

Réacteur Jules Horowitz

Evaluation complémentaire de la sûreté au regard de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima I

SOMMAIRE

0. Liminaire.....	7
1. Caractéristiques de l'installation RJH	8
1.1. Généralités	8
1.2. Principales caractéristiques	8
1.2.1. Principaux bâtiments	9
1.2.2. Unité nucléaire	10
1.2.3. Cœur du réacteur	14
1.2.4. Entreposages de matières nucléaires.....	15
1.2.5. Etats de fonctionnement du cœur	16
1.2.6. Circuits de refroidissement normaux	17
1.2.7. Circuits de refroidissement de sauvegarde.....	18
1.2.8. Systèmes de refroidissement ultime	19
1.2.9. Alimentation électrique.....	19
1.2.10. Contrôle de la réactivité	19
1.2.11. Conduite de l'installation	20
2. Identification des risques d'effet falaise et des structures et équipements essentiels	21
2.1. Risques d'effet falaise	22
2.2. Structures et équipements essentiels	24
2.2.1. Fusion sous eau couplée à une perte du confinement au niveau l'enceinte de confinement.....	24
2.2.2. Fusion à l'air	26
2.2.3. Accident de criticité	27
2.2.4. Fonctions automatiques du contrôle-commande classé de sûreté.....	28
3. Séisme	29
3.1. Dimensionnement de l'installation.....	29
3.1.1. Séisme de dimensionnement.....	29
3.1.2. Dispositions de protection du dimensionnement	35
3.1.3. Conformité de l'installation	45
3.2. Evaluation des marges.....	46
3.2.1. Indication du niveau de séisme au delà duquel la perte des fonctions fondamentales de sûreté ou l'endommagement du combustible (en cuve ou en piscine) deviennent inévitables ou, pour les installations autres que les réacteurs, conduisent à l'enclenchement d'actions relevant de situations accidentelles	46
3.2.2. Indication sur le niveau de séisme auquel l'installation peut résister sans perdre l'intégrité du confinement.....	64
4. Inondation	67
4.1. Dimensionnement de l'installation.....	67
4.1.1. Inondation de dimensionnement.....	67
4.1.2. Dispositions de protection du dimensionnement	69
4.1.3. Conformité de l'installation	72
4.2. Evaluation des marges.....	73

5.	Autres phénomènes naturels extrêmes	74
5.1.	Conditions météorologiques extrêmes liées à l'inondation (tempête, pluies ...)	74
5.2.	Séisme dépassant le niveau de séisme pour lequel l'installation ou certains ouvrages sont dimensionnés et inondation induite dépassant le niveau d'eau pour lequel l'installation est dimensionnée	74
5.2.1.	Identification des situations externes	74
5.2.1.1.	Analyse du risque de rupture de barrages à proximité de Cadarache à la suite d'un séisme	74
5.2.1.2.	<i>Analyse des conséquences d'une rupture du Canal de Provence consécutive à un séisme sur Cadarache</i>	75
5.2.1.2.1.	Description des ouvrages du canal de Provence	75
5.2.1.2.2.	Analyse du risque inondation par les ouvrages du Canal de Provence.....	77
5.2.1.2.2.1.	<i>Débordement du puits du Médecin</i>	78
5.2.1.2.2.2.	<i>Effacement du puits du Médecin</i>	78
5.2.1.2.2.3.	<i>Fuites par dégradation du puits</i>	80
5.2.1.2.2.4.	<i>Synthèse de l'analyse sur la dégradation des ouvrages de la prise du Médecin</i> 80	80
5.2.1.2.2.5.	<i>Réseau d'alimentation en eau de refroidissement du RJH</i>	81
5.2.2.	Rupture d'une conduite des eaux de refroidissement à l'intérieur du local BMR	83
5.2.3.	Points faibles et effet falaise	84
5.2.4.	Dispositions envisagées pour prévenir ces effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de la conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles.....)	84
6.	Perte des alimentations électriques et perte des systèmes de refroidissement.....	86
6.1.	Perte des alimentations électriques externes	86
6.1.1.	Dispositions de conception de l'installation tenant compte de cette situation, moyens de secours prévus et conditions de mise en œuvre.....	86
6.1.2.	Temps de fonctionnement des alimentations électriques internes sans secours extérieur.....	90
6.1.3.	Dispositions prises pour prolonger la durée d'utilisation de ces alimentations.....	91
6.1.4.	Dispositions envisagées pour renforcer la robustesse de l'installation.....	92
6.2.	Perte des alimentations électriques externes et des alimentations internes	93
6.2.1.	Perte des alimentations électriques externes et des alimentations de secours conventionnelles.....	93
6.2.2.	Perte des alimentations électriques externes et de toutes les alimentations de secours	94
6.2.2.1.	Capacité et durée des batteries	95
6.2.2.2.	Indication sur le temps pendant lequel le site peut faire face à la perte des alimentations électriques externes et des sources d'énergie de secours, sans intervention extérieure.....	95
6.2.2.3.	Actions extérieures prévues.....	95
6.2.2.4.	Dispositions envisagées pour prévenir les effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles.....)	95
6.3.	Perte du système de refroidissement	95
6.3.1.	Perte de la source froide principale	95
6.3.2.	Perte de la source froide principale et de la source froide de secours	96

6.4. Perte du système de refroidissement principal, cumulée avec la perte des alimentations électriques externes et des alimentations internes de secours.....	97
7. Gestion des accidents graves.....	100
7.1. Mesures de gestion des accidents actuellement en vigueur aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur	100
7.1.1. Mesures de gestion des accidents actuellement en vigueur sur le centre de Cadarache aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur	100
7.1.1.1. Moyens de gestion de la situation de crise.....	100
7.1.1.1.1. Risques liés à l'environnement industriel	101
7.1.1.1.2. Organisation générale de la sécurité du centre.....	101
7.1.1.1.3. Organisation en cas de crise	102
7.1.1.1.4. Modalités de déclenchement et de diffusion de l'alerte.....	103
7.1.1.1.4.1. Alerte au niveau de l'installation accidentée et du site.....	103
7.1.1.1.4.2. Déclenchement des dispositifs d'urgence relevant du PUI et alerte des organismes officiels.....	103
7.1.1.1.4.3. Alerte relative à l'environnement proche du site.....	104
7.1.1.1.5. Exercices et formations	104
7.1.1.1.5.1. Exercices particuliers dans les installations	104
7.1.1.1.5.2. Exercices généraux	104
7.1.1.1.5.3. Formation du personnel à la sécurité	104
7.1.1.1.5.4. Formation des acteurs de la gestion de crise.....	105
7.1.1.1.6. Contrôles techniques de sécurité	105
7.1.1.2. Robustesse des moyens disponibles.....	106
7.1.1.2.1. Moyens d'intervention.....	106
7.1.1.2.1.1. Dissémination de matières radioactives.....	106
7.1.1.2.1.2. Inondation.....	106
7.1.1.2.1.3. Alimentations électriques de secours.....	106
7.1.1.2.2. Gestion de crise en cas de séisme.....	107
7.1.2. Mesures de gestion des accidents actuellement prévues par l'Installation RJH aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur.....	108
7.2. Mesure de gestion des accidents et éléments de conception de l'installation permettant de protéger l'intégrité du confinement après l'endommagement du combustible ¹¹⁰	
7.3. Mesure de gestion des conséquences de la perte de la fonction de refroidissement de l'eau de la piscine ou tout autre entreposage du combustible	112
8. Conditions de recours aux entreprises prestataires	113
9. Synthèse	114

GLOSSAIRE

AF	Arrêt fermé
AO CF	Arrêt ouvert convection forcée
AO CN	Arrêt ouvert convection naturelle
AP	Absorbant de pilotage
ASA	Absorbant de sauvegarde arrêt
AU	Arrêt d'urgence
BAD	Bâtiment diesel de disponibilité
BAG	Boite à gants
BAS	Bâtiment de sauvegarde
BAV	Bâtiment vestiaire
BMR	Bâtiments des réfrigérants
BMX	Bâtiment d'exploitation
BP CF	Basse puissance convection forcée
BP CN	Basse puissance convection naturelle
BT	Basse tension
BUA	Bâtiment des annexes nucléaires
BUR	Bâtiment réacteur
CCQ	Contrôle commande de sauvegarde
CEDE	Compartiment d'exploitation des expériences
Chaines ND	Chaînes neutroniques de démarrage
Chaines NF	Chaînes neutroniques de flux
CIC	Alimentation maintenue du CSC (UPS Q)
CIQ	Alimentation maintenue du CCQ (MAQ)
DAS	Diesel Alternateur de Sauvegarde
DS	Diesel de Disponibilité
EC	Elément combustible
ECI	Elément combustible irradié
ECN	Elément combustible neuf
EML	Pont nef BUA
EMZ	Ponts ZAR cellules
EPI	Piscine d'entreposage des composants irradiés
EPL	Circuit de vidange et de remplissage des piscines BUA
EPU	Piscine d'entreposage ECI
EPV	Capacités de vidange des piscines
FLS	Formation Locale de Sécurité
HT	Haute tension
INB	Installation Nucléaire de Base
IRE	Plateforme poste de livraison électrique HT
MAQ (CIQ)	Alimentation maintenue classée 2 (CIQ)
MDT	Manque de tension
MEB	Production électrique réseau prioritaire maintenu
MED	Réseau électrique prioritaire HT
MEH	Réseau électrique normal HT
MEN	Réseau électrique normal BT
MEP	Réseau électrique prioritaire BT
MEQ	Réseau électrique de sauvegarde
MER	Diesel de secours
MES	Diesels de sauvegarde (MESA et MES B)
MEU (SUS)	Sources d'ultime secours

MVB	Réseau d'extraction B du BUR
MVC	Réseau d'extraction C du BUR
MVD	Réseau d'extraction D du BUR
MVE	Réseau de soufflage du BUR
MVF	Réseau d'extraction A du BUA
MVG	Réseau d'extraction B du BUA
MVH	Réseau d'extraction C du BUA
MVI	Réseau d'extraction D du BUA (sauvegarde)
MVJ	Réseau de soufflage du BUA
MVK	Réseau de sauvegarde 1 du BUA
MVL	Réseau de sauvegarde 2 du BUA
MVM	Réseau de sauvegarde de la ZRF
MVN	Réseau d'air de référence
MVO	Réseau d'eau glacée de conditionnement normal
MVQ	Réseau d'eau glacée de conditionnement de sauvegarde
MVS	Système de ventilation des BAS
PDR	Poste De Repli
PDL	Poste De Livraison
PUI	Plan d'urgence interne
RCU	Système de contrôle ultime de la réactivité
RCM	Machine de Chargement / Déchargement
REE	Piscine Intermédiaire
REN	Circuit primaire de refroidissement de la piscine d'entreposage intermédiaire
REP	Circuit primaire de refroidissement réflecteur et piscine réacteur
RER	Piscine réacteur
REU	Circuit de recirculation ultime
REW	Circuit d'écumage de purge, d'appoint et de remplissage des piscines du BUR
RMD	Passerelle polaire en piscine réacteur
RMP	Pont polaire
RMT	Passerelle principale piscines BUR
RPG	Circuit de détection de Rupture de Gaine
RPP	Circuit primaire principal (réfrigération cœur)
RSE	Circuit secondaire piscines BUR
RSS	Circuit secondaire principal (réfrigération cœur)
RST	Circuit tertiaire
RUC	Circuit de réfrigération de sauvegarde du cœur
RUP	Circuit de réfrigération de sauvegarde des piscines du BUR
RUS	Circuit de réfrigération de sauvegarde secondaire du cœur et des piscines du BUR
SDCI	Salle de conduite de l'installation
SDD	Séisme De Dimensionnement
SI/O	Classe sismique de rang I/O : exigence de maintien de l'intégrité pendant le séisme et de l'opérabilité après séisme
SO/O	Classe sismique de rang O/O : exigence de maintien de l'opérabilité pendant et après séisme
SMHV	Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable
SMS	Séisme Majoré de Sécurité
SPR	Service de Radioprotection
SSC	Structures, Systèmes et Composants
SUS (MEU)	Source d'ultime secours
THE	Très haute efficacité (filtres ventilation)
UN	Unité nucléaire
ZRF	Zone de reprise des fuites

0. Liminaire

D'une manière générale, les installations nucléaires sont construites en prenant des marges importantes, par rapport à la meilleure évaluation des risques encourus, sur la solidité des bâtiments et des équipements ; sachant que ces installations sont de plus équipées de systèmes de sauvegarde redondants. Ceci pour faire face à des phénomènes extérieurs inhabituels ou à des défaillances matérielles ou humaines.

Par exemple, pour le risque de séisme, les installations sont déjà construites pour résister à un séisme « majoré », significativement supérieur au séisme le plus fort identifié au cours de l'histoire, dans la région où est située l'installation. Une marge importante est donc ainsi mise en place lors de la construction de l'installation, aussi bien en matière de séisme (cf. § 3.1) qu'en matière d'inondation (cf. § 4.1).

L'évaluation complémentaire de la sûreté, objet du présent rapport, consiste à réévaluer ces marges à la lumière des événements qui ont eu lieu à Fukushima, à savoir des phénomènes naturels extrêmes mettant à l'épreuve la sûreté des installations. Il s'agit d'apprécier le comportement des installations dans ces situations, pour éprouver leur robustesse et la pertinence des mesures actuellement prévues en cas d'accident. Ceci pour éventuellement identifier des dispositions complémentaires, aussi bien techniques qu'organisationnelles, qui pourraient être mises en place.

De manière plus détaillée, les situations examinées résultent des événements ou aléas extrêmes suivants :

- séisme au-delà du séisme « majoré », inondation au-delà de la crue majorée, autres phénomènes naturels extrêmes (dont l'inondation qui serait causée par le séisme « majoré », cf. § 5),
- pertes postulées des alimentations électriques internes et externes, perte postulée de la source de refroidissement ; cumul de ces deux pertes (cf. § 6),
- la gestion des accidents dans ces situations extrêmes (cf. §7).

Il s'agit alors d'identifier les éventuelles situations pouvant induire une brusque dégradation des séquences accidentelles (« effet falaise ») et d'évaluer les marges par rapport à cet éventuel effet falaise.

Ceci permet ensuite de proposer des dispositions complémentaires permettant de prévenir de telles situations extrêmes, et de renforcer ainsi la robustesse de l'installation (amélioration de la résistance de certains équipements, renforcement de l'autonomie de certaines alimentations électriques, etc...)

1. Caractéristiques de l'installation RJH

1.1. Généralités

Le réacteur Jules Horowitz (RJH), qui constitue l'installation nucléaire de base n° 172, est en cours de construction sur le site de Cadarache, situé sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance (Bouches du Rhône).

Le Commissariat à l'énergie atomique a été autorisé à créer cette installation par décret n° 2009-1219 du 12 octobre 2009.

Le site de Cadarache est situé à 35 km au nord-est d'Aix en Provence et à 60 km de Marseille. Il est éloigné des grands centres industriels, qui se trouvent à plus de 50 km. L'implantation du RJH à l'intérieur de ce site est présentée sur la figure 1.

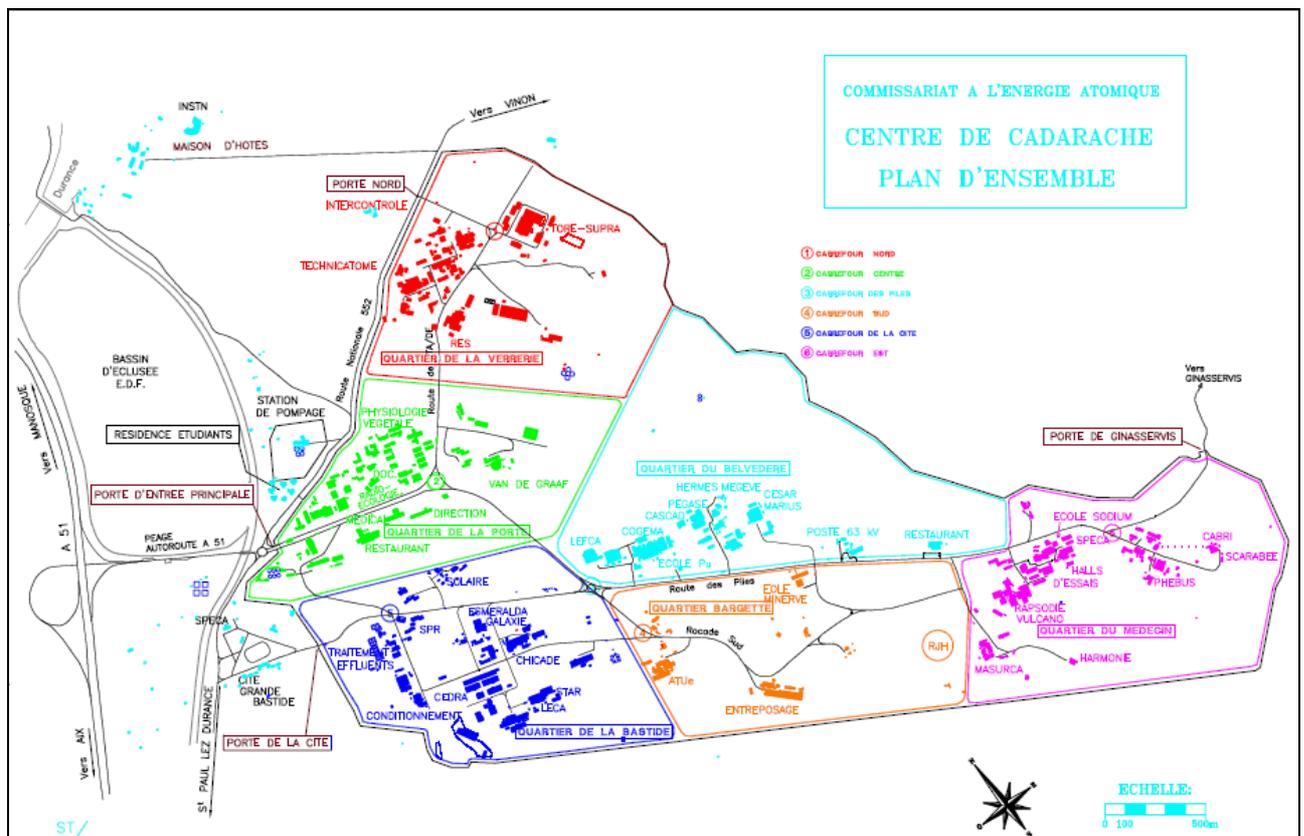


Figure 1 :
Carte du site de Cadarache et de l'environnement du RJH

1.2. Principales caractéristiques

Le RJH est un réacteur permettant de réaliser des irradiations à haut flux de neutrons, afin en particulier :

- d'effectuer des expériences visant à améliorer ou qualifier les matériaux et les combustibles des réacteurs actuels et à venir,
- de produire une quantité significative de radioisotopes à usage médical, répondant ainsi à des enjeux pour la santé publique.

