celle retenue en France. Ceci résulte de la présence d'automatismes liés aux signaux d'activité secondaire qui engendrent les actions suivantes (*figure 3*) :

- la fermeture des vannes d'isolement des lignes principales de vapeur ;
- l'augmentation au-dessus de 100 bars de la pression de consigne de la vanne de décharge à l'atmosphère du GV affecté ;
- l'abaissement « brutal » à 60 bars de la pression de consigne des vannes de décharge à l'atmosphère des GV sains.

Cette stratégie de conduite menant à l'isolement rapide du GV affecté permet de réduire notablement les relâchements de vapeur

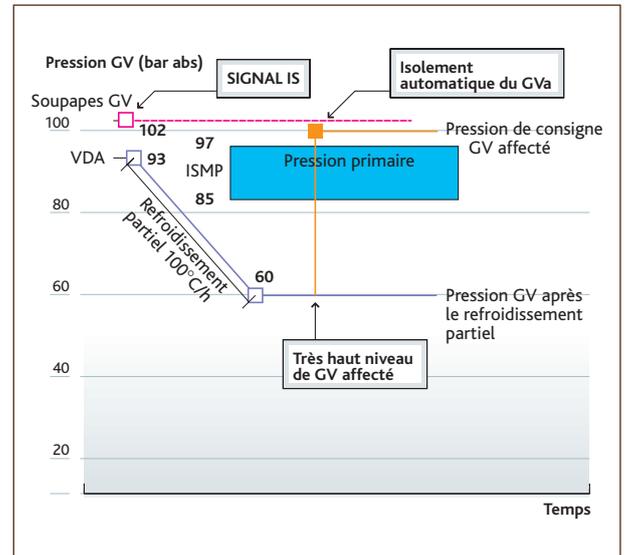


Figure 2 Stratégie française – phase à court terme.

dans l'environnement. Ceci a également pour conséquence de maintenir le générateur de vapeur affecté en pression, ce qui limite aussi la dépressurisation. La pression du circuit primaire est pilotée par la pression du GV affecté, qui se comporte comme un deuxième pressuriseur. Durant cette phase, il y a donc rétro-vidange du GV affecté dans le circuit primaire (*figure 3*).

Dans la phase à long terme, la différence notable est le possible redémarrage des pompes primaires avant le refroidissement, si elles s'étaient arrêtées du fait d'un manque de tension externe.

## Less transitoires de RTGV dans le rapport de sûreté

Les transitoires de RTGV présentés dans le rapport de sûreté permettent, d'une part, d'évaluer les conséquences radiologiques des rejets dans l'environnement, d'autre part, de vérifier qu'il n'y a pas de remplissage du GV affecté afin de garantir notamment la tenue mécanique des équipements.

À cette fin, deux études sont présentées dans les rapports de sûreté français et finlandais :

- la rupture d'un tube de GV, classée en troisième catégorie des conditions de fonctionnement de référence ;
- la rupture de deux tubes de GV, classée en quatrième catégorie des conditions de fonctionnement de référence.

Conformément aux règles d'études des conditions de fonctionnement de référence, ces deux accidents sont analysés en cumulant

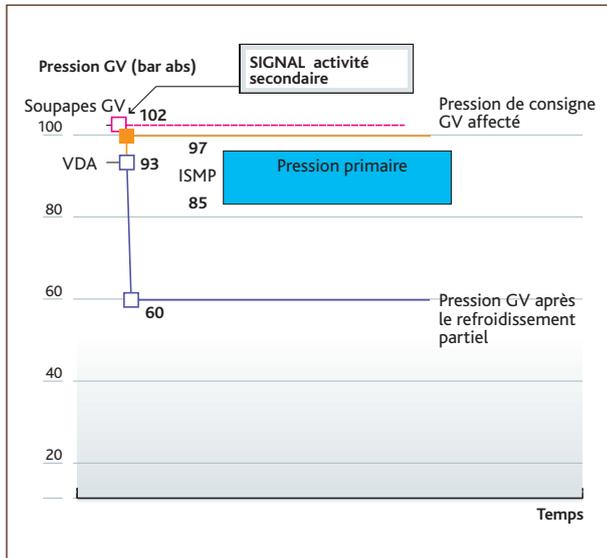


Figure 3 Stratégie finlandaise – phase à court terme.

