



HAL
open science

Un nouveau guide sur la protection des installations nucleaires contre l'inondation d'origine externe

Claire-Marie Duluc, Lise Bardet, Laurent Guimier, Vincent Rebour

► To cite this version:

Claire-Marie Duluc, Lise Bardet, Laurent Guimier, Vincent Rebour. Un nouveau guide sur la protection des installations nucleaires contre l'inondation d'origine externe. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2014, 5, pp.47-53. 10.1051/lhb/2014049 . hal-02641709

HAL Id: hal-02641709

<https://hal.science/hal-02641709>

Submitted on 11 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UN NOUVEAU GUIDE SUR LA PROTECTION DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES CONTRE L'INONDATION D'ORIGINE EXTERNE

New French guide for the protection of nuclear facilities against external flooding

Claire-Marie DULUC¹, Lise BARDET¹, Laurent GUIMIER¹ et Vincent REBOUR¹

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire – BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex – claire-marie.duluc@irsn.fr

Bien avant le tsunami du 11 mars 2011 et ses conséquences dramatiques pour la centrale de Fukushima-Daiichi, la tempête Martin fin 1999 et l'inondation de la centrale du Blayais (Gironde) qui en a résulté avaient souligné l'importance des dispositions de protection des installations nucléaires contre les inondations. Cet événement avait conduit les exploitants nucléaires et en particulier EDF, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) à réexaminer les méthodes de protection des installations nucléaires contre l'inondation et à engager l'élaboration d'un guide applicable à l'ensemble des installations nucléaires de base (INB). Après un long processus d'élaboration, de consultation publique et d'instruction, ce guide a été publié par l'ASN en avril 2013.

La démonstration de sûreté d'une installation nucléaire doit intégrer les agressions d'origine externes (séisme, inondation, industries...). Parmi celles-ci, le risque d'inondation externe se différencie par la diversité des phénomènes à prendre en compte. Le guide définit un ensemble de 11 situations de référence pour l'étude du risque d'inondation (SRI). Les SRI ont été retenues suivant une approche déterministe, à partir d'un événement ou d'une conjonction d'événements dont les caractéristiques sont éventuellement majorées. Pour guider cette approche, les SRI ont été définies en visant une probabilité de dépassement de chaque SRI de 10^{-4} /an et en tenant compte des incertitudes inhérentes à sa détermination.

Cet article présente le processus d'élaboration du guide, la démarche de définition des situations de référence à prendre en compte pour l'étude du risque d'inondation (SRI) et le traitement des incertitudes associées. Il présente enfin la SRI relative aux pluies locales qui a fait l'objet d'une démarche originale pour tenir compte de l'objectif de sûreté.

Mots-clefs : guide inondation, sûreté nucléaire, situation de référence pour l'étude du risque inondation (SRI)

On 27 December 1999, more than ten years before the tsunami of 11 March 2011, a severe storm occurred in the vicinity of the "Le Blayais" Nuclear Power Plant (NPP) located in the Gironde estuary. This partial flooding called into question the design bases defined in the French Basic Safety Rule (BSR) I.2.e for the protection of French NPPs against external flooding. Following an initial improvement of protections of nuclear installations against external flooding, the French Nuclear Safety Authority (ASN) and the Institute for Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN) initiated the elaboration a new safety rule for the protection of nuclear facilities against external flooding.

In order to prepare the technical basis of the new safety rule, IRSN conducted a hydrologic working group. This technical group gathered experts from universities or research organisms, government departments or agencies and operators. After a long process, the guide for protection of basic nuclear installations against external flooding was published by the French Nuclear Safety Authority in April, 2013.

The purpose of this guide is to i) define the situations to consider when evaluating the flood hazard for a given site ii) propose an acceptable method of quantifying them, iii) list recommendations for defining means of protection adapted to the specificities of the hazard of flooding. A specificity of external flooding is that many different sources have to be considered. Consequently, a list of 11 "Reference Flood Situation" (RFS) is defined. Each of them is based on a single event or on a conjunction of events whose characteristics may be increased if necessary. The RFS are defined with a probability target of 10^{-4} per year, taking into account uncertainties.

This article presents the guide process of development, the method applied to define the reference flood situations (RFS) and the treatment of uncertainties. The last part of the article presents the RFS defined for local rainfall which needed an original approach to take into account the probability target of 10^{-4} per year.