Le RJH sera constitué de deux bâtiments principaux (un bâtiment réacteur et un bâtiment annexe) et d'un ensemble de bâtiments supports constituant une Installation Nucléaire de Base (INB 172). Sa première divergence est prévue en 2016.

1.2.1. Principaux bâtiments

L'installation RJH comprend principalement :

- une unité nucléaire (UN), constituée du bâtiment réacteur (BUR) et du bâtiment des annexes nucléaires (BUA),
- des bâtiments nucléaires associés :
 - un bâtiment vestiaires (BAV),
 - deux bâtiments de sauvegarde (BAS A et BAS B), comprenant chacun un groupe électrogène de sauvegarde ainsi que des batteries (SUS), et supportant chacun un aéroréfrigérant de sauvegarde,
 - deux galeries protégées (BAG A et BAG B) assurant la liaison entre les BAS et le BUA,
- des bâtiments de moyens supports :
 - un bâtiment des réfrigérants (BMR), abritant les échangeurs des circuits secondaire et tertiaire de refroidissement du réacteur,
 - un bâtiment qui abrite le diesel de disponibilité (BAD)
 - une galerie (BMN) assurant la liaison entre le BMR et le BUA,
 - d'autres bâtiments abritant des magasins, des bureaux, ...

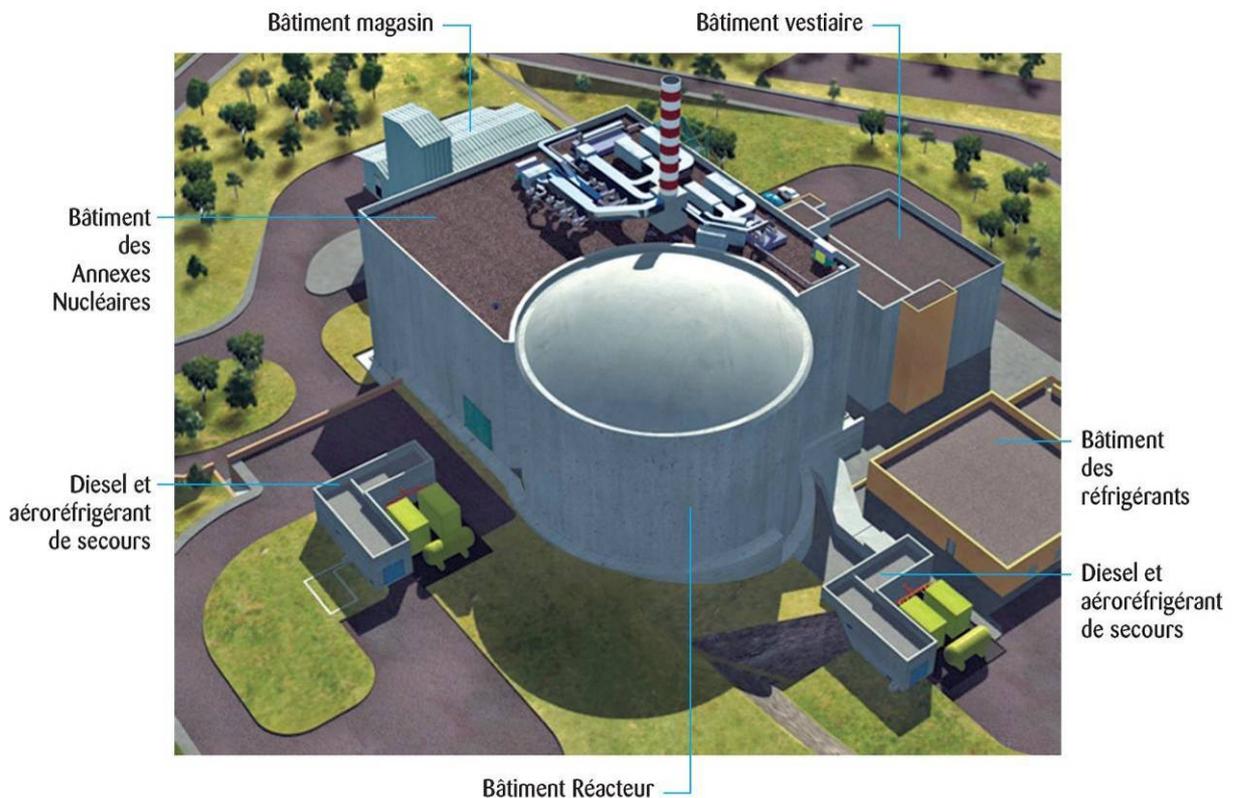
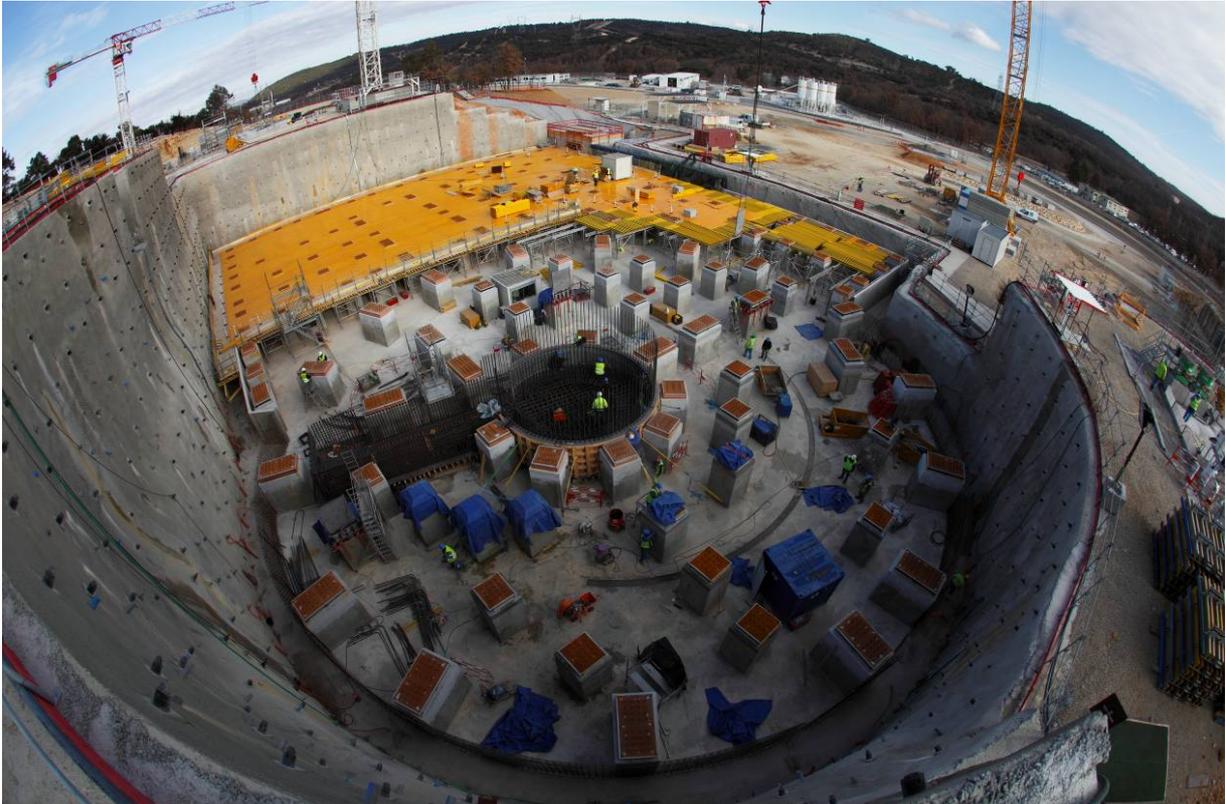


Figure 2 :
Disposition des bâtiments du RJH

1.2.2. Unité nucléaire

L'UN repose sur des appuis parasismiques. Plus précisément, son radier, appelé « supérieur », repose sur des appuis parasismiques disposés sur des plots qui eux-mêmes reposent sur un radier appelé « inférieur ». L'UN est en partie encastrée dans la roche, au sein d'un encuvement autorisant ses déplacements en cas de séisme. L'encuvement est constitué du radier inférieur et de talus verticaux. Ces talus, qui sont cloués dans la roche et munis d'un dispositif de drainage, sont appelés « paroi clouée ».



Le BUR accueille en particulier le réacteur nucléaire. Son radier supérieur, ses voiles cylindriques externes et son dôme torisphérique constituent une enceinte de confinement d'environ 35 m de diamètre interne et 42 m de hauteur. Cette enceinte, en béton armé et précontrainte en partie supérieure, est prévue pour assurer un confinement satisfaisant des substances radioactives libérées en cas d'accident de réactivité à caractère explosif. Toutes les traversées de l'enceinte sont orientées vers le BUA. Les fuites éventuelles des traversées sont collectées dans l'interface entre le BUR et le BUA, appelée « zone de reprise des fuites (ZRF) ». Le taux de fuite maximal de l'enceinte est, sous 110 mbar de surpression, de 0,7% vol./jour pour les fuites non collectées et de 5% vol./jour pour les fuites collectées.

Le BUA comprend également les accès à l'UN, un sas camion, des piscines d'entreposage, des cellules chaudes, des magasins d'entreposage à sec de matières nucléaires vierges, un atelier chaud et la salle de conduite du réacteur.

Du point de vue du génie civil, le BUR et le BUA forment un ensemble unique du niveau -3, qui correspond au radier supérieur, jusqu'au niveau 0, qui correspond au plancher des halls entourant les piscines. La base des piscines et canaux est située autour du niveau -2, sauf en ce qui concerne la piscine réacteur qui descend au niveau -3 et sous laquelle se trouve un niveau -4 partiel constitué de la crypte des mécanismes de commande.

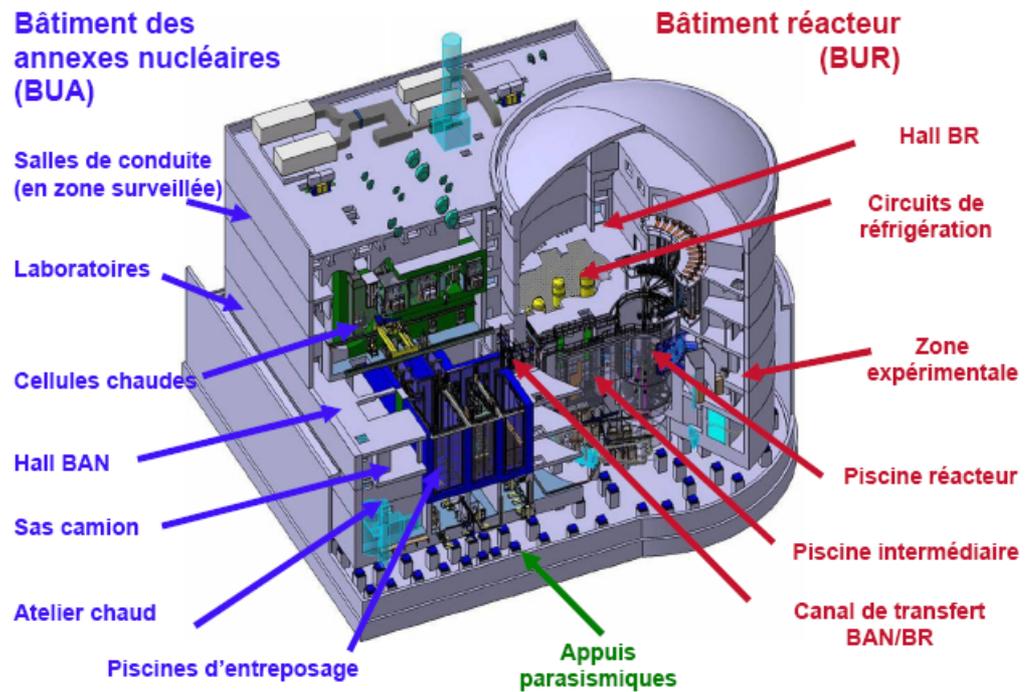
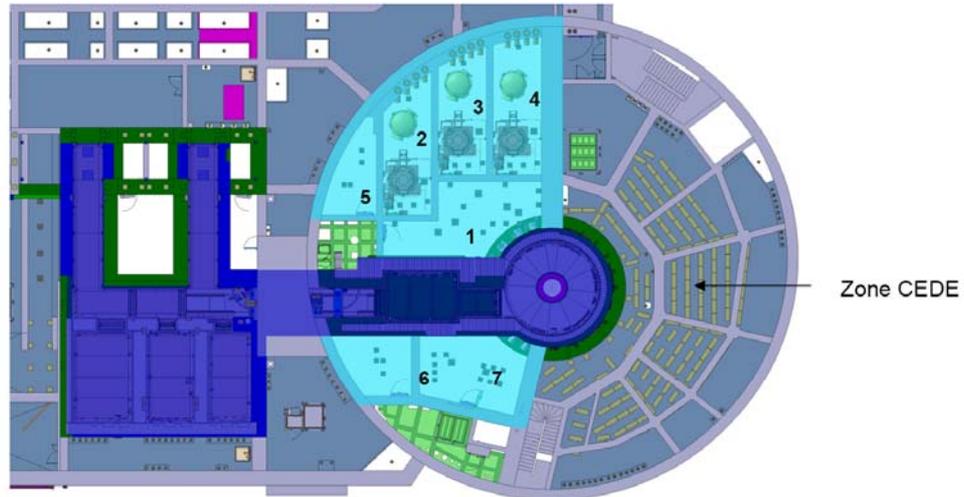


Figure 3 :
Ecorché de l'Unité Nucléaire

L'ensemble des piscines du BUR et du BUA, ainsi que certaines casemates du BUR (circuit primaire du cœur, ...) et la crypte des mécanismes, constituent un ensemble appelé « bloc-eau ». En cas de fuite d'une traversée de piscine ou de brèche d'un circuit, l'exclusion du risque de dénoyage du cœur ou d'éléments combustibles irradiés entreposés est garantie par, selon les cas, le volume limité et l'étanchéité de chaque local du bloc-eau, ou le niveau des traversées de piscine.

La présence de seuils entre les différentes piscines permet d'exclure le risque de vidange généralisée en cas de fuite sur l'une d'elles.



 Piscines, sas et canaux

 Casemates du bloc eau

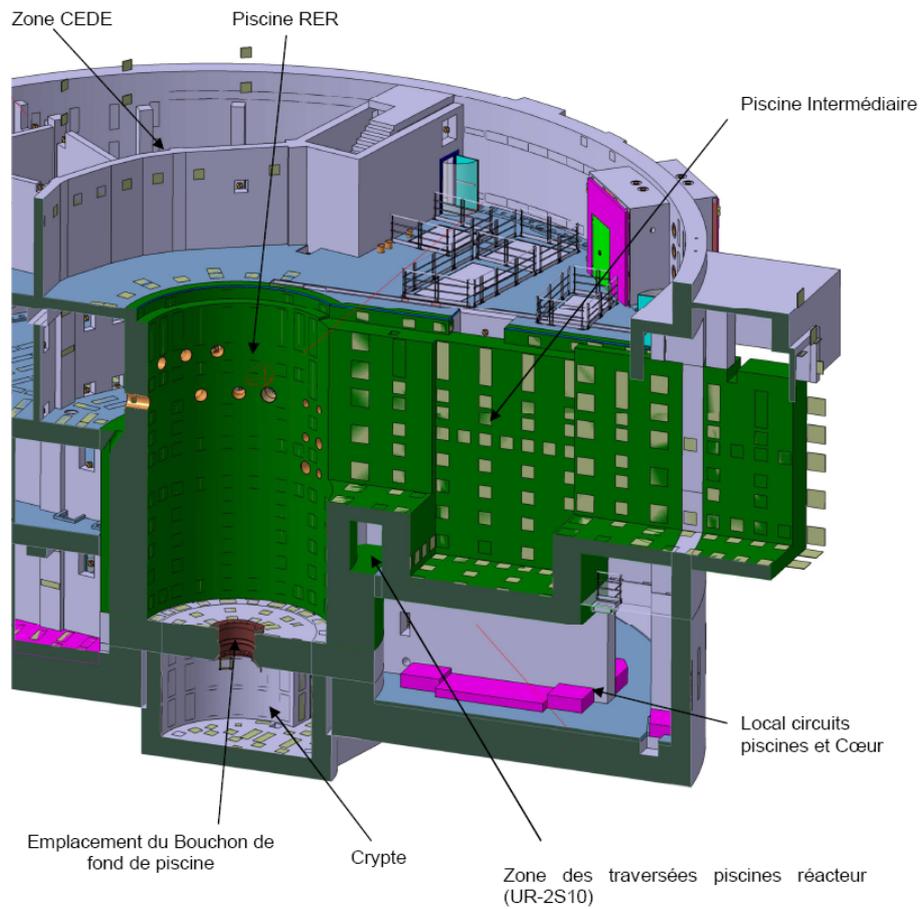


Figure 4 :
Schéma du Bloc Eau

Etat d'avancement de la construction du réacteur au 30/06/2011

L'aménagement du site (création des voies spécifiques d'accès, terrassement, création de l'encuvement réacteur, aménagement de la zone entreprises,...) est terminé depuis fin 2008.