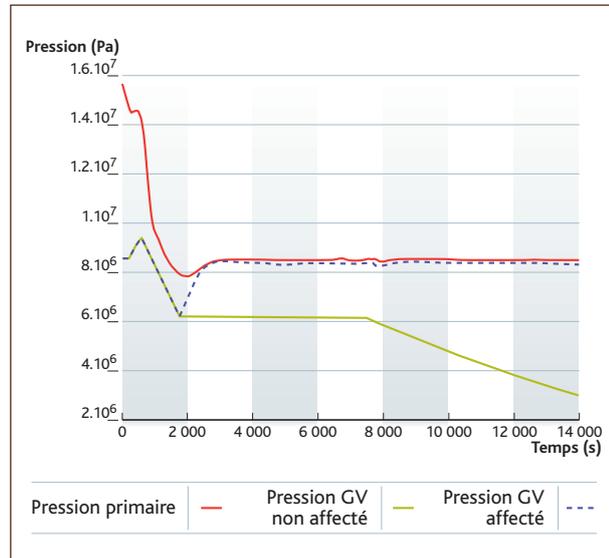


Figure 4 Stratégie française – évolution des pressions primaire et secondaire.

un manque de tension externe (se traduisant par un arrêt des pompes primaires), si cela s'avère plus défavorable.

## Étude réalisée par l'IRSN

### Objectif de l'étude

Le but de l'étude de l'IRSN est de comparer les stratégies française et finlandaise en termes d'impact sur la quantité d'eau rétro-vidangée dans le circuit primaire en provenance du GV affecté.

### Hypothèses de l'étude

Toutes les hypothèses retenues ont pour but de maximiser le débit allant du GV affecté au circuit primaire. De ce fait, les hypothèses sont différentes de celles retenues par le concepteur dans le rapport de sûreté.

Dans un premier temps, il convient de choisir le transitoire de RTGV qui maximise le débit de rétro-vidange. Le transitoire de rupture de deux tubes a été choisi car, pour une même différence de pression primaire/secondaire, le débit de rétro-vidange d'une rupture de deux tubes est supérieur à celui d'une rupture d'un seul tube de GV.

Il est postulé un manque de tension externe à l'instant initial de l'accident, car la rétro-vidange ne pose problème que lorsque les pompes primaires sont arrêtées (formation d'un bouchon d'eau non borée si les pompes primaires sont arrêtées).

L'IRSN a retenu les hypothèses suivantes, pour minimiser la pression primaire et maximiser la pression secondaire afin de majorer le débit de rétro-vidange :

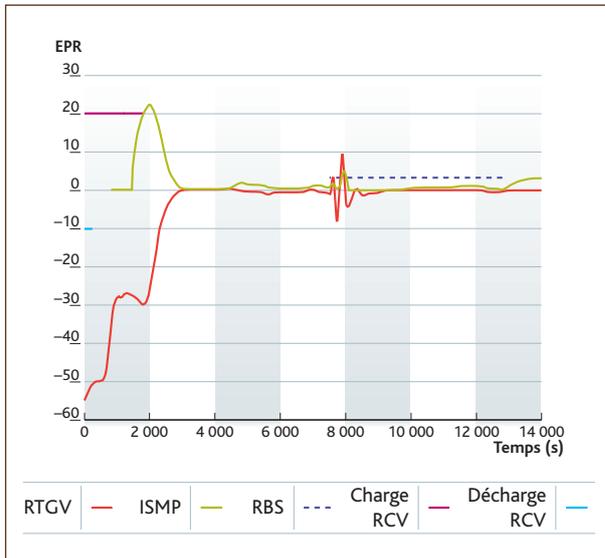
- le système de contrôle volumétrique et chimique (RCV) n'est pas pris en compte ;
- les caractéristiques de l'ISMP sont prises minimales (pression de refoulement de 85 bars) ;
- le point de consigne de la vanne de décharge à l'atmosphère du GV affecté est pris égal à sa valeur maximale (97 bars avant le refroidissement automatique, 61,5 bars à la fin du refroidissement automatique pour la stratégie française et 100 bars après le rehaussement de la pression de consigne) ;
- le point de consigne de la vanne de décharge à l'atmosphère des GV sains est pris à sa valeur maximale (97 bars avant le refroidissement automatique, 61,5 bars à la fin du refroidissement automatique).