Key-words : guide for the protection against external flooding, nuclear safety, Reference Flood Situation (RFS)

I CONTEXTE

La RFS I.2.e, établie en avril 1984, traitait du risque d'inondation d'origine externe pour les installations nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression. Elle définissait une méthode « acceptable » pour déterminer la « Cote majorée de sécurité (CMS) », ainsi que les principes de conception de l'installation visant à garantir la sûreté des réacteurs en cas d'inondation d'origine externe. L'inondation d'origine externe correspond à une inondation ayant une origine extérieure aux ouvrages à protéger. Les critères et les hypothèses à retenir dans le calcul de la CMS dépendaient de la situation du site considéré : en bord de fleuve, en bord de mer ou en estuaire.

Malgré la définition de dispositions de protection conformes à la RFS I.2.e, la centrale nucléaire du Blayais a été partiellement inondée au cours de la tempête des 26 et 27 décembre 1999, ce qui a provoqué la défaillance de systèmes importants pour la sûreté. L'inondation a principalement résulté de l'insuffisance des protections du site face aux vagues générées dans l'estuaire par la tempête, non prises en compte dans la RFS I.2.e. A la suite de cet incident, EDF a développé une démarche dite « REX-Blayais » qui se fonde en partie sur la RFS I.2.e et la complète sur de nombreux aspects.

En 2005, l'ASN a souhaité qu'une révision de la RFS I.2.e soit engagée sur la base de la démarche « REX-Blayais ». Compte tenu notamment du retour d'expérience de la crue du Rhône des 2 et 3 décembre 2003, l'ASN a souhaité que le futur guide s'applique à l'ensemble des installations nucléaires de base (INB). Préparé par l'IRSN en collaboration avec l'ASN, les principaux exploitants nucléaires et des organismes de recherche et d'expertise, le guide de protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes a été publié par l'ASN en avril 2013¹ après un long processus d'élaboration, de consultation publique et d'instruction.

La suite de cet article présente le processus d'élaboration du guide, la démarche de définition des situations de référence à prendre en compte pour l'étude du risque d'inondation (SRI) et le traitement des incertitudes associées. Il présente enfin la SRI relative aux pluies locales.

II PROCESSUS D'ÉLABORATION DU GUIDE

Compte tenu de la diversité des phénomènes pouvant conduire à un risque d'inondation, un groupe de travail a été constitué. Il impliquait des représentants de l'ASN, de l'IRSN, des exploitants ainsi que d'autres experts appartenant notamment 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 Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) et du Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF²), ont également participé aux travaux du sous-groupe, ainsi que des universitaires (M. Desbordes de l'Université de Montpellier et J-P. Laborde de Polytech'Nice).

Dans un premier temps, le groupe de travail a recensé tous les phénomènes pouvant provoquer ou contribuer à une inondation. Une liste des phénomènes pertinents pour les sites d'installations nucléaires en France a ensuite été sélectionnée (cf. figure 1).

Dans un deuxième temps, le groupe de travail a établi un état de l'art sur les méthodes de caractérisation des événements extrêmes résultant des phénomènes retenus. Dans le guide inondation, un « événement » particulier est caractérisé par une grandeur physique définissant son intensité (volume, hauteur, débit, etc.) et le cas échéant, une probabilité ou fréquence de dépassement de cette intensité et une durée. Par exemple, la crue de débit centennal (appelée plus simplement « crue centennale ») est un événement de probabilité de dépassement égale à 10^{-2} /an permettant de qualifier une crue fluviale. L'état de l'art réalisé, qui devrait faire l'objet d'une publication à venir, a avant tout été guidé par l'objectif d'identifier des méthodes éprouvées, reconnues par la communauté scientifique et utilisables par les bureaux d'études. Une attention particulière a été portée à l'influence des évolutions climatiques et à la dépendance entre les différents phénomènes.