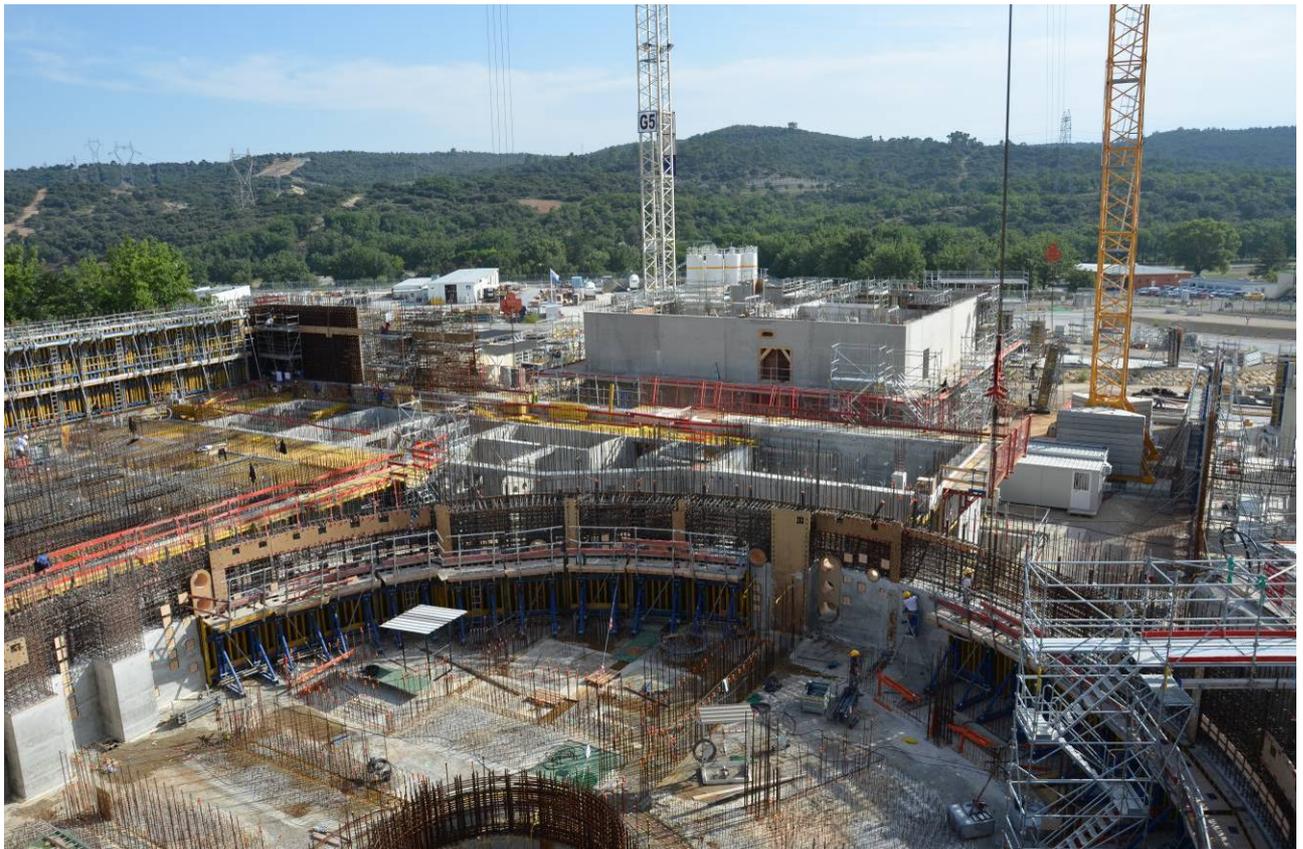
Pour le Génie civil de l'Unité Nucléaire, le radier inférieur a été coulé en Août 2009 et la mise en place de l'ensemble des plots parasismiques finalisée début 2010. Le coulage du radier supérieur qui repose sur les appuis parasismiques (plancher de l'Unité Nucléaire), a été coulé en deux phases (Juin et Décembre) en 2010.

Depuis début 2011, les travaux principaux réalisés sur le chantier sont le coulage des voiles entre les niveaux -3 et -2 du Bâtiment des Auxiliaires Nucléaires, le coulage du plancher du niveau -2 de ce bâtiment étant prévu fin août 2011. Pour le Bâtiment Réacteur, la coulée de la première levée de l'enceinte du bâtiment réacteur a été réalisée le 28/07/2011 après autorisation spécifique de l'Autorité de Sécurité Nucléaire.

Concernant les bâtiments support, la construction des bâtiments BAV (accès-vestiaires) et BMR (Moyens Réfrigérants) démarrée au début de 2011 se poursuit.

La quasi totalité des marchés de fourniture des composants du RJH est lancée. L'avancement de ces marchés comprend différents stades :

- la réalisation des essais (essais hydrauliques des pompes primaires)
- les études de réalisation des titulaires (réseau tertiaire, lots électromécaniques, ponts, réacteur...) parallélisées avec le lancement des approvisionnements principaux (matériau du réflecteur, forgeages aluminium, ...)
- la contractualisation en cours (internes piscine, machine de chargement) ou à venir (VRD, finitions)



Vue du chantier RJH au 3 août 2011

1.2.3. Cœur du réacteur

Le RJH est un réacteur de type pile piscine, modéré et refroidi par de l'eau, dont la puissance nucléaire nominale est limitée à 100 MW.

Le cœur du réacteur comprend, en configuration de référence, 34 éléments combustibles cylindriques d'environ 10 cm de diamètre et 60 cm de hauteur fissile. Chaque élément combustible peut recevoir en son centre soit un dispositif expérimental, soit un absorbant de contrôle, soit un mandrin d'aluminium.

Les éléments combustibles ont une âme combustible en uranium enrichi composée de particules d' U_3Si_2 dispersées dans une matrice d'aluminium, et une gaine en alliage d'aluminium de type AlFeNi. Il est également considéré la possibilité d'emploi d'un combustible de UMo-Al (à âme uranium-molybdène dispersée dans une matrice d'aluminium).

Le cœur est contenu dans un caisson raccordé au circuit primaire, immergé en piscine et obturé en partie supérieure par un couvercle amovible supportant des dispositifs expérimentaux irradiés en cœur. Un réflecteur en béryllium, situé en périphérie du caisson, permet également d'accueillir des dispositifs expérimentaux.

La circulation de l'eau de réfrigération se fait

- du bas vers le haut dans le cœur,
- du haut vers le bas dans le réflecteur.

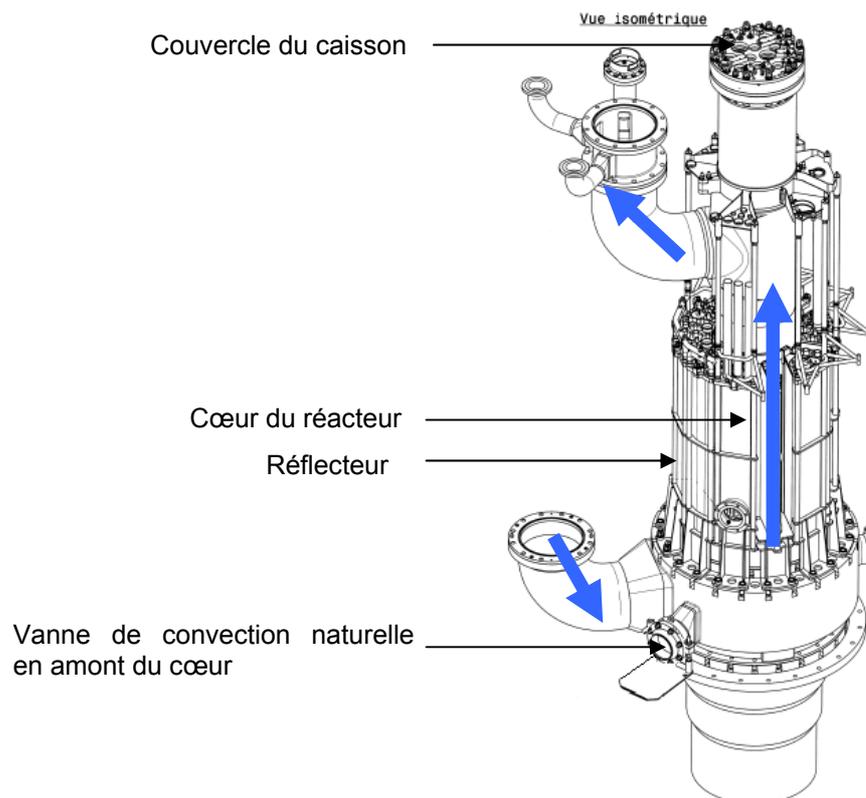


Figure 5 :
Schéma du bloc pile

1.2.4. Entreposages de matières nucléaires

Les matières nucléaires mises en œuvre dans l'installation sont :

- les éléments combustibles du cœur du réacteur (EC). Ils peuvent être neufs (ECN) ou irradiés (ECI),
- les échantillons combustibles des dispositifs expérimentaux. Ces échantillons sont sous forme solide et peuvent être de nature et d'enrichissement variés,
- les cibles mises en œuvre pour la production de radio-isotopes à usage médical.

L'entreposage de ces matières est essentiellement effectué :

- dans deux magasins d'entreposage à sec situés dans l'unité nucléaire. Ils peuvent ensemble contenir les ECN, les cibles mises en œuvre pour la production de radio-isotopes à usage médical et les échantillons combustibles de dispositifs expérimentaux.
- dans les piscines dont les capacités sont présentées ci après.

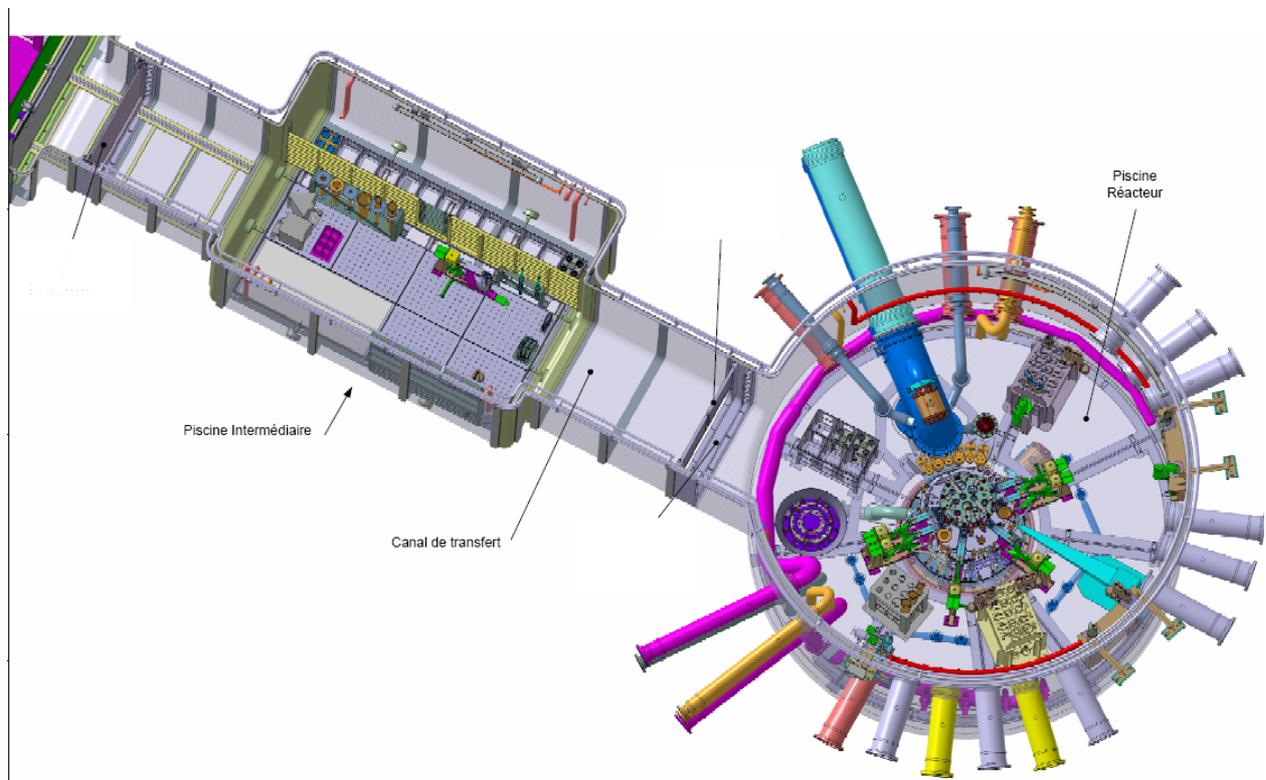


Figure 6 :
Vue de la piscine réacteur et de la piscine intermédiaire

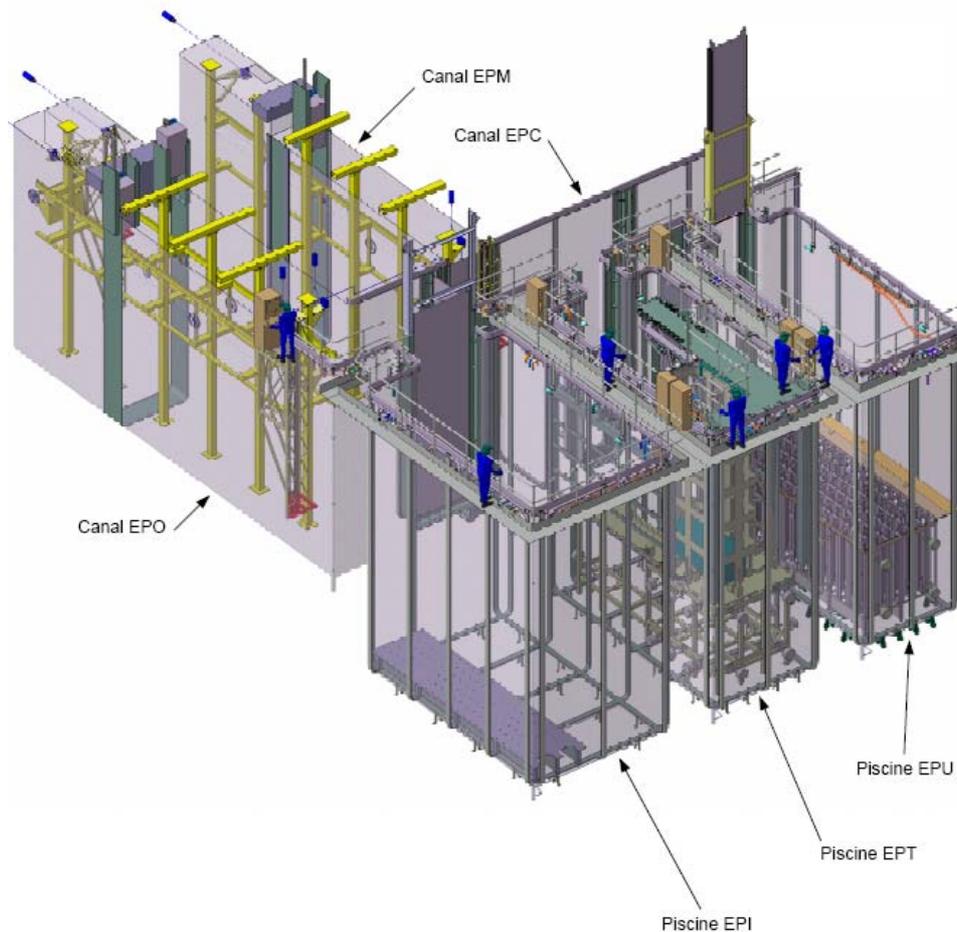


Figure 7 :
Vue des piscines du BUA

Les capacités d'entreposage de matières nucléaires dans les piscines (c'est-à-dire hors transferts cœur réflecteur et poste de travail) sont indiquées dans le tableau suivant :

Bâtiment	Piscine	Capacité d'entreposage (hors objets en cours d'irradiation ou de transfert)
BUR	Piscine réacteur (RER)	64 EC, 21 échantillons combustibles et 48 cibles à usage médical
	Piscine intermédiaire (REE)	96 EC
BUA	Piscine EPU	768 EC refroidis plus de 6 mois
	Piscine EPT	30 échantillons combustibles
	Piscine EPI	Pas d'entreposage de matière

Des quantités limitées de matières nucléaires vierges ou irradiées peuvent être présentes dans les cellules chaudes. Des quantités limitées d'échantillons combustibles vierges peuvent être présentes dans l'atelier chaud.

1.2.5. Etats de fonctionnement du cœur

En situation normale, le réacteur peut être dans les différents états suivants :

- état HP, correspondant à l'état haute puissance, avec caisson fermé, pressurisé et refroidissement par convection forcée,
- états BP CN et BP CF, correspondant à l'état basse puissance, avec :
BP CF : vanne de convection naturelle amont cœur fermée et vanne aval cœur ouverte si couvercle caisson non déposé et refroidissement par convection forcée

BP CN : vanne de convection naturelle amont et aval cœur ouvertes et refroidissement par convection naturelle.

- états AO CN ou AO CF, correspondant à l'état arrêt ouvert, avec caisson ouvert et refroidissement par convection naturelle ou convection forcée selon le cas.

1.2.6. Circuits de refroidissement normaux

Le tableau suivant présente les différents circuits de refroidissement normaux de l'installation :

	Circuit primaire	Circuit secondaire	Circuit tertiaire
Cœur	RPP	RSS	RST
Piscine RER	REP	RSE	
Piscine REE	REN	RSE	
Boucles primaires des dispositifs expérimentaux en casemates		RSD	
Piscine EPI et EPU	EPA	EPB	

Les circuits primaire et secondaire sont tous fermés.