### Résultats de l'étude

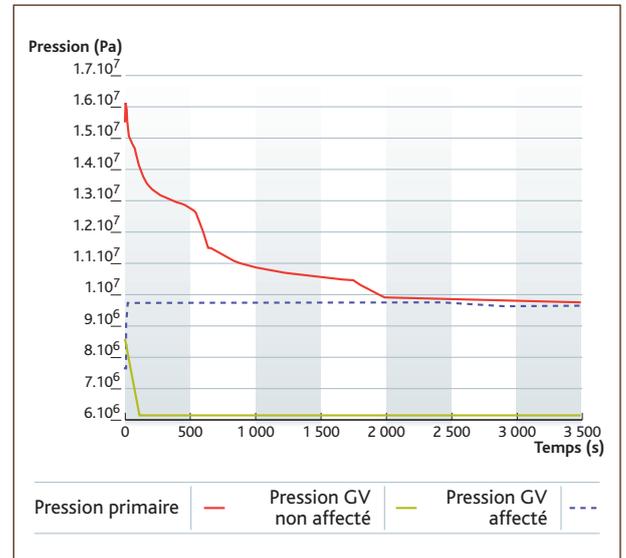
Avec les hypothèses précédentes, l'IRSN a simulé le transitoire de RTGV à l'aide du code de calcul thermohydraulique CATHARE, selon la stratégie d'isolement du GV affecté (française ou finlandaise), sans postuler un redémarrage des pompes primaires. La quantité d'eau rétro-vidangée est ainsi évaluée pour les deux stratégies.

Dans la stratégie française, le refroidissement partiel automatique est réalisé à l'aide des 4 GV. À la fin de la phase à court terme, l'équilibre des pressions entre le circuit primaire et le GV affecté est atteint. La pression primaire est imposée par la pression de refoulement de l'ISMP (figure 4).

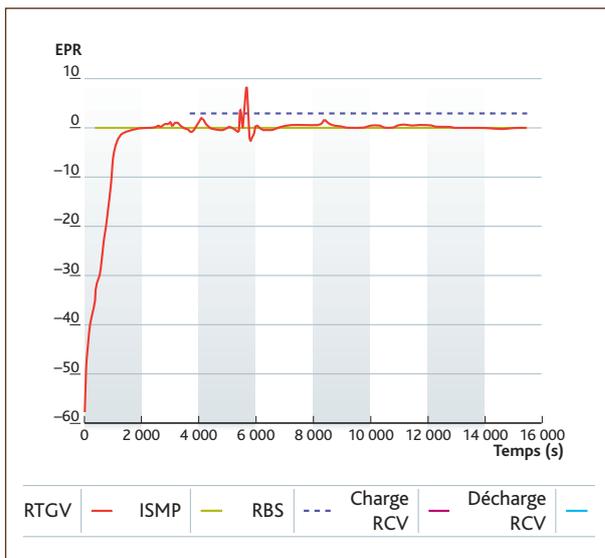
Jusqu'au refroidissement (environ 7 200 s), la pression dans le GV affecté reste inférieure à la pression du circuit primaire, compte tenu du fonctionnement de l'ISMP (figure 5). Au moment où l'opérateur entreprend le refroidissement, la pression secondaire devient légèrement supérieure à celle du primaire, conduisant à un débit de