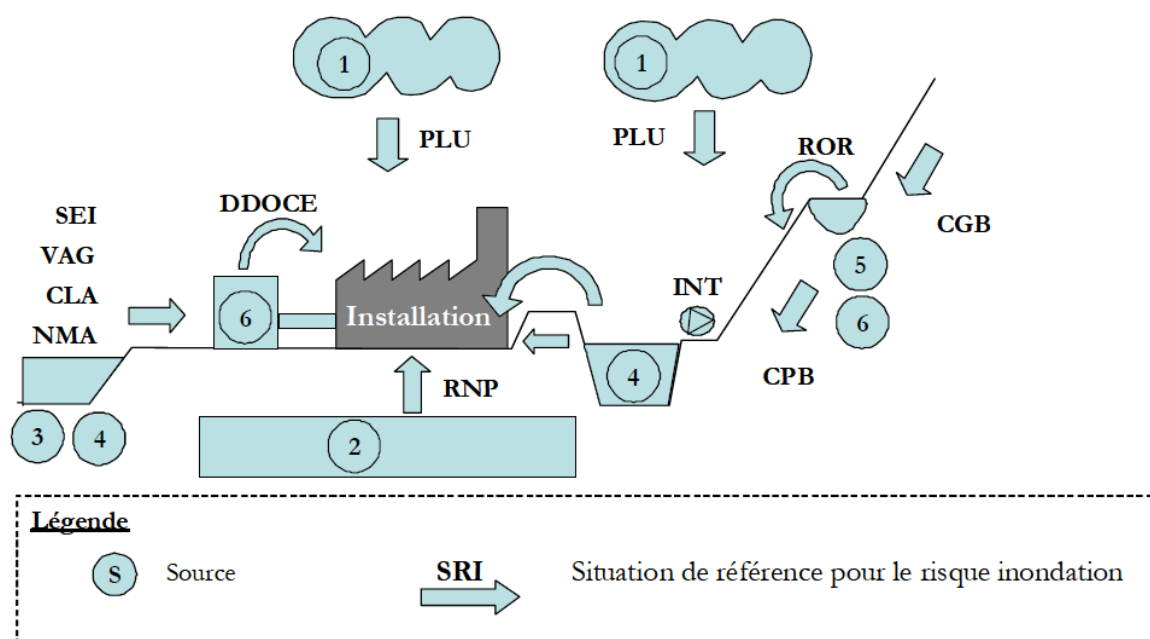
A l'issue de cet état de l'art, des préconisations ont été formulées par le groupe de travail sur la base de propositions de l'IRSN. Ces préconisations, dont la plupart faisaient l'objet d'un consensus au sein du

¹ Guide disponible sous www.asn.fr/index.php/S-informer/Publications/Guides-pour-les-professionnels/Surete-nucleaire/Guide-de-l-ASN-n-13-relatif-a-la-protection-des-installations-nucleaires-de-base-contre-les-inondations-externes

² Depuis 2012, le CEMAGREF s'appelle IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

groupe de travail, ont servi de matière première à la rédaction du projet de guide. Elles portaient notamment sur la définition des situations d'inondation, la prise en compte des incertitudes et les méthodes de caractérisation des situations d'inondation. Les méthodes existantes retenues dans la RFS I.2.e ont été reconduites lorsque le retour d'expérience issu de leur application semblait satisfaisant et qu'elles restaient cohérentes avec l'état de l'art réalisé par le sous-groupe. Les principes retenus pour la protection des installations ont également été revus afin de couvrir une plus large variété d'effets induits par une inondation, incluant l'isolement du site, l'indisponibilité de fonctions supports (alimentations électriques externes, moyens de secours externes, etc.) ou l'agression simultanée de plusieurs installations.

Lorsque l'état des connaissances n'apportait pas de réponse satisfaisante à une problématique relative à la détermination des événements extrêmes, des travaux de recherche ont été menés en parallèle de l'élaboration du guide, notamment sur la prise en compte des horsains dans les chroniques de surcotes marines ([Bardet et al, 2011], [Bernardara et al., 2011], [Bardet et al., 2012]), ou la faisabilité de modélisation de ruissellement de surface à échelle très fine ([Abily et al, 2012], [Abily et al., 2013]).



PLU Pluies locales

CPB Crue sur un petit bassin versant

CGB Crue sur un grand bassin versant

DDOCE Dégradations ou dysfonctionnements d'ouvrages, de circuits ou d'équipements

INT Intumescence – Dysfonctionnement d'ouvrages hydrauliques

RNP Remontée de la nappe phréatique

ROR Rupture d'un ouvrage de retenue

CLA Clapot

NMA Niveau marin

VAG Vagues

SEI Seiche

Figure 1 : Schéma des phénomènes associés aux situations de références (SRI) sur un site type

III DÉFINITION DES SRI

III.1 Démarche générale

Le risque d'inondation externe se différencie des autres agressions externes par la diversité des phénomènes à prendre en compte. Du fait de cette diversité, la capacité à déterminer des événements extrêmes à l'origine du risque inondation est variable. L'IRSN et l'ASN, dans le prolongement des positions exprimées depuis 2001, ont orienté le groupe de travail vers la définition de SRI dont la probabilité de dépassement est de 10^{-4} /an, en ordre de grandeur, et qui couvrent, pour ce niveau, les incertitudes. Les niveaux visés peuvent donc correspondre, en approche « best-estimate », à des probabilités de dépassement bien plus faibles que 10^{-4} /an : par exemple, la SRI cumulant un clapot issu d'un vent centennal, propagé sur une crue fluviale millennale, a été choisie pour couvrir en pratique l'ensemble des situations de cumuls possibles de probabilité $\geq 10^{-4}$ /an faisant intervenir un clapot concomitant avec une crue fluviale.

La déclinaison de cette approche a donc conduit le groupe de travail, dans un premier temps, à identifier les limites de capacité à définir les différents événements extrêmes à considérer et, dans un second temps, à définir au cas par cas les majorations éventuelles à apporter pour définir les SRI.