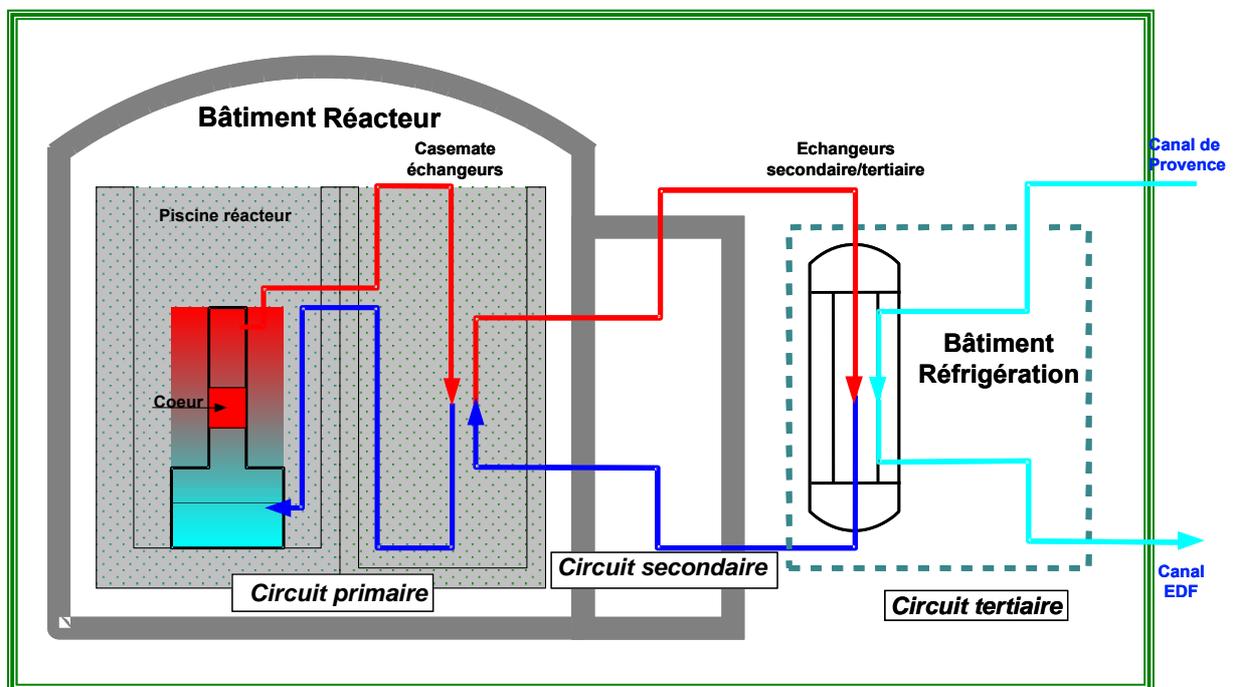


Figure 8 :
Refroidissement du cœur

Le RPP est un circuit en eau tiède et légèrement pressurisé, implanté en piscine et dans des casemates du bloc-eau. Dans ces casemates, il se divise en 3 files parallèles, chacune équipée d'un échangeur de chaleur avec le RSS et d'une pompe.

Dans certains états de fonctionnement à basse puissance ou à l'arrêt, le cœur peut être refroidi par convection naturelle avec la piscine, au moyen de deux vannes situées sur le RPP en amont et en aval du cœur. Ces vannes de convection naturelle sont manoeuvrables depuis la salle de conduite et manuellement en local.

Le RST refroidit les circuits secondaires dans le bâtiment BMR. Il est connecté en amont à une canalisation raccordée au canal de Provence et en aval à une canalisation raccordée au canal EDF de Jouques. La circulation d'eau dans le circuit est gravitaire.

Le RJH est dimensionné pour pouvoir évacuer une puissance thermique au tertiaire de 121 MWth.

1.2.7. Circuits de refroidissement de sauvegarde

En cas de perte des circuits de refroidissement normaux, le réacteur est mis à l'arrêt et des circuits de refroidissement de sauvegarde permettent d'assurer l'évacuation de la puissance résiduelle. Ces circuits de sauvegarde sont fermés et structurés en deux voies A et B redondantes et séparées géographiquement.

Les circuits de refroidissement de sauvegarde comprennent :

- les circuits RUC (A et B), prévus pour le refroidissement du cœur. Chaque circuit RUC forme une boucle avec le cœur en dérivation du circuit RPP, et est refroidi par un circuit RUP décrit ci-après,
- les circuits RUP (A et B), prévus pour évacuer la puissance reçue par les circuits RUC vers les piscines du BUR et pour refroidir ces piscines. Chaque circuit RUP est refroidi par un circuit décrit RUS ci-après,
- les circuits EPS (A et B), prévus pour refroidir les piscines EPU et EPI. Chaque circuit EPS est refroidi par un circuit RUS décrit ci-après,
- les circuits RUS (A et B), prévus pour évacuer la puissance reçue par les circuits RUP et EPS. Chaque circuit RUS est refroidi par un aéroréfrigérant implanté au niveau d'un bâtiment BAS.

Ces circuits sont dimensionnés pour pouvoir évacuer la puissance résiduelle et ne nécessitent pas d'eau d'appoint.

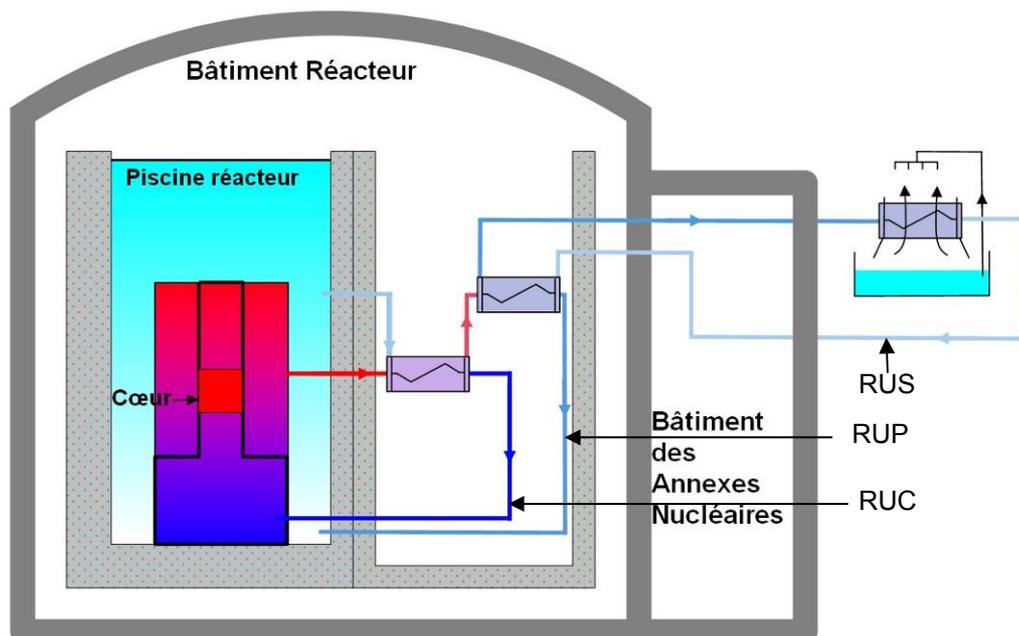


Figure 9 :
Schéma de principe des circuits de refroidissement de secours RUC RUP et RUS (une seule des deux voies est représentée)

1.2.8. Systèmes de refroidissement ultime

Concernant le cœur, en cas de perte du refroidissement normal et de non-démarrage des deux voies de refroidissement de sauvegarde, un refroidissement suffisant peut être assuré au moyen à la fois d'une pompe de brassage située sur une des files primaire puis de l'ouverture des vannes de convection naturelle situées en amont et en aval du cœur.

Concernant les piscines du BUR, en cas de perte de la source froide normale et de non-démarrage des deux voies de refroidissement de sauvegarde, un refroidissement suffisant peut être assuré en configurant le circuit de refroidissement normal de la piscine (circuit REN) pour qu'il soit refroidi à partir d'un réseau d'eau glacée appelé MVO.

1.2.9. Alimentation électrique

Le RJH est alimenté par le réseau 63 kV du centre de Cadarache. La distribution électrique interne est constituée des tableaux haute tension (15 kV) et basse tension (0,4 kV). En cas de perte du réseau, les deux voies de sauvegarde A et B sont réalimentées par deux diesels de sauvegarde indépendants. Sur chaque voie de sauvegarde, une batterie permet de réalimenter les systèmes ultimes de sauvegarde.

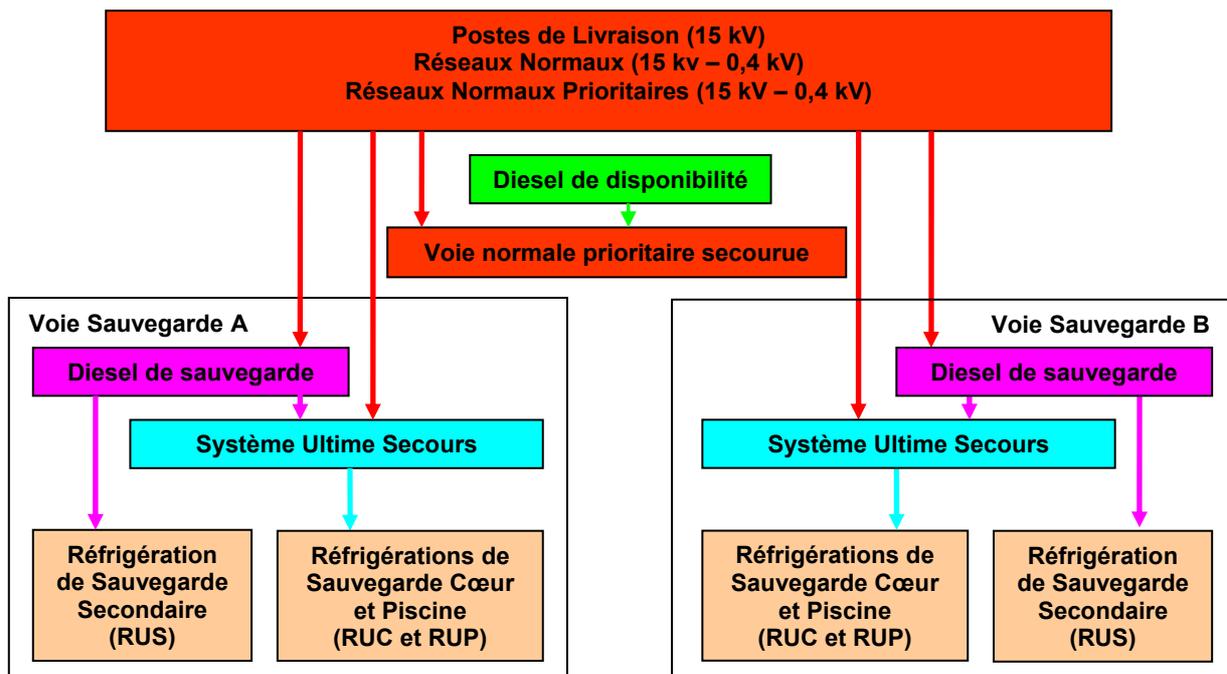


Figure 10 : Architecture simplifiée de la distribution électrique

1.2.10. Contrôle de la réactivité

Le contrôle de la réactivité du cœur est assuré par les différents types d'absorbants de contrôle suivants :

- les absorbants de sauvegarde (ASA). Ils permettent l'arrêt d'urgence (AU) du réacteur,
- les absorbants de pilotage (AP). Ils permettent la régulation de la puissance ainsi que l'arrêt du réacteur, notamment l'arrêt dit « automatique préventif » (AAP),
- les absorbants de compensation. Ils permettent la compensation des variations de réactivité liées notamment à l'usure du cœur, ainsi que le maintien sous-critique du cœur après un arrêt.

1.2.11. Conduite de l'installation

La conduite centralisée de l'installation RJH est réalisée depuis deux lieux principaux de conduite situés dans le BUA :

- La Salle de Conduite de l'Installation (SDCI), pour la conduite dans toutes les situations de fonctionnement de l'installation : normales, incidentelles, accidentelles et post-accidentelles. La conduite à partir de la SDCI concerne l'ensemble des systèmes (réacteur, moyens communs et moyens expérimentaux) nécessitant une conduite centralisée.
- Le Poste de Repli (PDR) est utilisé en cas de perte de la SDCI (indisponibilité fortuite ou indisponibilité pour maintenance). Il permet, avec le concours d'un certain nombre de moyens locaux, la mise et le maintien à l'état sûr de l'installation.

2. Identification des risques d'effet falaise et des structures et équipements essentiels

Introduction

La conception et le dimensionnement des installations nucléaires reposent sur la mise en œuvre de barrières successives et du concept de défense en profondeur. Le CEA a mis en place une démarche de sûreté intégrant ces éléments sur l'ensemble de ses installations nucléaires de base. Cette démarche conduit ainsi à définir des conditions de fonctionnement accidentelles pour lesquelles des dispositions de conception sont mises en place sur les installations. Les agressions internes et externes sont également prises en compte.

Le concept de défense en profondeur est en effet une méthode de raisonnement qui consiste, malgré les mesures prises pour prévenir les dysfonctionnements, les incidents et les accidents, à postuler qu'ils se produisent et à étudier et mettre en œuvre les moyens de les détecter, d'y faire face et d'en limiter les conséquences.

Ce concept est décliné en 4 niveaux de défense successifs :

- Premier niveau : prévention des anomalies et des défaillances (qualité de réalisation, ...);
- Deuxième niveau : surveillance et maintien de l'installation dans le domaine autorisé,
- Troisième niveau : limitation des conséquences des conditions de fonctionnement accidentelles avec la mise en œuvre sur l'installation de dispositifs de sauvegarde ou de sécurité ;
- Quatrième niveau : gestion des séquences accidentelles et dispositions prévues par le plan d'urgence interne (PUI) du site ;

dans lesquels on peut répartir les lignes de défense successives mises en place pour se prémunir de la défaillance des dispositions techniques, humaines ou organisationnelles prévues pour assurer la sûreté de l'installation, ainsi que celles mises en place pour détecter et limiter les conséquences de ces défaillances.

Les conditions de fonctionnement accidentelles étudiées dans le référentiel de sûreté sont définies par un événement initiateur. Les études associées sont menées avec des hypothèses conservatives. Ce conservatisme couvre à la fois les hypothèses liées à l'état initial de l'installation ainsi que les règles d'études du scénario accidentel résultant de l'événement initiateur considéré.

Au titre du 4^{ème} niveau de la défense en profondeur, l'analyse de ces conditions de fonctionnement accidentelles est complétée par l'examen de séquences accidentelles plus complexes, les situations de limitation du risque, qui permettent de couvrir des cumuls de défaillances d'équipements, en particulier la perte de systèmes redondants. Ces séquences sont examinées afin de vérifier la robustesse de la démonstration de la sûreté et ont déjà pu conduire à la mise en place de dispositions spécifiques pour y faire face.

Elles sont complétées par les dispositions prévues par le plan d'urgence interne du centre (PUI) pour gérer les situations de crise.

L'élaboration du plan d'urgence interne repose sur l'identification de types d'accidents susceptibles de conduire à des rejets de matières dangereuses en quantités telles que des mesures de protection s'avèreraient nécessaires. Le PUI a pour objet de prendre en compte des accidents plus graves que ceux considérés dans le dimensionnement des installations. Ils sont déterminés, par exemple, en ajoutant un aggravant aux conditions de fonctionnement accidentelles étudiées dans le rapport de sûreté.

Ces accidents conduisent à la mise en œuvre de l'organisation des secours de façon à limiter les conséquences possibles de l'accident sur les personnes et les biens par des dispositions particulières.

Le CEA a mis en place une organisation de crise pour faire face à ce type de situations accidentelles. Cette organisation est testée périodiquement au cours d'exercices.

Pour les installations le nécessitant, il existe un cinquième niveau de la défense en profondeur qui comprend les mesures de protection des populations prises par les pouvoirs publics, dans le cadre des plans particuliers d'intervention (PPI).

Les évaluations prescrites dans la décision ASN sont qualifiées de complémentaires car elles viennent en complément des analyses déjà réalisées. Ces évaluations complémentaires font

abstraction de la démarche de sûreté mise en place pour la conception et le dimensionnement des installations.

Les évaluations complémentaires demandées exigent de considérer, dans des situations extrêmes, la défaillance cumulée d'un certain nombre d'équipements, même ceux mis place sur l'installation pour faire face à l'événement. L'objectif assigné est d'identifier un éventuel effet falaise et d'évaluer les marges par rapport à cet éventuel effet falaise, sans limitation a priori sur la caractérisation de l'événement ou de l'aléa.

Cette demande de l'ASN conduit donc à faire abstraction, dans les évaluations complémentaires, d'un certain nombre de dispositions conçues et dimensionnées pour empêcher la survenue de certaines situations. L'objectif n'est pas d'examiner de nouvelles situations, il s'agit d'évaluer les marges à disposition au regard d'éventuels risques d'effet falaise.

Un effet falaise se comprend comme une forte discontinuité dans le comportement de l'installation conduisant à une aggravation notable de la situation, notamment en termes de quantités de produits radioactifs ou dangereux mobilisées.

Les risques d'apparition d'effets falaise, identifiés ci-après, nécessitent simultanément les conditions suivantes :

- se produire, si applicable, lors des situations examinées dans ce document, à savoir lors d'un séisme ou d'une inondation au-delà de ceux pris en compte pour le dimensionnement de l'installation, ou lors de pertes postulées d'alimentation électrique et/ou de source froide,
- conduire, si applicable, à des conséquences sur l'environnement significativement supérieures à celles des événements considérés dans le référentiel de sûreté actuel de l'installation, y compris le PUI.