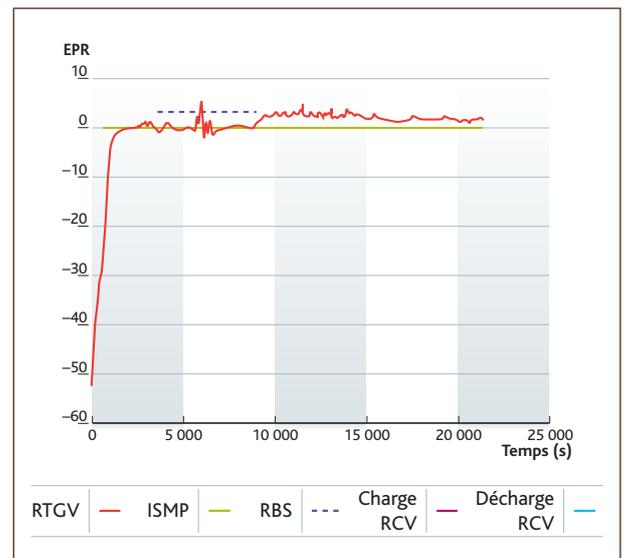
**Figure 5** Stratégie française – évolution des débits entrant et sortant du circuit primaire.



**Figure 6** Stratégie finlandaise – évolution des pressions primaire et secondaire.



**Figure 7** Stratégie finlandaise – évolution des débits entrant et sortant du circuit primaire avec arrêt du RBS à la fin de la phase de refroidissement.



**Figure 8** Stratégie finlandaise – évolution des débits entrant et sortant du circuit primaire sans arrêt du RBS à la fin de la phase de refroidissement.

rétro-vidange. À la fin de la phase de refroidissement et d'injection de bore, la quantité d'eau de rétro-vidange est de deux tonnes. Dans la stratégie finlandaise, le refroidissement partiel automatique est réalisé uniquement à l'aide des GV sains. La dépressurisation du circuit primaire est limitée par le GV affecté, dont la pression est élevée du fait du rehaussement précoce de la pression de consigne de la vanne de décharge à l'atmosphère. À la fin de la phase à court terme, l'équilibre des pressions entre le circuit primaire et le GV affecté n'est pas atteint (*figure 6*).

Cet équilibre peut être atteint après une lente dépressurisation du GV affecté pour atteindre la pression de refoulement de l'ISMP, cette dépressurisation se faisant par une rétro-vidange du GV affecté dans le circuit primaire. Durant cette dépressurisation, l'ISMP ne débite pas dans le circuit primaire car la pression primaire est trop élevée (*figure 7*). Le fonctionnement du RBS s'oppose au phénomène de rétro-vidange par effet de pression. Dans le cas où le système RBS est arrêté dès la concentration en bore requise, le débit de rétro-vidange n'est plus limité.

De ce fait, plus de 30 tonnes d'eau seraient alors transférées du GV affecté dans le circuit primaire (*figure 7*).

## ■ Conclusions

Les études de l'IRSN montrent que la quantité d'eau non borée transférée du GV affecté au circuit primaire reste limitée avec la stratégie d'isolement du GV affecté retenue pour l'EPR français. Cette quantité est inférieure à trois tonnes et garantit l'absence de retour en criticité du cœur.

En revanche, avec les mêmes hypothèses de gestion du RBS, la stratégie d'isolement du GV affecté retenue actuellement pour l'EPR finlandais conduit à une quantité d'eau non borée trans-

férée du GV affecté vers le circuit primaire très nettement supérieure à celle obtenue en suivant la stratégie retenue pour l'EPR français.

Les résultats de cette étude ont fait l'objet de discussions avec l'autorité de sûreté nucléaire finlandaise (Stuk). Sur la base de ces discussions et de ses propres études, Stuk a demandé au concepteur (Areva NP) et au futur exploitant (TVO) d'étudier le phénomène de rétro-vidange et, le cas échéant, de le prendre en compte dans la gestion de l'accident de RTGV.

En conclusion, les études de l'IRSN ont permis d'établir un dialogue approfondi et utile avec nos homologues finlandais de Stuk et devraient conduire à une meilleure convergence sur un sujet comportant des enjeux importants en termes de sûreté.