Les méthodes de caractérisation des situations d'inondation retenues reposent soit sur des extrapolations statistiques soit sur des scénarios déterministes (par exemple, la rupture postulée d'un ouvrage). Il n'a pas été identifié d'application en France des méthodes probabilistes dans le domaine de l'hydrologie, telles que celles mises en œuvre parfois pour l'aléa sismique. Le groupe de travail a également envisagé les méthodes « maximalistes » du type CMP (crue maximum probable) qui sont largement utilisées notamment dans les référentiels de l'USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission). Ces méthodes ont été écartées principalement parce qu'elles nécessitent une grande expérience dans leur mise en œuvre, qui seule permet d'orienter les choix d'experts qu'elle requiert, alors que cette expérience est faible en France. De plus, les méthodes statistiques largement utilisées par les hydrologues français semblent, par rapport aux méthodes « maximalistes », plus pragmatiques dans la mesure où elles s'appuient plus directement sur l'observation.

Les majorations utilisées sont dans quelques cas des coefficients multiplicateurs appliqués à un paramètre déterminant (par exemple : le débit de la crue). Des conjonctions « pénalisantes » ont été retenues par exemple entre le niveau d'un plan d'eau et des vagues. Le caractère pénalisant des conjonctions a été apprécié en regard du degré de dépendance entre les différents événements. Ainsi, comme dans la méthode REX-Blayais, la dépendance forte entre un niveau marin élevé et la houle, du fait d'une tempête, a conduit à retenir la propagation de la houle sur le niveau de la SRI « niveau marin », alors que pour les vagues générées sur un cours d'eau en crue, le niveau du plan d'eau retenu correspond à la crue millénaire (sans la majoration appliquée dans la SRI « crue sur un grand bassin versant »).

Dans deux cas, les approches de majoration se sont révélées inadaptées. Dans le cas de la SRI « pluies locales », il a été retenu la prise en compte de deux scénarios distincts (cf. partie IV). Enfin, pour la SRI « remontée de la nappe phréatique », les spécificités de certains sites ont conduit à recommander une méthode dans laquelle la limite de capacité d'extrapolation doit être compensée par la prise en compte d'hypothèses particulièrement pénalisantes.

Le tableau 1 présenté au paragraphe III.3 présente une synthèse des situations de référence (SRI) définies par le guide inondation.

III.2 Prise en compte des incertitudes

La RFS I.2.e proposait une classification des sources d'incertitudes liées à l'évaluation de la CMS et présentait des moyens pour les prendre en compte. Le guide inondation reprend et généralise ces éléments à l'ensemble des SRI. En particulier, les incertitudes liées à l'évaluation « des probabilités de dépassement associées aux événements rares » ont été distinguées des incertitudes associées à l'évaluation « des grandeurs hydrauliques relatives aux événements rares et utilisées pour le dimensionnement des installations ».

De plus, des éléments explicatifs ont été ajoutés par rapport à la RFS pour relier les principes retenus pour la définition des SRI avec ceux retenus pour la prise en compte des incertitudes. En particulier, le guide rappelle que « *la détermination des SRI résulte en premier lieu d'une démarche d'expertise. Elle tient compte des incertitudes identifiées en l'état actuel des connaissances. Les préconisations qui concernent la prise en compte de conjonctions, des états initiaux ou plus largement, de l'ensemble des incertitudes, visent à apporter des conservatismes.* »

Enfin, deux sujets ont été détaillés dans le guide : d'une part le choix des intervalles de confiance retenus pour l'estimation des valeurs extrapolées dans les SRI et d'autre part les études de sensibilité et la pénalisation des paramètres influents.

III.2.1 Choix du niveau des intervalles de confiance

Différents types d'incertitudes affectent les calculs statistiques³. L'intervalle de confiance cité dans le guide concerne uniquement l'incertitude liée à la taille de l'échantillon statistique disponible. Cette incertitude est quantifiable.

La RFS I.2.e préconisait de retenir la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % des grandeurs issues d'une extrapolation des courbes de probabilité de dépassement des événements rares. Cette préconisation s'applique en pratique aux débits de crue fluviale et aux surcotes marines, compte tenu des

³ Selon le guide inondation : « a) les incertitudes sur les données d'entrée de l'étude statistique ; b) les incertitudes liées au choix du modèle statistique ; c) les incertitudes liées à la taille de l'échantillon statistique disponible ; d) les incertitudes liées à la représentativité de cet échantillon ; »

phénomènes considérés dans la RFS. Dans la méthode REX-Blayais, un intervalle de confiance à 70 % est également retenu pour les nouveaux phénomènes pris en compte (houle, vent à l'origine du clapot) à l'exception des pluies pour lesquels EDF a retenu la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %.