Concrètement, il s'agit d'identifier les risques d'effet falaise qui dans le cadre d'une part des aléas considérés et d'autre part des pertes postulées (pertes alimentations électriques, perte de la source froide et cumul de ces deux pertes) pourraient intervenir par rapport :

- o à une perte de la fonction de refroidissement du cœur,
- o à une perte de la fonction de refroidissement du combustible entreposé à sec ou sous eau,
- o à une perte d'intégrité du confinement, notamment de l'enceinte de confinement,

2.1. Risques d'effet falaise

Considérant l'analyse de sûreté, on identifie les risques de :

- fusion sous eau couplée à une perte du confinement au niveau de l'enceinte de confinement,
- fusion à l'air.

Ils peuvent concerner, selon les cas, les différents objets combustibles de l'installation : éléments combustibles du cœur nourricier et les échantillons combustibles des dispositifs expérimentaux.

La fusion sous eau est envisageable pour les objets combustibles en cours d'irradiation dans le réacteur, dans le cas d'une perte du refroidissement. La fusion sous eau avec maintien de l'intégrité de l'enceinte n'est pas considérée comme un effet falaise, car une situation de ce type est déjà prise en compte dans l'analyse de sûreté.

La fusion à l'air est envisageable dans les piscines du BUR, cœur et réflecteur compris, en cas de dénoyage d'objets combustibles par :

- évaporation de l'eau suite à une perte de refroidissement,
- baisse de niveau d'eau suite à une perte d'étanchéité d'une piscine, de traversées ou de tuyauteries.

Une fusion à l'air ne pourrait pas concerner les dispositifs expérimentaux qui sont hors du cœur et du réflecteur, car la puissance résiduelle des dispositifs baisse très rapidement après l'irradiation. Elle ne

pourrait pas non plus se produire dans le BUA, car le transfert des éléments combustibles dans ce bâtiment n'est autorisé que lorsque leur puissance résiduelle est suffisamment faible pour qu'ils ne risquent plus de fondre même en cas de dénoyage.

L'accident de criticité, exclu dans le référentiel de sûreté, est analysé dans ce document, même s'il ne répond pas aux critères d'identification des risques d'effet falaise présentés plus haut. Un accident de criticité pourrait avoir lieu en cas de perte de la géométrie d'entreposage. Il ne pourrait pas se produire dans une cellule chaude ou dans l'atelier chaud, même en considérant une chute des objets combustibles présents dans ces locaux et des conditions de modération pénalisantes.

Les cas de perte d'intégrité des réservoirs d'entreposage des effluents gazeux ou des cellules chaudes ne sont pas considérés comme des effets falaise, leurs conséquences étant inférieures à celles des effets falaise de type fusion recensés ci-avant.

Etats initiaux

Parmi les états de fonctionnement du cœur indiqués au paragraphe 1.2.5, l'état le plus pénalisant vis-à-vis des situations examinées dans ce document est l'état HP (haute puissance), dans la mesure où il conduit à la puissance résiduelle la plus élevée et où il nécessite un refroidissement par convection forcée.

Les autres états initiaux pénalisants envisageables sont :

- la situation exceptionnelle de maintenance nécessitant la baisse de niveau d'eau en piscine réacteur,
- les manutentions de charges lourdes pour lesquelles l'analyse de sûreté actuelle exclut le cas d'une chute. Ces états initiaux pourraient éventuellement être pénalisants dans le cas d'un séisme au-delà du dimensionnement, puisque les moyens de manutention concernés sont conçus pour éviter une chute de charge en cas de séisme de dimensionnement mais pas nécessairement au-delà. Toutefois, comme indiqué ci-après, les conséquences des situations auxquelles ces chutes pourraient conduire sont couvertes par les autres situations examinées dans la suite du présent document.

Les manutentions visées au paragraphe précédent sont celles :

- d'emballages de transport, lorsqu'elles doivent être effectuées à des hauteurs supérieures à ce que prévoit le dimensionnement des planchers survolés (exemple : transfert d'un emballage du hall camion situé au niveau -1 à la zone arrière des cellules chaudes située au niveau 0). Ces manutentions sont effectuées de manière courante, uniquement dans le BUA et ne survolent jamais les piscines. En cas de chute d'emballage en dehors des piscines sur la dalle du hall camion, le risque de propagation des désordres du génie civil jusqu'à un voile de piscine est faible et limité à la piscine EPI et au canal de transfert. Ceci n'induit pas un risque de dénoyage de combustible entreposé dans les autres piscines. De plus, en prenant l'hypothèse pénalisante d'une propagation de désordres induisant la fissuration d'un voile de la piscine EPI dans le BUA, et en considérant un dommage induit sur le cuvelage de celle-ci, la fuite de piscine générée pourrait être compensée par les systèmes d'appoint d'eau prévus,
- d'éléments situés au-dessus du cœur du réacteur, à savoir le couvercle du caisson et les internes supérieurs. Ces éléments pèsent jusqu'à 1,5 tonne. Lors de leur manutention, effectuée chaque mois durant l'inter-cycle, ces éléments survolent le cœur et le platelage de la piscine. Néanmoins, pendant ces manutentions, le cœur reste protégé par le casier et les structures situées au-dessus. De plus, le couvercle est d'un diamètre supérieur (950 mm) à celui du caisson (716 mm). Une chute au droit du platelage pourrait conduire à une légère fuite, compensable par les systèmes d'appoint d'eau ou récupérée dans la crypte,
- d'équipements lourds (exemple : pompe primaire). Ces manutentions seront effectuées de manière exceptionnelle. Elles feront l'objet de dossiers de sûreté et de dispositions spécifiques (réacteur à l'arrêt, ...).

Conséquences radiologiques

La situation accidentelle hypothétique enveloppe prise en compte dans l'analyse de sûreté actuelle de l'installation est un accident de réactivité à caractère explosif appelé BORAX. Dans les études de conséquences radiologiques, cet accident est supposé conduire notamment à une fusion sous eau du cœur du réacteur, avec un isolement complet et immédiat de l'enceinte de confinement pendant

12 heures. Au niveau des premières habitations (4 km), cet accident entraînerait, en termes de dose intégrée sur une semaine du fait de l'inhalation et de l'irradiation externe due au nuage et aux dépôts, une dose efficace et une dose équivalente à la thyroïde nettement inférieure aux niveaux d'intervention définis dans l'article R1333-80 du code de la santé publique. La dose efficace serait en grande partie due aux gaz rares ; les gaz rares en question seraient essentiellement issus des fuites collectées dans la zone de reprise des fuites pendant les 12 heures qui suivraient l'accident.

2.2. Structures et équipements essentiels

L'occurrence d'un effet falaise est généralement prévenue par plusieurs dispositions qui sont chacune suffisantes pour éviter cette occurrence. Dans les sous-paragraphes suivants, les dispositions mises en œuvre pour éviter un effet falaise ne sont donc pas à comprendre au sens de dispositions qui sont toutes indispensables simultanément. En fin de chaque sous-paragraphe seront identifiés les équipements qui apparaissent essentiels à la prévention des effets falaise. Les autres dispositions (non retenues comme équipements essentiels) permettent d'annuler, retarder ou minimiser les conséquences de l'effet falaise.

2.2.1. Fusion sous eau couplée à une perte du confinement au niveau l'enceinte de confinement

On examine ci-après le risque de fusion sous eau par perte de refroidissement des objets combustibles en cours d'irradiation dans le réacteur.

De manière liminaire, il convient de rappeler que le système de protection d'un réacteur expérimental est conçu pour provoquer un arrêt automatique et instantané du réacteur en cas de perte de refroidissement. Il convient également de rappeler que, sur un réacteur expérimental, par conception, une fois le réacteur mis à l'arrêt, la mise en communication du cœur du réacteur avec l'eau de la piscine fournit un moyen de refroidissement très efficace ; il ne suffit plus alors que de pouvoir périodiquement dans le temps, extraire la puissance thermique de la piscine afin d'éviter à terme une montée en température trop importante de l'eau de la piscine.

Les dispositions préventives pour éviter une perte du refroidissement des éléments combustibles du cœur sont les suivants :

- en cas de perte du refroidissement normal du cœur, le contrôle-commande déclenche un arrêt d'urgence (AU) du réacteur et un démarrage des deux voies des circuits de refroidissement de sauvegarde RUC et RUP,
- l'AU et les circuits RUC et RUP répondent au critère de défaillance unique, en ce sens que la perte d'un composant d'un de ces systèmes ne remet pas en cause la fonctionnalité du système. Par exemple, l'AU peut se produire et assure un apport d'antiréactivité suffisant à l'arrêt du réacteur même si un absorbant de contrôle reste bloqué, et un refroidissement suffisant est assuré même si une voie d'un des circuits RUC ou RUP ne démarre pas,
- l'ordre de démarrage des circuits RUC et RUP s'accompagne de l'ordre de démarrage de la pompe de brassage du circuit primaire. Dans le cas d'un non-démarrage des deux voies du circuit de sauvegarde RUC, cette pompe permet d'assurer un refroidissement suffisant. Dans une telle situation, on procède au bout de 20 minutes à l'ouverture de deux vannes de convection naturelle placées en amont et en aval du cœur et qui permettent de transférer la puissance résiduelle vers la piscine réacteur ; la pompe de brassage est mise à l'arrêt une heure plus tard ; 1 heure et 20 minutes après l'arrêt du réacteur, les vannes de convection naturelle suffisent pour assurer le refroidissement du cœur.

Concernant les dispositifs expérimentaux présents dans le cœur ou dans le réflecteur, ainsi que les dispositifs d'irradiation des cibles mises en œuvre pour la production de radio-isotopes à usage médical présents dans le réflecteur, le refroidissement est assuré par des boucles spécifiques. Le contrôle-commande des dispositifs peut si nécessaire déclencher un arrêt d'urgence du réacteur. D'une manière générale, les dispositifs et tous leurs éléments extérieurs qui peuvent avoir une incidence sur la sûreté présentent un niveau de sûreté et de qualité équivalent, selon le risque qu'ils présentent, à celui des composants du réacteur.

Dans le cas d'une fusion sous eau avec dissémination de matières radioactives dans l'enceinte de confinement, des capteurs radiologiques disposés dans l'enceinte déclenchent, sur seuil haut, un isolement automatique total de l'enceinte et un démarrage de la ventilation appelée « accidentelle » de la ZRF. L'isolement total de l'enceinte peut également être déclenché manuellement. Il comprend notamment la fermeture des vannes d'isolement de la ventilation de l'enceinte et la fermeture de l'ensemble des circuits non nécessaires à la gestion post-accidentelle. La ventilation accidentelle de la ZRF comprend à l'extraction un étage de filtres Très Haute Efficacité (THE) et un étage de pièges à iodes. Elle comprend également un piquage dans l'enceinte, utilisé pour dépressuriser l'enceinte lorsqu'il est décidé de mettre fin à son isolement total. Les caractéristiques de l'enceinte de confinement en termes de tenue au séisme et de comportement en cas de surpression sont indiquées aux paragraphes 3.1.2 et 7.1.3.

Le tableau suivant présente l'alimentation électrique des équipements précités en cas de perte de l'alimentation électrique externe.

Equipement	Alimentation en cas de perte de l'alimentation électrique externe
Contrôle-commande classé du réacteur	Batteries des réseaux CIQ 1, 2 et 3 et CIC A et B dans le BUA puis diesels des bâtiments BAS A et B
Circuits RUC A et RUP A (respectivement B)	Batteries SUS A puis diesel du bâtiment BAS A (respectivement B)
Pompe de brassage	Batteries SUS B (bâtiment BAS B)
Vannes de convection naturelle	Batteries SUS A puis diesel du bâtiment BAS A
Capteurs radiologiques pour isolement automatique de l'enceinte	Batteries des réseaux CIC A et B dans le BUA puis les diesels des bâtiments BAS A et B
Vannes associées à l'isolement total de l'enceinte	Selon les vannes, diesel du bâtiment BAS A ou diesel du bâtiment BAS B. En cas de perte totale de l'alimentation électrique, les vannes restent dans leur position. N.B. : Les réseaux d'extraction de la ventilation des zones contrôlées du BUR ont des vannes d'isolement électro-pneumatiques, munies d'une réserve propre d'air comprimé, et à fermeture sur pression insuffisante d'air comprimé.
Vannes associées à la ventilation accidentelle de la ZRF permettant le dégonflage de l'enceinte	Diesel du bâtiment BAS B
Ventilation accidentelle de la ZRF	Diesel du bâtiment BAS B

Parmi les dispositions précédentes, les équipements essentiels identifiés à ce stade de l'analyse sont les suivants :

- l'arrêt d'urgence,
- la pompe de brassage,
- les vannes de convection naturelle,
- les batteries SUS.

Il n'est pas identifié d'agresseur susceptible d'affecter simultanément plusieurs équipements essentiels et de conduire ainsi à l'effet falaise objet de ce paragraphe. En particulier, si un séisme induisait une vague en piscine plus importante que prévu, la pompe de brassage resterait protégée compte tenu d'une part de l'étanchéité relative de la casemate par rapport au hall et d'autre part de son implantation surélevée au-dessus du plancher de la casemate ; les coffrets de commande locale des vannes de convection naturelle, disposés plusieurs mètres au-dessus du plancher du hall, resteraient également hors d'eau.

2.2.2. Fusion à l'air

Il s'agit ici d'examiner le risque, en tant qu'effet falaise d'une fusion à l'air dans les piscines du BUR, cœur et réflecteur compris, par risque de dénoyage d'objets combustibles (à l'exception des dispositifs expérimentaux qui sont hors du cœur et du réflecteur). Celui-ci résulterait de :

- évaporation très importante et prolongée de l'eau suite à une perte de refroidissement,
- baisse extrême et non compensée de niveau d'eau suite à une perte d'étanchéité d'une piscine, de traversées ou de tuyauteries.

Il convient de noter que ces situations de mise en air sont normalement exclues par la conception de l'installation dont les dispositions de base ont pour finalité un maintien sous eau des objets combustibles irradiés (hors du cas des opérations en cellules chaudes). De ce fait, les piscines et leurs dispositions d'étanchéité sont des éléments clefs de la prévention du dénoyage.

Les dispositions préventives pour éviter une fusion à l'air suite à une perte du refroidissement des piscines du BUR, sont les suivantes :

- en cas de perte du refroidissement normal des piscines, le contrôle-commande du réacteur déclenche un arrêt d'urgence (AU) du réacteur et un démarrage des circuits de refroidissement de sauvegarde RUP (A et B). La puissance reçue par ces circuits est évacuée par les circuits RUS (A et B) refroidis par des aéroréfrigérants et mis en service manuellement peu après le démarrage des circuits RUP,
- l'AU et les circuits RUP et RUS répondent au critère de défaillance unique, présenté au paragraphe précédent,
- en cas de non-démarrage des circuits RUP et RUS, la température prise en compte pour le dimensionnement du cuvelage des piscines du BUR, à savoir 70°C, n'est pas atteinte avant 30 heures. Si la perte du refroidissement normal est due à une perte de la source froide normale, il est possible de configurer le circuit de refroidissement normal de la piscine REE (circuit REN), pour qu'il soit refroidi à partir d'un circuit d'eau glacée appelé MVO,
- les piscines disposent de circuits de réalimentation en eau. Un de ces circuits, appelé REW et qui serait utilisé en situation ultime, permet d'alimenter la piscine réacteur depuis l'extérieur de l'UN, par un moyen mobile et un raccord pompier. La piscine réacteur est reliée à la piscine intermédiaire par un canal de transfert,
- en l'absence d'appoint d'eau, l'évaporation de l'eau par la puissance résiduelle des éléments entreposés ne conduirait pas à un dénoyage des éléments combustible avant 35 jours.

Chaque aéroréfrigérant des circuits RUS dispose d'une réserve d'eau de 30 m³; à l'issue de la consommation de cette réserve, le faible niveau de puissance à évacuer permet de passer l'aéroréfrigérant en mode sec et d'évacuer la puissance résiduelle.

Le tableau suivant présente l'alimentation électrique des équipements précités en cas de perte de l'alimentation électrique externe.

Equipement	Alimentation en cas de perte de l'alimentation électrique externe
Contrôle-commande classé du réacteur	Batteries des réseaux CIQ 1, 2 et 3 et CIC A et B dans le BUA puis diesels des bâtiments BAS A et B
Circuits RUC A et RUP A (respectivement B)	Batteries SUS A puis diesel du bâtiment BAS A (respectivement B)
Circuits RUS A (respectivement B)	Diesel du bâtiment BAS A (respectivement B)
Circuits REN et MVO	Par diesel mobile, si le fonctionnement est requis
Vanne d'appoint d'eau externe du circuit REW	Diesel du bâtiment BAS A

Les dispositions préventives pour éviter une fusion à l'air suite à une perte d'étanchéité au niveau des piscines du BUR sont les suivantes :

- la partie fissile des objets combustibles est intégralement sous le niveau -9,00 m pour le cœur et les objets en cours d'irradiation et sous -7,3 m pour les éléments combustibles entreposés dans la piscine REE. Le niveau d'eau des piscines est au dessus de - 300 mm en situation courante,
- le plancher du canal reliant les piscines RER et REE est au niveau – 6,50 m,
- les traversées des piscines RER et REE qui ne donnent pas dans des casemates du bloc-eau sont toutes situées au dessus du niveau -4,50 m. L'aménagement des casemates du bloc-eau (volume et étanchéité de chaque casemate par rapport à des locaux adjacents) est tel que le niveau d'eau en piscine réacteur resterait supérieur à – 8,00 m dans les cas suivants : brèche sur des files de refroidissement primaire dans deux casemates différentes, ou perte d'étanchéité d'une traversée de piscine qui ne donne pas dans une casemate du bloc-eau et brèche dans une casemate.

Parmi les dispositions précédentes, les équipements essentiels identifiés à ce stade de l'analyse sont les suivants :

- l'arrêt d'urgence,
- les piscines et leurs dispositions d'étanchéité.

Les agresseurs potentiels de ces éléments essentiels, en cas de séisme au-delà du dimensionnement, sont :

- le génie civil de l'enceinte de confinement,
- le pont polaire (RMP), la passerelle principale des piscines du BUR (RMT) et la passerelle polaire en piscine réacteur (RMD). Ces équipements pourraient, en cas d'effondrement, agresser les piscines du BUR et dégrader leur étanchéité.