## 5.5

Claire-Marie DULUC  
et Vincent REBOUR  
Laboratoire d'étude  
hydrodynamique et géotechnique

## PROTECTION DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES contre le risque d'inondation : un important travail en cours pour l'élaboration d'un guide

■ Les crues dans la basse vallée du Rhône en 2003 et dans la Somme en 2001, plusieurs événements pluvieux intenses, en particulier dans la région cévenole, ainsi que les inondations en zone littorale consécutives aux tempêtes de 1999 sont venues souligner la vulnérabilité des activités humaines aux risques d'inondation.

La prévention du risque d'inondation d'origine externe pour les centrales nucléaires fait l'objet de la règle fondamentale de sûreté (RFS) I.2.e, établie en avril 1984. Celle-ci définit une méthode pour déterminer le niveau d'eau de référence (appelé cote majorée de sécurité). Malgré la mise en place des dispositions de protection conformes à cette règle, la centrale nucléaire du Blayais a été partiellement inondée au cours de la tempête des 26 et 27 décembre 1999. À la suite de cet incident, EDF a réexaminé les protections contre le risque d'inondation d'origine externe pour l'ensemble de ses centrales nucléaires en exploitation. Pour cela, EDF a élaboré une méthode dite Rex Blayais, qui se fonde sur la RFS I.2.e et la complète, notamment pour certains phénomènes que la règle ne prend pas en compte. Cette méthode a été évaluée par l'IRSN et a fait l'objet de réunions des groupes permanents pour les réacteurs et pour les usines en 2001 et 2007. L'incident du Blayais et les études engagées ensuite ont montré les limites de la RFS I.2.e et les groupes permanents ont estimé utile qu'elle soit révisée.

■ L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a alors souhaité que soit engagée une révision

de la RFS I.2.e avec la rédaction d'un guide, dont le domaine d'application sera élargi à l'ensemble des installations nucléaires de base. Deux sous-groupes de travail ont été constitués ; ils sont respectivement en charge de :

■ la définition des objectifs de sûreté (sous-groupe piloté par l'ASN) ;

■ l'examen des phénomènes à prendre en compte et la définition de la démarche à appliquer pour caractériser les événements rares ou extrêmes (sous-groupe piloté par l'IRSN).

■ Le sous-groupe Phénomènes, piloté par l'IRSN, est constitué principalement de spécialistes des phénomènes pouvant être à l'origine du risque d'une inondation. Ses membres appartiennent aux exploitants (Andra, Areva, CEA et EDF), à l'ASN, à l'IRSN, au Medad (Direction de la prévention des pollutions et des risques et Direction de l'eau), à la Direction régionale de l'environnement (DIREN) Centre, au Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF), à la Compagnie nationale du Rhône (CNR), au Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom), à Météo France, au Bureau d'études techniques et de contrôle des grands barrages (BETCGB). Des spécialistes du BRGM et du Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref) participent également aux travaux du sous-groupe.

En s'appuyant sur la méthode Rex Blayais et sur les compétences de ses membres, le sous-groupe a défini la liste des phénomènes à prendre en compte dans le guide.

■ Ces phénomènes sont soit spécifiques au domaine littoral, comme la marée astronomique, la surcote, le tsunami, la seiche et la houle, soit spécifiques au cours d'eau, comme la crue « naturelle » issue d'un grand bassin versant ou d'un petit bassin versant, la crue résultant de la rupture d'un barrage et le clapot, soit peuvent concerner tous les types d'environnement, comme la pluie, les remontées de la nappe phréatique, les dégradations d'ouvrages (digues de canaux et de réservoirs), les ruptures de circuits ou d'équipements et l'intumescence résultant d'un dysfonctionnement d'ouvrage hydraulique (station de pompage, usine hydroélectrique...).