Ainsi, pour ce qui concerne les niveaux d'intervalles de confiance préconisés pour chaque SRI, le guide inondation reconduit les choix retenus dans la méthode REX-Blayais en étendant l'utilisation de l'intervalle de confiance à 95 % à la SRI « remontée de la nappe phréatique ». Ces choix ont fait l'objet de remarques lors de la phase de consultation publique, qui interrogeaient sur la pertinence de recourir à des intervalles de confiance par rapport à une démarche alternative qui consisterait à prolonger l'extrapolation.

Outre la continuité de démarche avec la RFS I.2.e et la méthode REX Blayais, les raisons qui expliquent les choix du groupe de travail sont directement liées au contexte d'application aux installations nucléaires et peuvent être résumées de la façon suivante :

- L'intervalle de confiance à 70 % permet de répondre de façon raisonnable à l'objectif de définition des SRI « incertitudes comprises ».

Le groupe de travail a considéré que l'intervalle de confiance à 70% présentait une amplitude « raisonnable » pour la plupart des SRI compte tenu de la taille des intervalles de confiance. En effet, la prise en compte d'un intervalle de confiance supérieur à 70 % peut conduire à majorer grandement la valeur retenue par rapport à la valeur nominale estimée. La position du groupe de travail apparaît donc issue d'un compromis « pragmatique » tenant compte de l'objectif de définition des SRI « incertitudes comprises ».

- L'intervalle de confiance à 95% permet de pénaliser plus fortement les SRI « pluies locales » et « remontée de la nappe phréatique » pour lesquelles une incertitude forte a été identifiée dès le niveau d'extrapolation centennal.

Le groupe de travail a considéré qu'il y avait pour l'évaluation de pluies extrêmes, une incertitude supérieure à celle d'autres aléas faisant l'objet d'extrapolations statistiques du fait d'une part, de la faible durée des observations disponibles sur les pluies de courtes durée et d'autre part, de la variabilité des comportements asymptotiques des extrapolations statistiques selon les stations considérés. Le fait de retenir un intervalle de confiance à 95 % peut être interprété comme un moyen de couvrir cette incertitude « supplémentaire ». Il est à noter qu'une solution alternative consistant à prendre une période de retour plus élevée pour couvrir les incertitudes, ne garantit pas de mieux couvrir l'incertitude liée au choix de la loi d'ajustement statistique que ne le permet le recours à un intervalle de confiance à 95 %.

Pour ce qui concerne la SRI « remontée de la nappe phréatique », l'intervalle de confiance à 95 % a été retenu par cohérence avec la SRI « pluies locales » (les remontées de nappe trouvant généralement leur origine dans la survenue de pluies). De plus, ce choix constitue un moyen de pénalisation de la SRI.

III.2.2 Études de sensibilité et pénalisation des paramètres influents

Pour couvrir les incertitudes difficilement quantifiables, la RFS I.2.e préconisait le recours au jugement d'experts en indiquant que celui-ci est motivé « soit par le consensus scientifique existant dans le domaine considéré, soit éventuellement par des études de sensibilité concernant certaines hypothèses et qui en justifient le conservatisme ». La pertinence et l'efficacité de ces principes ont été reconnues dans le groupe de travail et un consensus s'est établi pour les reconduire dans le guide inondation.

Le guide (7ème paragraphe de la partie 3.2) explicite également une démarche particulière d'étude de sensibilité mise en œuvre dans la méthode REX-Blayais : l'étude du paramètre influent. Cette pratique vise à simplifier la prise en compte des incertitudes d'une SRI en identifiant les « paramètres influents » et en attribuant au paramètre le plus influent, une valeur pénalisant significativement la SRI afin d'assurer un conservatisme global de celle-ci, sans étude détaillée de l'ensemble de paramètres intervenant dans son calcul. Il est à noter que la notion de paramètre est à prendre au sens large : elle peut couvrir des données d'entrée du calcul de la SRI aussi diverses que le paramètre définissant la rugosité du lit majeur d'un cours d'eau ou l'hypothèse de tenue/rupture d'une digue sèche. Cette démarche a été explicitement préconisée pour les calculs de propagation hydraulique de crue.

III.3 Tableau de synthèse des SRI

In fine les différentes SRI peuvent être synthétisées de façon simplifiée dans le tableau suivant.