2.2.3. Accident de criticité

Il s'agit ici d'examiner le risque d'un accident de criticité au niveau des entreposages.

Risque de perte de géométrie d'entreposage

Les équipements essentiels pour éviter un accident de criticité par perte de la géométrie d'entreposage sont l'ensemble des racks et armoires d'entreposage d'objets combustibles qui sont dans les piscines du BUR et du BUA et dans les magasins d'entreposage à sec.

Les agresseurs potentiels de ces éléments essentiels, en cas de séisme au-delà du dimensionnement, sont :

- le génie civil de l'UN,
- les ponts et passerelles de l'UN situés au dessus des entreposages, qui en cas d'effondrement, pourraient modifier les géométries d'entreposage.

2.2.4. Fonctions automatiques du contrôle-commande classé de sûreté

Le tableau suivant présente, pour un état initial de fonctionnement du réacteur en HP, les fonctions automatiques du contrôle-commande classé qui sont associées aux scénarios de manque de tension, de perte de la source froide et de séisme.

Scénario	Détections de l'évènement	Fonctions déclenchées
Séisme	<ul style="list-style-type: none"> Détection sismique dans BAS A, BAS B et l'UN 	Arrêt automatique du réacteur par chute des absorbants de pilotage (AP). Arrêt d'urgence manuel par l'opérateur en cas de séisme confirmé.
Manque De Tension	<ul style="list-style-type: none"> Vitesses pompes primaires insuffisantes Delta P cœur insuffisant 	AU - Arrêt réacteur par chute des absorbants de sauvegarde (ASA)
	<ul style="list-style-type: none"> Vitesses pompes primaires insuffisantes Delta P cœur insuffisant 	Démarrage de la réfrigération de sauvegarde RUC-RUP
	<ul style="list-style-type: none"> Manque présence tension sur réseau 	Démarrage diesels de sauvegarde
Perte de Réfrigération en cœur	<ul style="list-style-type: none"> Température élevée en entrée cœur 	AU - Arrêt réacteur par chute des absorbants de sauvegarde
	<ul style="list-style-type: none"> Température élevée en entrée cœur 	Arrêt des pompes primaires

Le tableau présente, pour un état initial de fonctionnement du réacteur en HP, les fonctions automatiques des différents systèmes de contrôle-commande qui sont associées aux scénarios de séisme, de manque de tension et de perte de la réfrigération en cœur.

3. **Séisme**

3.1. **Dimensionnement de l'installation**

3.1.1. **Séisme de dimensionnement**

* **Caractéristiques du séisme**

Les séismes considérés pour les différents ouvrages sont les suivants :

- ✓ Bâtiment Unité Nucléaire + BAS + BAG :
 - SMS Cadarache (RFS 2001-01)
 - Paléoséisme (RFS 2001-01)
 - L'enveloppe des deux spectres est nommée SDD (Spectre De Dimensionnement)
- ✓ Pour l'UN, le paléoséisme est le séisme le plus pénalisant en horizontal (0.7 Hz) et le SMS est le séisme le plus pénalisant en vertical (10 Hz)
- ✓ Bâtiment BAV :
 - Le BAV est agresseur potentiel de l'UN
 - Spectre EC8 enveloppe du SDD. Application d'un coefficient de comportement de 1,5.
- ✓ Bâtiment BMR :
 - Le BMR est un ouvrage ne participant pas à la démonstration de sûreté, toutefois il participe par son intégrité à la bonne évacuation de l'eau en cas de fuite du circuit tertiaire.
 - Spectre PS92 (zone de sismicité II – ouvrage classe C). L'accélération à période nulle du spectre élastique est donc de 0,75g, ce qui enveloppe globalement le SDD (très légèrement inférieur vers 6 Hz mais très largement supérieur après 15 Hz. Le coefficient de comportement retenu est de 1,4.

Aléa sismique du Centre de Cadarache, généralités

Méthodologie pour évaluer le séisme de dimensionnement

Consécutivement à la création en 1973 du Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires (SCSIN), une méthode spécifique aux INB de prise en compte de l'aléa sismique a été mise au point et formalisée en 1974 dans le document DSN 50, qui est resté le document de référence en matière de prise en compte du séisme pour la sûreté des INB pendant des années. Cette méthode conduit à définir un Séisme Maximal Historiquement Vraisemblable (SMHV) et un Séisme Majoré de Sécurité (SMS). Un des premiers cas où cette approche a été employée a concerné le site de Cadarache (le réacteur PHEBUS). La prise en compte de l'aléa sismique a été étendue à d'autres sites puis est devenue systématique à la fin des années 1980. La méthode (déterministe) a inspiré la rédaction de la première RFS sur ce thème qui a été publiée en 1981 (d'abord applicable au REP puis généralisée aux autres types d'INB). Elle a été révisée en 2001, en ajoutant des prescriptions nouvelles notamment liées à la prise en compte de paléoséismes, séismes très anciens « supposés » qui sont identifiés, contrairement aux séismes historiques ou instrumentaux, à partir d'observations de terrain en l'absence de toute trace de témoignage humain.

De par sa construction, la méthode strictement déterministe préconisée dans la RFS 2001-01 précitée permet de dégager des marges quant à la sélection des événements de référence, SMHV et SMS :

- déplacement « postulé » des événements historiques pour les ramener au plus près du site (qu'ils soient ou non rattachés à une faille identifiée),
- application d'une majoration de 0,5 sur la magnitude ou de 1 en intensité de cet événement,
- pas de prise en compte de la « période de retour des séismes » qui induit de fait une marge dans les zones de faible et moyenne sismicité.

Caractérisation de l'aléa sismique à Cadarache et évolution

Historique

Dès les premières années d'existence du centre, un observatoire sismique a été créé et les réacteurs construits sur le centre devaient être conçus en tenant compte du risque sismique. Ce risque a été considéré dès la conception des INB en s'appuyant sur les recommandations AS 55 de 1955 (établies suite au séisme d'El Asnam en Algérie de 1954), puis sur les règles parasismiques de 1962 (PS62/64) et enfin celles de 1969 (PS69).

Un des premiers cas d'emploi de la démarche formalisée dans la RFS 81 a concerné le réacteur PHEBUS. L'intensité du SMHV a été fixée à VIII et celle du SMS à IX MSK. En parallèle, une esquisse de la carte sismotectonique de la Provence centrée sur le centre de Cadarache a été réalisée en 1974. Pour déterminer le SMHV, on avait pris en compte les séismes les plus forts identifiés dans un rayon de 40 km autour du site, ce qui conduisait à un spectre avec un PGA^1 correspondant à une intensité VIII, calé à 0,225g (magnitude évaluée entre 5 et 5,7 pour une profondeur variant de quelques à 10 km). Pour le SMS correspondant à une intensité IX, le spectre du séisme "proche" était forfaitairement calé à 0,45 g.

La réévaluation sismique produite conjointement à la parution de la RFS 2001-01 a conduit à retenir :

- deux couples magnitude / distance pour le SMHV,
 - M=5,3 et R= 7.1 km (séisme « proche »), correspondant au séisme de Manosque de 1708, translaté le long de la Faille de la Moyenne Durance jusqu'à la position la plus pénalisante pour le Centre de Cadarache ;
 - M=6.0 et R=16.5 km (séisme « lointain »), correspondant au séisme de Lambesc de 1909, survenu sur la faille de la Trevasse, mais positionné de manière plus pénalisante pour le Centre de Cadarache sur le Chevauchement du Lubéron ;
- deux couples magnitude / distance pour le SMS :
 - M=5,8 et R=7 km (majoration du séisme de Manosque 1708 translaté sur la faille de la Moyenne Durance)
 - M=6,5 et R=16.5 km (majoration du séisme de Lambesc 1909 translaté sur le Chevauchement du Lubéron)
- pour le paléoséisme, le couple magnitude / distance M=7 et R=18,5 km.

Afin de comparer ces séismes de référence à la notion de PGA, notons que pour le niveau « SMHV », c'est le séisme de Manosque translaté qui est le plus pénalisant et qui produit les valeurs suivantes :

- 0,24 g pour la condition de sol « sédiment »,
- 0,22 g pour la condition de sol « rocher » ;

pour le l'enveloppe des SMS et paléoséisme, référence utilisée pour le dimensionnement des installations neuves et les réexamens de sûreté :

- 0,34 g pour la condition de sol « sédiment »,
- 0,31 g pour la condition de sol « rocher ».

C'est toutefois l'intégralité des spectres de réponses qu'il convient de considérer. La Figure 11 présente ces différents spectres. On notera que pour les hautes fréquences, c'est le « SMS » qui est le plus pénalisant alors qu'à basse fréquence, c'est le paléoséisme. A noter que pour les niveaux sismiques à prendre en compte pour le dimensionnement des installations, le séisme de Lambesc positionné sur le Chevauchement du Lubéron n'a pas d'incidence sur le spectre finalement retenu.

¹ PGA = Peak Ground Acceleration, il s'agit de l'accélération maximale du sol et correspond également à la valeur à haute fréquence des spectres de réponse. Cette notion est souvent utilisée pour « caler » les spectres de réponse.

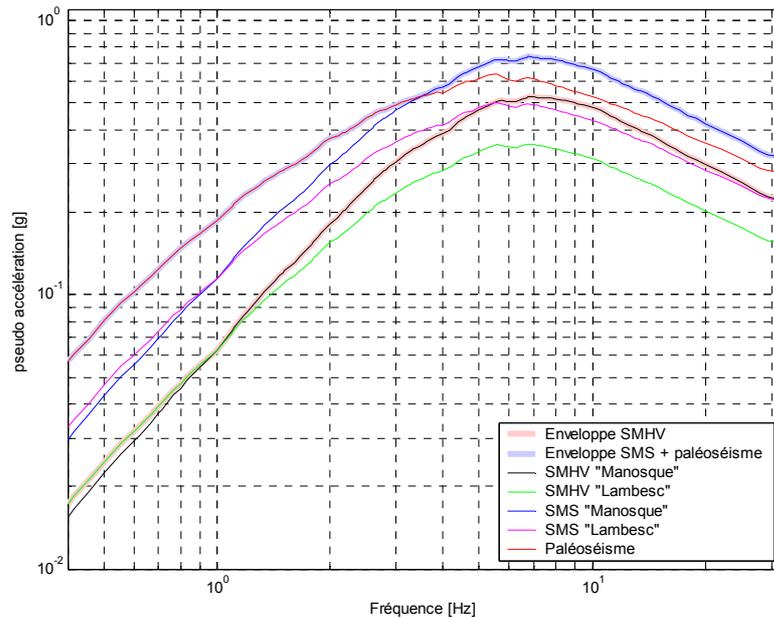


Figure 11 : Spectres de réponse (condition de site « rocher » à 5% d'amortissement) du référentiel « aléa sismique » du Centre de Cadarache au 30 juin 2011.

Le cas particulier de la détermination de la magnitude et de la distance retenues pour le paléoséisme

La RFS 2001-01 impose de prendre en compte d'éventuels « paléoséismes ». Un paléoséisme est un événement sismique survenu dans un intervalle de temps de quelques dizaines de milliers d'années, au delà de la période d'observation dite « historique » (environ 1000 ans), et qui a laissé des traces dans les formations géologiques les plus récentes (indice « paléosismique »). L'établissement du paléoséisme de référence pour un site donné est donc sujet aux découvertes de tels indices paléosismiques. Dans l'optique de proposer un aléa sismique « stable », l'approche suivie consistait à définir un paléoséisme « enveloppe ».

La magnitude fixée pour le paléoséisme de Cadarache a ainsi été établie selon l'état des connaissances de la fin des années 1990. A cette époque, compte tenu de l'état de l'art, on ne disposait pas d'éléments suffisants pour connaître la géométrie de la Faille de la Moyenne Durance en profondeur. On ne pouvait exclure que cette faille puisse se prolonger dans le « socle » et l'hypothèse pénalisante d'une rupture sur toute sa longueur avait été retenue, aboutissant à une magnitude de 7 (nous reviendrons sur ce point plus bas).

La distance focale à retenir pour le paléoséisme a été définie sur des bases probabilistes. L'intensité IX a été calculée comme étant représentative du niveau « paléoséisme » conformément à l'esprit de la RFS 2001-01. La distance focale de 18,5 km correspond à la distance au site d'un séisme qui provoquerait une intensité IX pour un séisme de magnitude 7. Cette approche intégrait également implicitement le fait que la relation d'atténuation² associée à la RFS 2001-01 ne permet pas de caractériser l'effet de « saturation » de l'accélération à mesure que l'on s'approche du plan de rupture (en deçà d'une certaine distance à la faille, l'accélération n'augmente plus), effet pris en compte dans des relations d'atténuation plus complètes.

Les marges sur la détermination de l'aléa selon les INB de Cadarache considérées

² Une relation d'atténuation (ou loi d'atténuation ou GMPE en Anglais pour « Ground Motion Prediction Equation ») est une relation mathématique qui permet de relier un certain nombre de paramètres liés à la source sismique et la distance au site à un paramètre de nocivité donnée. Dans le cadre de la relation d'atténuation de la RFS, on relie distance et magnitude à l'accélération spectrale (spectres de réponses) pour deux conditions de sites différents (« sédiments » et « rocher »).

Comme nous l'avons vu, la démarche déterministe de la RFS 2001-01 permet de dégager des conservatismes (déplacement des séismes au plus proche des sites, majoration de magnitude). Toutefois, selon les installations considérées, des marges supplémentaires peuvent être commentées. Distances réelle des INB par rapport à la faille de la Moyenne Durance

En 2001, il avait été choisi de définir un aléa sismique « unique » pour l'ensemble du Centre de Cadarache (à l'exception près de la prise en compte des conditions de site « rocher » et « sédiments »). De ce fait, c'étaient les distances minimales des failles à la clôture du Centre qui avait été retenues. Compte tenu que la source la plus forte de l'aléa sismique se trouve être la faille de la Moyenne Durance, que cette dernière est proche du Centre (distance minimale en surface d'un peu plus de 5 km par rapport à la porte d'entrée du Centre) et que le Centre de Cadarache présente de grandes dimensions (plus de 5 km dans sa plus grande dimension), les marges dégagées par les INB situées dans la zone Sud-Est du Centre sont non-négligeables.

A titre d'exemple, pour le SMS, considérant une profondeur focale de 5 km (profondeur retenue pour l'évaluation de 2001), nous avons les distances focales suivantes pour ces différents sites :

- porte d'entrée : distance épacentrale ~5 km, distance focale : 7,1 km ;
- ATPu : distance épacentrale ~7 km, distance focale : 8,6 km ;
- zone RJH-Masurca : distance épacentrale ~9 km, distance focale : 10,3 km ;

La Figure 12 présente les différents spectres associés et permet d'illustrer le fait que certaines INB disposent de marges supplémentaires du fait de leur positionnement.

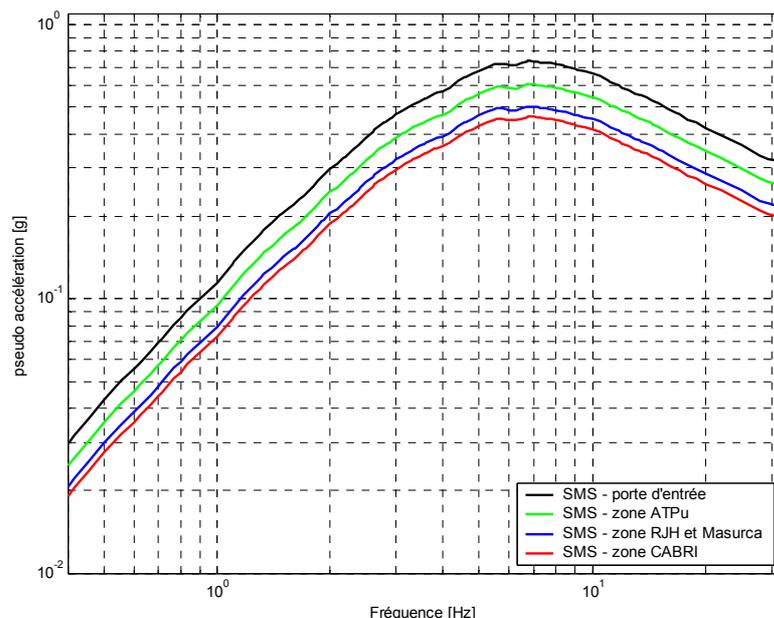


Figure 12 : Illustration de la marge disponible sur le SMS de par la distance réelle de différents INB à la faille de la Moyenne Durance (spectres de réponse avec condition de site « rocher » à 5% d'amortissement).

Paléoséisme

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la magnitude fixée pour le paléoséisme de Cadarache a été établie selon l'état des connaissances à la fin des années 1990 et la magnitude avait alors été fixée à 7 en considérant des hypothèses enveloppes sur la géométrie de la faille qu'on ne connaissait que mal en profondeur. Aujourd'hui, grâce aux travaux sur la segmentation de cette faille en surface, sur sa géométrie en profondeur, sur l'analyse de la microsismicité de la zone, on sait qu'il y a un découplage tectonique entre la couverture sédimentaire et le socle et que la Faille de la Moyenne Durance, active en surface, ne peut se prolonger dans le socle, ce qui limite son potentiel sismogénique maximal à une magnitude comprise entre 6.0 et 6.5. Conjointement, la distance focale, considérée en 2001 selon une démarche probabiliste, doit également être revue à la baisse et être

établie selon une base déterministe. Cette diminution de distance limitant ainsi le « gain » qu'implique la baisse de magnitude.