■ Des présentations techniques préparées par les spécialistes de ces sujets ont servi de support à une dizaine de réunions techniques. Ces réunions ont permis de définir les points pertinents et les lacunes de la RFS, et de préciser les méthodes de caractérisation des événements qui sont envisageables, en examinant leurs avantages et leurs inconvénients. La phase suivante consiste à établir un rapport de synthèse présentant l'état de l'art sur les méthodes de caractérisation des événements extrêmes qui peuvent résulter des phénomènes retenus, ainsi que les liens de dépendance entre phénomènes qui doivent être pris en compte dans le dimensionnement des protections contre le risque d'inondation.

# LES FAITS MARQUANTS

## en quelques dates

### SOUTENANCES D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

#### 12 mars 2007

■ **Luis Fabian BONILLA** a soutenu son habilitation à diriger des recherches (HDR) sur le thème « Analyse des effets de site, estimation des mouvements forts et calcul probabiliste de l'aléa sismique », à l'université Joseph Fourier-Grenoble I.

#### 14 mai 2007

■ **Catherine BERGE-THIERRY** a soutenu son habilitation à diriger des recherches (HDR) sur le thème « Modélisation de la rupture sismique, prédiction du mouvement fort et évaluation de l'aléa sismique : approches fondamentale et appliquée », à l'université Nice-Sophia Antipolis.

### SOUTENANCES DE THÈSES

#### 2 mai 2007

■ **Antonio RUIZ PAREDES** a soutenu une thèse intitulée : « Génération d'accélérogrammes synthétiques large bande par modélisation cinématique de la rupture sismique : application à la ville de Santiago du Chili », à l'université de Paris VII Denis Diderot.

#### 18 octobre 2007

■ **Marjorie JACQUELIN** a soutenu sa thèse sur l'« Étude de la mise en suspension de particules par chute de poudre », à l'université Paris XII (Créteil, France).

#### 14 décembre 2007

■ **Charles MOTZKUS** a soutenu sa thèse sur l'« Étude de la mise en suspension de particules lors de l'impact de gouttes », à l'UFR de

Sciences et technologies de l'université Paris XII (Créteil). Il a reçu le 16 janvier 2008 le prix Jean Bricard, décerné par l'Association française d'études et de recherches sur les aérosols (Asfera) pour son travail de thèse.

### AUTRES FAITS MARQUANTS

■ Participation à la publication d'un livre sur les risques liés aux nanoparticules, intitulé « *Les Nanoparticules, un enjeu majeur pour la santé au travail ?* » (EDP Science, 701 p.), réalisé sous la coordination de B. Hervé-Bazin (INRS). Les chercheurs de l'IRSN sont auteurs des chapitres traitant des particules ultrafines dans l'atmosphère, du comportement physique des nanoparticules sous forme d'aérosols et de la caractérisation des nanoparticules sous forme d'aérosols.

■ Signature d'un contrat de collaboration avec le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), pour étudier l'influence du vent sur les transferts de contamination dans les installations et les rejets à l'environnement.

■ Coordination d'une intercomparaison de calculs sur les effets de l'aspersion dans l'enceinte d'un réacteur en situation accidentelle, réalisée dans le cadre du SARNET (réseau d'excellence européen sur les accidents graves de réacteurs nucléaires).

■ R&D olfactométrie. Lancement de deux programmes ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) :  
■ validation métrologique des nez électroniques (sites d'équarrissage) ;  
■ validation d'un modèle de dispersion atmosphérique (sites de compostage).

#### Janvier 2007

■ L'IRSN a participé à la réunion de lancement du projet THERESA, qui s'est tenue à Stockholm. Consacré à la modélisation des effets THMC (thermo-hydro-mécanique et chimique) à l'interface entre les ouvrages de stockage et la roche hôte, ce projet s'inscrit dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD (Programme communautaire de recherche et développement).

#### Juillet 2007

■ La station expérimentale de Tournemire intègre le réseau des centres d'excellence de l'AIEA, relatif aux « *training and demonstration of waste disposal technologies in underground research facilities* ».

#### Novembre 2007

■ Le creusement d'une nouvelle galerie a débuté sur la station expérimentale de Tournemire. Il constitue la première étape d'un programme de recherche sur la sûreté des ouvrages de scellement d'un stockage géologique.