Objectif cible de chaque SRI : « 10 ⁻⁴ /an, incertitudes comprises »			
Situation SRI	« Aléa de base »		Majoration/conjonction de « l'aléa de base »
PLU : Pluies locales	Hauteurs de pluies centennales (BS 95%)		Scénario de ruissellement de surface avec hyp d'indisponibilité du réseau pluvial local
CPB : Crue petit BV	Crue de débit max instantané décennal		
	Débit issu des pluies centennales (BS 95%)		OU (uniquement pour les BV entre 10 et 100 km ²) : majoré de 100 %
DDOCE : Dégradation d'ouvrages	Rupture déterministe unitaire ET ruptures multiples selon scénarios (séisme, etc.)		
INT : Intumescence	Approche déterministe selon l'initiateur		propagée sur niveau pénalisant
RNP : Remontée de nappe phréatique	Effet de la remontée dû à un initiateur		Niveau initial = décennal
	OU		
	Niveau de nappe centennal (BS 95%)		Hyp hydrogéologique très pénalisante
CGB : Crue grand BV	Débit millennial (BS 70%) + paramètre influent		majoré de 15 %
ROR : Rupture d'un ouvrage de retenue	Effacement total +majoration des débits de l'onde (15%) et paramètre influent		
CLA : Clapot	Clapot centennal (BS 70 %)		propagée sur crue millennale (BS 70%)
NMA : Niveau marin	Marée astronomique maximale	Evolution niveau marin	Surcote millennale (BS 70%) + 1 m OU
			Modèle statistique reproduisant les horsains
VAG : Vagues	Houle centennale (BS 70%)		propagée sur le niveau marin de référence
SEI : Seiche	Si seiche identifiée, niveau marin NMA augmenté de la hauteur de la seiche annuelle		

Tableau 1 : synthèse des situations de référence (SRI) définies par le guide inondation (notation : BS 70[95] % : « Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70[95] % »)

IV EXEMPLE D'UNE SITUATION RETENUE POUR LE RISQUE INONDATION : LA SRI

« PLUIES LOCALES (PLU) »

Les pluies locales extrêmes survenant sur un site engendrent des ruissellements qui peuvent provoquer des inondations. Contrairement à d'autres aléas, ces pluies ne peuvent pas être caractérisées par une durée intrinsèque. Pour une fréquence de dépassement donnée, les pluies extrêmes sont caractérisées par une série de couples « intensité (ou hauteur) / durée de la pluie » ou par des coefficients permettant de déterminer des courbes intensité-durée, tels que les coefficients de Montana. La détermination des durées de pluie à prendre en compte est réalisée dans un second temps. Elle dépend des caractéristiques des bassins versants étudiés, ainsi que de la stratégie de gestion des ruissellements d'eaux pluviales.

La SRI pluies locales couvre le risque d'inondation associé au ruissellement provenant de bassins versants de taille inférieure à 10 km². La suite de cette partie présente et justifie les principales préconisations associées à cette SRI.

IV.1 Définition des pluies de référence

Le groupe de travail a estimé que l'état de l'art ne permettait pas de définir de façon consensuelle des pluies infra-journalières pour des périodes de retour supérieures à 100 ans. En effet, d'une station météorologique à l'autre, le comportement statistique des pluies associées à des durées courtes est très variable, en particulier pour ce qui concerne le paramètre de forme des ajustements des lois à 3 paramètres. Dans ces conditions, et en l'absence de consensus sur un type de loi à ajuster (loi à 2 ou 3 paramètres), il n'est pas apparu pertinent de chercher à définir des pluies de périodes de retour supérieures à 100 ans) à partir de données locales. Des méthodes de régionalisation pourraient apporter de la robustesse aux ajustements statistiques mais leur mise en œuvre relève encore du domaine de la R&D. Par ailleurs, les méthodes de génération de chroniques de pluies (type SHYPRE et SHYREG) ont été identifiées comme prometteuses mais lors de l'état de l'art réalisé par le groupe de travail, elles ne sont pas apparues validées sur l'ensemble de la France pour des pluies de fréquence inférieure à 10⁻²/an, en particulier pour des durées de pluies horaires ou infra-horaires nécessaires pour étudier des zones d'extension restreinte comme un site industriel.

En conséquence, le groupe de travail a reconduit le choix retenu dans la méthode REX-Blayais, consistant à définir des pluies de référence issues d'une extrapolation statistique centennale des données d'une station météorologique représentative du site et préconise de valider les pluies retenues par comparaison avec des valeurs régionales.

IV.2 Condition en aval du réseau d'eaux pluviales

Ce point a fait l'objet de nombreuses discussions dans le groupe de travail. Selon les configurations du réseau d'eaux pluviales, l'influence du niveau d'eau en aval est très variable. Elle peut être nulle ou quasi nulle dans le cas d'un réseau disposant d'un système de relevage par pompage, ou au contraire très significative dans le cas d'un réseau gravitaire caractérisé par de faibles pentes et un niveau aval proche de celui des collecteurs. Par ailleurs, il peut paraître à première vue très arbitraire d'imposer une valeur à ce paramètre qui ne dépend pas nécessairement des pluies locales (par exemple, si le réseau rejette dans un fleuve). Sur cette base, le groupe de travail a retenu dans la SRI une approche privilégiant l'analyse du risque de concomitance d'une pluie extrême sur le site et d'un niveau aval haut.