La Figure 13 présente le spectre de ce que pourrait être un paléoséisme établi avec l'état de l'art actuel ($M=6,4$ et $R=12$ km) en comparaison avec le paléoséisme actuellement retenu. On constate qu'à basses fréquences, le « possible paléoséisme état de l'art 2011 » est significativement inférieur (effet de la diminution de magnitude). A l'inverse, à hautes fréquences, il est supérieur au paléoséisme « 2001 » (effet de la diminution de distance). Toutefois, cette augmentation à haute fréquence n'a pas d'incidence puisque dans cette bande fréquentielle, c'est toujours de le SMS qui reste enveloppe (les distances retenues ici s'entendent pour la porte d'entrée du Centre).

La magnitude de 7 aujourd'hui encore retenue pour le paléoséisme, influant fortement sur les niveaux d'accélération à prendre en compte à basse fréquence, peut donc être considérée comme d'un niveau prenant en compte des événements au delà de la réglementation en cours. Ce caractère enveloppe va concerner les installations dans les modes propres correspondant à de basses fréquences, comme c'est le cas pour les installations construites sur appuis parasismiques comme le RJH.

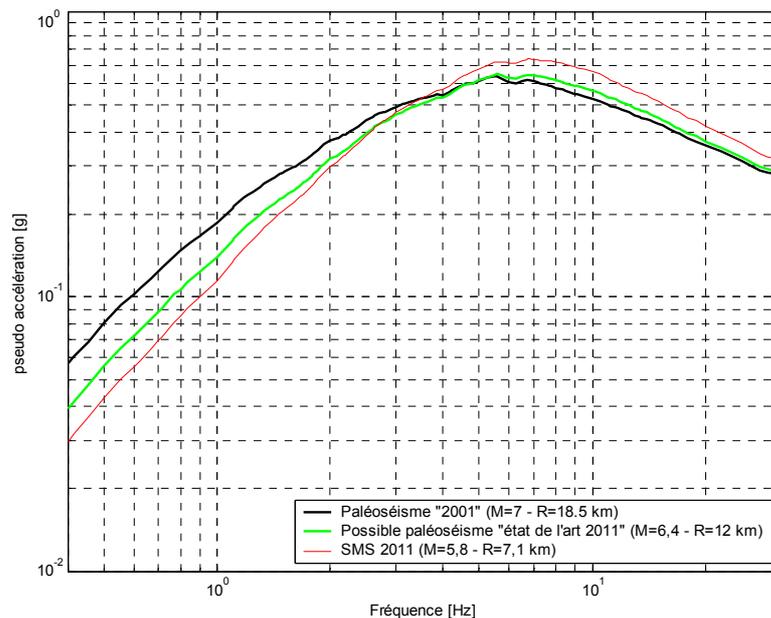


Figure 13 : Illustration de la marge disponible de par la détermination particulièrement pénalisante de la magnitude du paléoséisme en 2001 (spectres de réponse avec condition de site « rocher » à 5% d'amortissement).

Marges relatives aux installations construites sur du calcaire à Cadarache

La géologie du Centre de Cadarache est complexe. Schématiquement, le Centre consiste en deux grandes « paléovallées » correspondant au premier ordre aux vallées actuelles (ravin de la Bête encore appelé « vallée de piles » et le vallon de Mourre-Frais). Ces paléovallées ont été creusées à l'ère tertiaire, puis partiellement comblées de sédiments Miocènes et Quaternaires. Ces paléovallées se sont formées en creusant dans le « substratum » : des calcaires formés au Crétacé (fin de l'ère secondaire). Les calcaires du Crétacé sont très durs. A l'inverse, les matériaux de comblement des paléovallées (Miocène, Quaternaire), bien que présentant globalement de bonne qualité géotechnique, sont moins « rigides » que l'encaissant.

Selon la réglementation, les INB construites sur les formations mio-quaternaires doivent utiliser, selon le cas, soit les spectres dits « sédiments » soit les spectres dits « rocher » (le cas échéant, en examinant le possible phénomène d'effet de site particulier), et les INB construites sur les calcaires du Crétacé, doivent utiliser les spectres dits « rocher ».

Les spectres dits « sédiments » s'appliquent aux installations dont le paramètre « Vs30 » (moyenne harmonique des vitesses de propagation des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres sous l'assise de l'installation) est compris entre 300 et 800 m/s. Les spectres dits « rochers » s'appliquent aux installations dont le paramètre Vs30 est supérieur à 800 m/s.

Il est aujourd'hui établi que les spectres réglementaires issues de la RFS dits « rocher » sont plutôt caractéristiques de rochers « standard » présentant des Vs30 de l'ordre 600 à 800 m/s. Or, les INB

péreennes ou en projet du site de Cadarache, dont RJH et MASURCA concernées par la première série de stress tests, sont construites sur du calcaire crétacé très rigide, caractérisé par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement (V_s) supérieures à 2000 m/s. Ce contexte est très favorable. On sait en effet que les spectres réglementaires contiennent donc une certaine « provision de marges ». En considérant le différentiel d'impédance acoustique (sans même invoquer les effets de sites causés par des contrastes forts), la marge obtenue pourrait atteindre un facteur 2, en termes d'accélération, selon les fréquences³.

La quantification de cette « marge » est un sujet important de la R&D actuellement menée (programmes de recherche sur l'aléa sismique Cashima et Sigma, impliquant EdF, le CEA, AREVA, l'ILL, Enel Energy). Nous considérons qu'une marge de 1,5 est une valeur minimale pertinente. La Figure 14 présente les spectres corrigés de cette marge (spectres « rochers très rigides » et non plus « rochers standard »). La variation en fréquence appliquée ici à cette correction suit celle déterminée en utilisant la méthode de correction dite « quart d'onde » utilisant des profils de vitesses génériques, mais la valeur de correction maximale est limitée à 1,5.

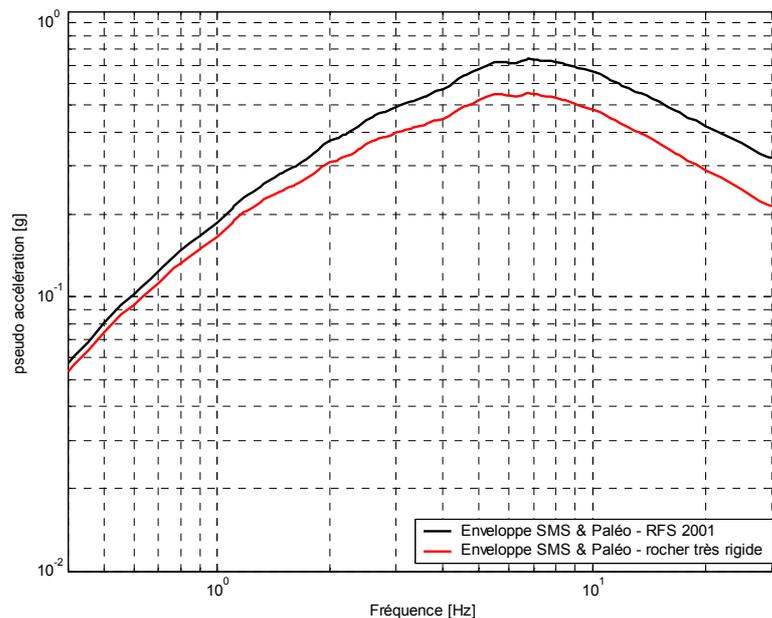


Figure 14 : Illustration de la marge disponible pour les INB construites sur du calcaire crétacé (correction rocher « très rigide » par rapport à un rocher « standard »). Enveloppe SMS + Paléoséisme - spectres de réponse avec condition de site « rocher » à 5% d'amortissement.

La Figure 15 présente l'effet du cumul des marges, elle montre :

- l'enveloppe des SMS et du paléoséisme aujourd'hui retenue,
- l'enveloppe des spectres pour un paléoséisme correspondant à l'état de l'art actuel » et du SMS, dans les deux cas en prenant en compte la distance exacte ;
- l'enveloppe précédente à laquelle on a appliqué une correction « rocher très rigide ».

Cette figure n'a pour objet que d'illustrer que la réglementation et son application, notamment à Cadarache, peut présenter des conservatismes qui vont bien au delà la majoration SMHV-SMS ou

³ Sans rentrer dans les détails techniques, notons également que la correction d'impédance doit s'accompagner d'une correction liée à l'atténuation à haute fréquence des mouvements sismiques, atténuation qui est a priori moindre dans les rochers très rigides que dans les rochers « standards ». Cette correction se fait via un paramètre nommé « kappa ». Si la correction d'impédance a tendance à diminuer les accélérations depuis les fréquences intermédiaires jusqu'aux très hautes fréquences, la correction du paramètre « kappa » a pour effet de ré-amplifier les hautes et très hautes fréquences du spectre. Toutefois, sur Cadarache, les premières estimations du paramètre « kappa » ont démontré une atténuation à haute fréquence relativement forte, même dans les calcaires rigides. Ce fait s'explique probablement, par la forte fracturation à grande échelle des formations secondaires en Provence Orientale, fracturation engendrée par les multiples phases tectoniques qui ont jalonné l'histoire géologique au cours de l'ère Tertiaire. Cette atténuation à haute fréquence est favorable.

bien la translation des séismes. Ces conservatismes ne portent toutefois pas sur l'ensemble des INB. En effet, une INB située à proximité de la porte d'entrée, construite sur des sédiments mio-quaternaires et présentant une conception « rigide » (premiers modes de vibration plutôt à hautes fréquences) ne disposerait pas de ces marges, compte tenu, respectivement :

- d'une distance réelle à la faille de le Moyenne Durance correspondant à celle du SMS réglementaire actuel,
- de caractéristiques géologiques locales ne permettant pas d'appliquer une correction « rocher très rigide »,
- de fréquence de résonance dans une bande de fréquence qui n'est pas impactée par la « surévaluation » de la magnitude du paléoséisme de 2001.

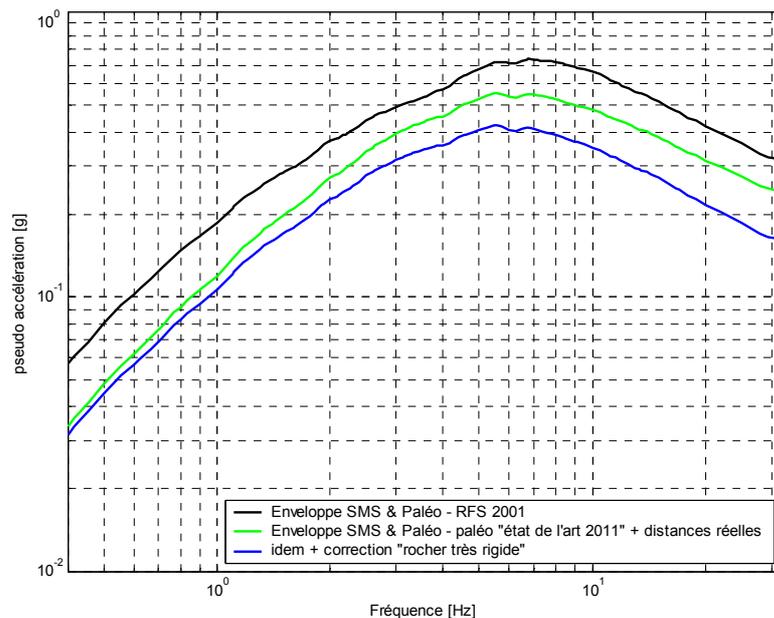


Figure 15 : Illustration du cumul possible des marges évoquées plus haut. Enveloppe SMS + Paléoséisme - spectres de réponse avec condition de site « rocher » à 5% d'amortissement.

3.1.2. Dispositions de protection du dimensionnement

- * **Identification des structures, systèmes et composants (SSC) clés nécessaires pour atteindre un état de repli sûr et censés rester disponibles (opérationnels et/ou intègres) après le séisme**

Les SSC clés nécessaires pour atteindre un état de repli sûr et censés rester disponibles sont identifiés au §2.2.

- * **Principales dispositions de conception/construction associées**

Dispositions de détection du séisme

L'installation RJH dispose d'un dispositif de surveillance de l'aléa sismique réalisé par la mise en œuvre de :

- moyens non spécifiques à l'installation RJH. Ces dispositions de surveillance du Centre CEA de Cadarache sont :
 - ✓ réseaux de surveillance de la microsismicité locale et régionale dont le but est de localiser les failles génératrices d'ondes et de comprendre leur mécanisme,

- ✓ moyens d'instrumentation accélérométrique au niveau du Centre de Cadarache afin de mesurer les mouvements sismiques forts. Le système dispose d'une possibilité de report d'alarme à la FLS ou au SPR du Centre, en cas de mouvement fort,
- accéléromètres mesureurs et déclencheurs spécifiques à l'INB RJH, à savoir :
 - ✓ accéléromètres mesureurs situés au niveau du BUR (radier supérieur, niveau 0 et chemin de roulement du pont), du BUA (local contrôle-commande et toiture), des BAS (1 sur le radier de chaque BAS) et sur le radier inférieur de l'UN dont l'enregistrement est réalisé a minima à 0,01g,
 - ✓ accéléromètres déclencheurs situés sur le radier inférieur de l'UN (1 accéléromètre) et sur le radier de chaque BAS (1 pour voie A et 1 pour voie B) et qui seront réglés selon deux seuils :
 - * seuil à 0,01 g,
 - * seuil à 0,08 g dont le dépassement entraîne une chute des absorbants de pilotage du réacteur.

En cas de séisme, l'exploitant est ainsi immédiatement informé pour être en mesure d'exécuter les consignes décrites dans les documents d'exploitation pour une telle situation.

Dispositions vis-à-vis du génie civil

Les dispositions retenues vis-à-vis du séisme concernant le génie civil sont les suivantes :

- la présence d'appuis parasismiques en élastomère fretté posés sur des plots en béton armé en dessous du radier supérieur sur lequel repose le BUA et le BUR permettant de filtrer la composante horizontale de l'excitation sismique.
- le dimensionnement au séisme des structures internes et ouvrages de génie civil de l'UN garantissant :
 - ✓ l'intégrité et la stabilité de ces ouvrages,
 - ✓ le supportage et la protection de l'enceinte de confinement et des EIS devant tenir au séisme implantés dans ces ouvrages,
 - ✓ la tenue des parois de l'enceinte de confinement et l'étanchéité du bloc eau, de ses traversées et des liaisons de l'enceinte,
 - ✓ l'intégrité des traversées et structures de génie civil de l'UN permettant d'assurer la protection radiologique,
- le dimensionnement au séisme des autres bâtiments classés de sûreté (bâtiments des diesels BAS, galeries BAG et cheminée de l'UN) ainsi que de la galerie BMN, du BAV et de sa galerie de liaison avec l'UN garantissant :
 - ✓ l'intégrité et la stabilité de ces ouvrages,
 - ✓ la tenue des locaux abritant les systèmes nécessaires à la mise et au maintien à l'état sûr du réacteur (locaux des diesels de sauvegarde, galerie technique abritant des liaisons de sauvegarde),
- la non-agression de l'UN par les matériels installés en toiture du BAN ou par le BAV et sa galerie de liaison,
- l'absence d'interaction et l'éloignement entre les bâtiments non classés sismique (BMR, BMM, BMX, BMG et BAD) et les bâtiments classés de sûreté (UN, BAS et BAG). La distance minimale d'environ 10 m entre le BMR et le BAS A en considérant une hauteur du BMR de 4 m est suffisante. Par ailleurs, toutes les structures et ouvrages non classés satisfont l'exigence de non agression des ouvrages classés.

Les galeries de l'UN et des locaux classés, solidaires du génie civil, sont dimensionnées au séisme comme le reste de l'ouvrage. Les liaisons entre les galeries et l'UN sont équipées de raccords souples destinés à ne pas transmettre d'efforts.

Un joint de 10 cm de débattement et d'étanchéité permet de reprendre les déplacements bidirectionnels entre l'UN sur appuis parasismiques et les galeries fondées directement sur le sol. Ce joint est protégé à l'intérieur et à l'extérieur par un couvre joint métallique.

Dispositions vis-à-vis de l'enceinte et de ses traversées

Les dispositions retenues vis-à-vis du séisme concernant l'enceinte et ses traversées sont les suivantes :

- le dimensionnement au séisme des ouvrages de génie civil de l'UN (BUR et BUA) garantissant l'intégrité de la 3ème barrière de confinement,
- le dimensionnement au séisme des traversées (fluides et électriques) associées à l'enceinte garantissant :
 - ✓ l'intégrité pendant le séisme des parties mécaniques des traversées (fourreau, ...),
 - ✓ l'intégrité pendant le séisme et l'opérabilité après séisme des vannes d'isolement enceinte.

Le confinement associé à la 3ème barrière est assuré par la mise en confinement statique de l'UN, réalisée par fermeture des vannes d'isolement enceinte (fermeture manuelle par action opérateur ou fermeture automatique notamment sur détection d'activité importante dans le BUR),

- la présence de fins de course sur les registres d'isolement enceinte et sur les vannes d'isolement des circuits (état du positionnement) permettant la surveillance de la mise et du maintien en confinement statique de l'UN,
- la possibilité de surveiller la pression post-accidentelle dans l'enceinte après isolement par des capteurs de pression redondés et opérables après séisme.

Les utilités électriques ainsi que le contrôle-commande associés à la commande des vannes d'isolement enceinte électriques et la surveillance de l'isolement sont dimensionnés au séisme. Ces systèmes sont alimentés par l'alimentation électrique de sauvegarde.

Concernant l'alimentation en air comprimé (MFA) des vannes d'isolement enceinte pneumatiques, compte tenu de la perte du réseau MFA, chaque vanne dispose d'une réserve d'air comprimé constituée par le vérin lui-même, en aval d'un clapet anti-retour, permettant leur fonctionnement pendant 48 h en cas de perte du réseau d'air comprimé. Sur ordre de fermeture, l'électro-distributeur bascule sur la position échappement, libérant l'air comprimé et permettant la détente du ressort et la fermeture de la vanne.