IV.3 Approche complémentaire d'un scénario de ruissellement de surface

Le groupe de travail a relevé que le risque d'une indisponibilité partielle du réseau d'évacuation des eaux pluviales ne peut être exclu, notamment durant une pluie d'orage de courte durée et de forte intensité. En effet, des phénomènes, tels que la grêle ou la mise en mouvement de débris divers par les ruissellements, sont alors fortement susceptibles de survenir. En provoquant l'obstruction d'avaloirs, ces phénomènes associés ou résultant de la pluie, risquent de rendre indisponible une partie plus ou moins étendue du réseau.

De plus, les pluies de référence centennales définies ne permettent de couvrir l'objectif de sûreté de probabilité 10^{-4} /an, « incertitudes comprises ». Il convenait de prendre en compte le risque lié à des événements plus rares que ceux définis par les pluies de référence. De façon générale, le groupe de travail a considéré qu'il est plus efficace de s'assurer que la topographie du site et des plates-formes aménagées dirige convenablement les ruissellements plutôt que de sur-dimensionner des réseaux dont la défaillance ne peut pas être exclue.

Pour prendre en compte ces éléments, un scénario de ruissellement est à étudier, en considérant indisponibles les accès au réseau local d'évacuation des eaux pluviales de l'installation. Pour définir le scénario de pluies associé, le groupe de travail a proposé de se référer à une hauteur de pluie centennale tombant en 1 heure. Il faut souligner que cette durée de 1h est arbitraire et n'a pas de justification « physique ». Cette valeur a été retenue pour tenir compte des disparités météorologiques entre les sites et se trouver dans une fourchette comprise entre 5 et 10 cm environ de hauteur d'eau cumulée selon les sites. Le groupe de travail a souligné que l'hypothèse d'indisponibilité simultanée des avaloirs est très pénalisante.

Cette nouvelle approche constitue un complément notable du guide à la méthode REX-Blayais. Les moyens de mise en œuvre de l'étude de ruissellement de surface ont été recensés par le groupe de travail. Cet état des lieux a abouti à l'identification de différentes méthodes envisageables : calcul d'étalement global, modélisation numérique des écoulements ou approche intermédiaire d'identification des axes d'écoulements principaux. L'utilisation de méthodes de modélisation numérique a fait l'objet de travaux de recherche en collaboration entre l'IRSN et l'école Polytech'Nice ([Abily et al, 2012], [Abily et al., 2013]).

IV.4 Apports d'eau des bassins versants en amont

S'il existe une zone de collecte des eaux pluviales surplombant l'installation, le guide préconise de réaliser une étude de ruissellement de surface du même type que celle présentée au paragraphe IV.3, en considérant indisponible le réseau pluvial surplombant l'installation.

De façon générale, concernant les apports d'eau provenant des bassins versants ruraux de taille inférieure ou égale à 10 km², donc couverts par la SRI pluie locale, le guide préconise de vérifier l'existence d'une marge significative des dispositifs de protection pour le cas où surviendraient des ruissellements plus importants que ceux définis par la pluie de référence centennale (borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %).

Cette préconisation apporte une continuité entre les SRI pluies locales (PLU) et crue sur un petit bassin versant (CPB). En effet, la SRI CPB couvre des bassins versants de taille comprise entre 10 et 5 000 km². Elle est définie par un débit maximal instantané de probabilité 10^{-4} /an mais pour les bassins versants de taille comprise entre 10 et 100 km², il est admis que le débit associé à cette SRI soit calculé à partir des pluies

centennales (borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %) en multipliant le débit obtenu par un facteur 2. Une crue sur un petit bassin versant, de taille d'environ 10 km² pourrait ainsi être traité de façon analogue en se référant à la méthode simplifiée acceptée pour les petits bassins versants de taille comprise entre 10 et 100 km² (multiplication du débit centennal par un facteur 2) ou en se référant à la SRI pluie locale et en justifiant l'existence de marges sur les dispositifs de protection permettant de maîtriser un débit égal au double du débit centennal.

Enfin, le guide préconise l'identification et la prise en compte des points singuliers sur lesquels peuvent se produire des embâcles susceptibles d'aggraver la situation d'inondation.

V CONCLUSIONS

L'élaboration du guide inondation pour la protection des installations nucléaires a été l'occasion d'un travail collectif remarquable autour d'un objectif de sûreté majeur. La cohérence globale qu'il a fallu assurer pour tenir compte de l'ensemble de phénomènes susceptibles de provoquer des inondations d'origine externe a nécessité de dépasser les pratiques des différentes disciplines concernées. Elle a permis de partager des préconisations sur des méthodes communes, d'identifier des sujets peu couverts par les études et recherches à ce jour (seiches, surcotes marines) et de proposer des pratiques qui peuvent servir au-delà du seul domaine de la sûreté nucléaire.

Lors d'un tel exercice, une étape primordiale pour le groupe d'experts interrogé est l'explicitation de l'objectif qui lui est donné. La définition de l'objectif est directement du ressort du décideur mais celui-ci peut avoir tendance à se retourner vers les experts techniques pour s'en remettre à « l'état de l'art ». L'objectif défini par le décideur doit être explicite, « traduit » et partagé avant de chercher à définir les moyens de l'atteindre. Pour le guide inondation, l'objectif de sûreté a été explicité au cours des réunions du groupe de travail et validé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Il s'agissait de définir des situations de référence dont la probabilité de dépassement est de 10⁻⁴/an en ordre de grandeur, et qui couvrent, pour ce niveau, les incertitudes. Compte tenu de l'écart très important entre cet objectif et les probabilités accessibles par les méthodes statistiques classiques, l'objectif de sûreté a servi de « boussole » au groupe de travail sans qu'il soit possible de démontrer formellement que celui-ci est atteint pour chaque situation de référence (SRI).

La prise en compte des incertitudes dans les SRI a également généré beaucoup de discussions lors de l'élaboration du guide. De ce point de vue, le cadrage par l'objectif de sûreté atteint ses limites. En effet, la définition de préconisations relatives aux incertitudes nécessite des connaissances techniques très poussées que seuls ont généralement les experts du domaine. Là encore, un dialogue est nécessaire entre experts et décideurs pour tenir compte des spécificités de chaque domaine d'étude concerné et assurer une cohérence globale de la prise en compte des incertitudes.

Pour transformer l'état de l'art et préconisations du groupe de travail en un guide opérationnel, des arbitrages ont dû être opérés. Certaines méthodes récentes n'ont pas été explicitement retenues car des contraintes d'applicabilité et de continuité avec les méthodes en place étaient également à prendre en compte. Le guide précise néanmoins que l'exploitant peut recourir à des méthodes alternatives à celles présentées dans le guide s'il justifie que celles-ci permettent une prévention satisfaisante des risques liés aux inondations externes. De façon générale, le guide ne cadre évidemment pas l'ensemble des choix qui se poseront dans les études mais, outre les situations d'inondation et les principaux points méthodologiques, le guide présente une démarche qui permet de traiter les incertitudes associées aux différentes étapes d'une étude.

VI REMERCIEMENTS

Cette communication a pu voir le jour grâce aux travaux du groupe de travail mis en place pour l'élaboration du guide inondation. Ce travail important a été mené à bien grâce à l'implication de nombreux spécialistes du domaine de l'eau qui ont participé aux réunions techniques, ont rédigé ou relus les documents du groupe de travail.

VII REFERENCES

Abily M., Duluc C.M. et Gourbesville P., (2012). Use of standard 2D numerical modelling tools to simulate surface runoff over an industrial site - Feasibility and comparative performance survey. *Simhydro 2012 : New trends in Hydroinformatics*, Sophia Antipolis - Nice 12-14 septembre 2012 p8.

-
- Abily M., Duluc C.M., Faes, J.B et Gourbesville P., (2013). Performance assessment of modeling tools for high resolution runoff simulation over an industrial site. *Journal of Hydroinformatics*, IWA publishing doi :10.2166/hydro.2013.063, p.16.
- Bardet L., Duluc C.-M., Rebour V. et L'Her J. (2011). - Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**: 1627-1639.
- Bardet L. et Duluc C.-M. (2012). – Apports et limites d'une analyse statistique régionale pour l'estimation de surcotes extrêmes en France. *Congrès SHF : «Événements extrêmes fluviaux et maritimes»*, Paris, 1-2 février 2012.
- Bernardara P., Andreewsky M. et Benoit M. (2011). - Application of regional frequency analysis to the estimation of extreme storm surges. *Journal of Geophysical Research*, **116**(2).
- Guide n°13 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire – Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes – version du 08/01/2013 (document disponible sous à l'adresse suivante : www.asn.fr/index.php/S-informer/Publications/Guides-pour-les-professionnels/Surete-nucleaire/Guide-de-l-ASN-n-13-relatif-a-la-protection-des-installations-nucleaires-de-base-contre-les-inondations-externes)