Dispositions vis-à-vis du réacteur

Les dispositions retenues vis-à-vis du séisme concernant le réacteur sont les suivantes :

- le dimensionnement au séisme des équipements associés à l'arrêt du réacteur permettant la maîtrise de la réactivité et de la sous-criticité :
 - ✓ la chute des absorbants de pilotage (AP) du réacteur est assuré par la chaîne de détection sismique dimensionnée au séisme ; le contrôle-commande, les absorbants et leur mécanisme associés sont également dimensionnés au séisme,
 - ✓ l'Arrêt d'Urgence (AU) du réacteur est dimensionné pour être opérationnel pendant et après séisme. L'AU peut ainsi être assuré :
 - * automatiquement sur une détection (signal de protection du dispositif expérimental, niveau piscine RER, ...) grâce aux équipements de mesure et d'acquisition, d'élaboration et de contrôle-commande de l'AU dimensionnés au séisme,
 - * manuellement depuis la SDCI sur alarme séisme.

Les utilités électriques associées, le contrôle-commande de sauvegarde et le système de conduite accidentelle notamment pour les commandes d'AU manuel et les panneaux de

conduite sont dimensionnés au séisme. Ces systèmes sont alimentés par l'alimentation électrique de sauvegarde.

La commande d'AU peut également s'effectuer manuellement depuis le poste de repli (PDR), dont les équipements nécessaires sont dimensionnés au séisme.

- ✓ les parties internes du cœur sont dimensionnées au séisme, à savoir :
 - * la géométrie du cœur et du réflecteur est maintenue en cas de séisme,
 - * les mécanismes de commande d'absorbants (chute) associés au système de contrôle de la réactivité (RCR) sont dimensionnés au séisme ; les autres équipements associés aux mécanismes (système d'étanchéité, dispositif de freinage, moteur, modules d'alimentation des moteurs AP, AC et ASA, ...) sont dimensionnés pour rester fonctionnels ou intègres pendant et après séisme,
 - * la présence de fins de course sur les mécanismes de commande des absorbants (état du positionnement) permettant la surveillance de la chute associée au système de contrôle de la réactivité (RCR),
 - * le système de contrôle de la réactivité (RCR) est dimensionné au séisme,
 - * les chaînes NF et ND du système RCR sont dimensionnées pour rester opérationnelles pendant et après séisme,
 - * le système de supportage/verrouillage des mécanismes de commande (RIV) est dimensionné au séisme,
 - * le système de supportage/verrouillage du cœur et essais sous flux (RIE) est dimensionné au séisme

- ✓ le circuit de contrôle ultime de la réactivité (RCU), dimensionné au séisme, permettant l'injection de poison neutronique dans le primaire via le circuit RUC, afin d'assurer la maîtrise de la réactivité à long terme du cœur (en cas de besoin),
- ✓ les moyens de conduite associés au réacteur : salle de conduite centralisée installation (SDCI) et poste de repli (PDR),

- le dimensionnement au séisme des équipements permettant le confinement des matières radioactives :
 - ✓ pour la 1ère barrière de confinement :
 - * les plaques de l'élément combustible et l'enveloppe de la source neutronique restent intègres,
 - * les pieds et les éléments de structures de l'élément combustible et des réflecteurs restent intègres ainsi que les mécanismes de commande d'absorbants afin de ne pas agresser la première barrière,
 - * le bloc DND du circuit de détection des ruptures de gaines (RPG) reste intègre,
 - * les moyens d'entreposage et de supportage des ECI conservent leur fonctionnalité après séisme afin de ne pas agresser la première barrière,
 - * la surveillance d'une rupture des gaines combustibles est réalisée par des capteurs d'activité notamment dans le BUR,
 - ✓ pour la 2ème barrière de confinement :
 - * les structures propres au cœur assurant l'étanchéité du circuit RCR en fonctionnement et en phase de maintenance sont dimensionnées au séisme,
 - * la surveillance au niveau du circuit RCR est réalisée par le système de collecte de fuite entre joints qui est dimensionné au séisme,
 - * les structures internes sont dimensionnées au séisme,
 - * les composants statiques du circuit primaire principal (RPP) participant à la 2ème barrière du réacteur sont dimensionnés au séisme pour conserver leur fonctionnalité, les autres piquages des circuits annexes (crypte, ...) conservent leur intégrité,
 - * la surveillance d'une rupture au niveau du circuit RPP est réalisée par une mesure de débit au niveau du bipasse dimensionné au séisme,

- * les vannes d'isolement du bloc eau au niveau du circuit RPP sont dimensionnées au séisme et leurs fins de course sont dimensionnées au séisme pour surveiller l'isolement du bloc-eau,
 - * les composants statiques des circuits annexes au primaire RPA, RPG et RPK (enveloppe du circuit, ...) sont dimensionnés au séisme,
 - * les vannes d'isolement du bloc eau au niveau des circuits RPA, RPG et RPK sont dimensionnées au séisme (automatisme d'isolement du bloc eau sur niveau insuffisant en piscine) et les fins de course sur les vannes RPA et RPK sont dimensionnés au séisme pour déceler toute perte d'étanchéité,
 - * la perte potentielle de la deuxième barrière de confinement est détectée par le système de détection de présence d'eau dans les puisards ou la crypte et de mesures de niveau d'eau (MDM), du fait de leur dimensionnement sismique,
 - * les piscines assurant la 2ème barrière conservent leur étanchéité.
- le dimensionnement au séisme des équipements permettant l'évacuation de la puissance résiduelle :
- ✓ les circuits de réfrigération de sauvegarde RUC, RUP et RUS assurant l'évacuation de la puissance résiduelle du cœur et des piscines du BUR sont présentés ci-après,
 - ✓ le circuit primaire cœur (RPP) est dimensionné au séisme :
 - * les volants d'inertie sont dimensionnés au séisme afin d'assurer un débit minimal de circulation d'eau, de façon passive, le temps de la reprise par les circuits de sauvegarde,
 - * les clapets de non-retour sont dimensionnés au séisme, durant le transitoire de reprise de la réfrigération par les circuits de sauvegarde afin de réaliser un lignage vers les circuits de sauvegarde,
 - * les vannes de convection naturelle entrée et sortie cœur ainsi que leur commande sont dimensionnées au séisme afin d'assurer à terme l'évacuation de la puissance résiduelle par convection naturelle,
 - ✓ la surveillance de la réalisation de l'évacuation de la puissance résiduelle est assurée grâce à la surveillance des systèmes assurant la réfrigération :
 - * les FDC des électro distributeurs permettant de surveiller indirectement la position ouverte des vannes de convection naturelle (RPP) sont dimensionnés au séisme ; les vannes sont également équipées de capteurs dimensionnés au séisme,
 - * les capteurs de température, de débit et les FDC des vannes motorisées des circuits RUC, RUP et RUS sont dimensionnés au séisme,
 - ✓ les éléments et structure de maintien des éléments réflecteurs (RCB) et les structures internes du réacteur (RIC, RIE et RIB) participant à l'évacuation de la puissance résiduelle, sont dimensionnés au séisme afin d'assurer leur refroidissement optimal,
- le dimensionnement au séisme des équipements permettant la protection radiologique associés au réacteur, notamment les écrans d'atténuation d'irradiation gamma du RIE. Par ailleurs, la protection radiologique au niveau du réacteur est assurée principalement par le génie civil.

Dispositions vis-à-vis des piscines et des circuits associés

Les dispositions retenues vis-à-vis du séisme concernant les piscines et les circuits associés sont les suivantes :

- le dimensionnement au séisme des équipements permettant la maîtrise de la sous-criticité :
- ✓ les dispositifs mis en œuvre au niveau des entreposages des éléments combustibles (RER, REE, EPU, EPI) tels que les structures et les paniers d'entreposage,
 - ✓ les mesures de niveau des piscines RER, REE et sas RES ; la mesure de niveau de RER initiant l'AU,
- le dimensionnement au séisme des équipements permettant le confinement des matières radioactives :
- ✓ pour la 2ème barrière de confinement constituée par les piscines, les canaux et le sas RES :

- * le cuvelage des piscines et canaux du BUR et du BUA et du sas RES est dimensionné pour rester intègre (et donc étanche) en cas de séisme,
- * les équipements (portes, structures, joint) du sas sous eau sont dimensionnés au séisme ainsi que les joints statiques des batardeaux ; le système de maintien en pression des joints gonflables est dimensionné au séisme,
- * les mesures de niveau et de température ainsi que la détection de fuites (puisards et traversée en fond de piscine) des piscines RER, REE, RES, EPU, EPI, EPT, EPC et EPO et la mesure de pression au niveau du joint gonflable des piscines RER, REE, RES, EPU, EPI et EPT permettant de détecter toute fuite, sont dimensionnées au séisme, ainsi que la mesure de débit branche principale du circuit REP,
- * la perte potentielle de la deuxième barrière de confinement est détectée par le système de détection de présence d'eau dans les puisards ou la crypte et de mesures de niveau d'eau (MDM), du fait de leur dimensionnement sismique,
- ✓ pour le confinement assuré par les circuits piscines :
 - * tous les circuits annexes piscines (REH, REK, REW, REU, ...) et les circuits de réfrigération primaire normale des piscines (REP, REN et EPA) contenant du fluide contaminé sont dimensionnés au séisme vis-à-vis du confinement,
 - * les vannes d'isolement bloc eau associées aux circuits REK et REU sont dimensionnées au séisme ainsi que les fins de course pour déceler toute perte d'étanchéité,
 - * les actionneurs assurant un rôle d'isolement des lignes d'aspiration ou de refoulement des circuits piscines plongeant à des altimétries inférieure à - 0,35 m ainsi que leurs commandes associées sont dimensionnés au séisme,
- le dimensionnement au séisme des équipements permettant l'évacuation de la puissance résiduelle :
 - ✓ les circuits de réfrigération de sauvegarde RUP, RUS et EPS assurant l'évacuation de la puissance résiduelle des piscines,
 - ✓ la surveillance de la réalisation de l'évacuation de la puissance résiduelle est assurée grâce à la surveillance du bon fonctionnement des systèmes assurant la réfrigération : capteurs de température, de débit, de pression et FDC des vannes motorisées des circuits RUP, RUS et EPS,
 - ✓ les volants d'inertie, les clapets de non-retour et les clapets de convection naturelle du circuit normal de réfrigération primaire de la piscine BUR et du réflecteur (REP),
- le dimensionnement au séisme des moyens permettant la surveillance radiologique,
- le dimensionnement au séisme des équipements permettant la protection radiologique. Cette protection radiologique est assurée par une hauteur d'eau suffisante dans les piscines qui est surveillée par les mesures de niveau des piscines RER, REE et sas RES.

Dispositions vis-à-vis des moyens de manutention

Les dispositions de conception et d'aménagement vis-à-vis du séisme sont les suivantes :

- les structures, les moyens d'accrochage et de maintien des charges et les chemins de roulement des moyens de manutention de l'UN sont dimensionnés pour résister aux sollicitations du séisme avec les charges les plus lourdes, et ce, dans les positions les plus défavorables envisageables lors des opérations :
 - ✓ moyens du BUR : pont polaire RMP, convoyeur du sas RMS, passerelle principale des piscines BUR RMT, système de manutention combustible RCM,
 - ✓ moyens du BUA : pont nef EML, pont transbordeur EMT, pont ZAR EMZ, pont de desserte des piscines BUA EMP, convoyeur canal d'accès aux cellules EMF, EMI, EMM, EMH, tables d'accostage de ZAR EMR, EMD, EMC, EMA.

Dans ces conditions, la charge suspendue est maintenue pendant et après séisme, et l'opérabilité de la commande manuelle d'affalage et de toutes les autres manœuvres manuelles de translation sont assurées en situation post-séisme. Les systèmes de détection de mouvements intempestifs

(survitesses, virement,...) et les éléments de sécurité des chaînes cinématiques des moyens de manutention (freins, pince de serrage, contrôle-commande d'arrêt de secours,...) sont dimensionnés au séisme. Par ailleurs, les éléments de sécurité des chaînes cinématiques (à l'exception de la passerelle principale piscines (RMT) et de la machine de chargement (RCM)) sont alimentés par l'alimentation de sauvegarde.

- les outillages du réacteur (RMO), les perches de manutention, la passerelle polaire piscine réacteur (RMD) et les systèmes divers de manutention du BUA (EMS) sont dimensionnés pour rester intègres en cas de séisme. Dans cette situation, les moyens de manutention ainsi que leur charge ne sont pas susceptibles de devenir des agresseurs.

Dispositions vis-à-vis des entreposages à sec

Les racks et les armoires d'entreposage qui sont dans les magasins d'entreposage à sec sont dimensionnés au séisme.

Dispositions vis-à-vis des alimentations électriques

Le séisme est susceptible d'induire des dégradations du réseau et des installations assurant l'alimentation électrique du Centre de Cadarache tant à l'extérieur qu'à l'intérieur. En situation post-séisme, les alimentations électriques normales et prioritaires sont indisponibles en cas de perte de l'alimentation électrique externe.

Les alimentations électriques normales et prioritaires non dimensionnées au séisme, ont néanmoins, une exigence de non agression (intégrité) sur les équipements voisins qui peuvent potentiellement être des EIS disposant d'une exigence de tenue au séisme.

La perte du réseau d'alimentation électrique externe conduit à l'arrêt automatique du réacteur, suite à un arrêt d'urgence sur détection de baisse de vitesse des pompes primaires. Elle conduit également à l'arrêt des réseaux de ventilation normaux du BUR et du BUA. L'arrêt préventif du réacteur peut également être induit par le système de détection sismique.

L'alimentation électrique des équipements importants pour la sûreté permettant la mise et le maintien en état sûr de l'installation est assurée par le réseau d'alimentation de sauvegarde dimensionné au séisme.

Cf § 6.1.1. et 6.1.2.

Dispositions prises vis-à-vis du contrôle-commande

En situation post-séisme, le contrôle commande de service pourrait être indisponible ; seul le contrôle commande de sauvegarde est considéré opérationnel. Il est conçu en architecture à panne sûre (ordre de déclenchement des fonctions de sauvegarde sur manque de tension) et comprend :

- le système qui assure les fonctions dites de sauvegarde, dimensionné au séisme :
 - ✓ opérabilité pendant et après séisme pour les fonctions suivantes : arrêt d'urgence (AU), surveillance de la fonction d'AU, fonction de sauvegarde et surveillance de ces fonctions (mise et maintien en état sûr du réacteur, ...),
 - ✓ intégrité pendant et opérabilité après séisme pour les fonctions suivantes : déclenchement des autres actions classées sûreté et/ou classées séisme, surveillance de la réalisation de ces actions, dont la détection sismique, acquisition et présentation des informations des détections des agressions internes et de la surveillance radiologique,
- le système qui assure les fonctions de sûreté ayant des exigences de tenue au séisme ou les fonctions non classées de sûreté mais ayant des exigences de tenue au séisme.

Le contrôle-commande de service, non dimensionné au séisme a une exigence de non agression sur les équipements voisins qui peuvent potentiellement être des EIS disposant d'une exigence de tenue au séisme.

Dispositions prises vis-à-vis des circuits de réfrigération

En cas de séisme, la source froide normale n'étant pas dimensionnée au séisme (Canal de Provence ou conduite d'alimentation du circuit RST), les circuits de réfrigération de sauvegarde (RUC, RUP et RUS) assurent la fonction d'évacuation de la puissance résiduelle du cœur, des piscines et des dispositifs expérimentaux, notamment durant le transitoire de mise et maintien à l'arrêt sûr.

Vis-à-vis de la fonction de confinement de fluide contaminé, les équipements des circuits de réfrigération normale du cœur et des piscines sont dimensionnés pour rester intègres en cas de séisme.

Les circuits de réfrigération de sauvegarde RUC/RUP/RUS sont constitués de deux files indépendantes, chacune étant capable d'assurer seule la réfrigération du cœur et des piscines en cas de perte de la réfrigération normale.

Les moyens de réfrigération de sauvegarde sont les suivants :

- le système de réfrigération de sauvegarde RUS est dimensionné vis-à-vis du séisme :
 - ✓ les composants statiques (enveloppe du circuit, tuyauteries, bassins d'aéroréfrigérant, réserve d'eau,...) restent fonctionnels,
 - ✓ les actionneurs (électropompes, vannes d'isolement, aéroréfrigérants, dispositifs de mise hors gel) ainsi que leur commande de mise en service conservent leur opérabilité,
 - ✓ les pompes de circulation maintiennent leur opérabilité,
- les systèmes de réfrigération de sauvegarde RUC et RUP sont dimensionnés vis-à-vis du séisme :
 - ✓ les composants statiques du circuit RUC (tronçons vers RCU traversant le BUR) restent fonctionnels,
 - ✓ les actionneurs du circuit RUC (pompes, vannes d'isolement et clapets non retour) et leurs commandes de mise en service maintiennent leur opérabilité, les vannes d'isolement vers le circuit RCU conservent leur opérabilité,
 - ✓ la protection de la file RUP B en casemate REP/REN reste fonctionnelle,
 - ✓ les composants statiques du circuit RUP (tuyauteries) restent fonctionnels,
 - ✓ les actionneurs du circuit RUP (pompes, vannes motorisées et clapets non retour) et leurs commandes de mise en service maintiennent leur opérabilité,
- le système de réfrigération de sauvegarde des piscines EPU et EPI (EPS) est dimensionné vis-à-vis du séisme :
 - ✓ les composants statiques (enveloppe et échangeurs) restent fonctionnels,
 - ✓ les actionneurs (pompes) et leurs commandes de mise en service conservent leur opérabilité.

Ces systèmes de réfrigération sont alimentés de la façon suivante :

- les circuits RUC et RUP sont repris par le système d'ultime secours (SUS) puis par les diesels de sauvegarde,
- les circuits RUS et EPS sont repris uniquement par les diesels de sauvegarde.

Le contrôle commande de sauvegarde assurant la mise en service des systèmes de réfrigération de sauvegarde est dimensionné au séisme. La commande et la surveillance de ces circuits sont assurées depuis la salle de conduite (SDCI) et le poste de repli (PDR).

Concernant les moyens de contrôle et de surveillance des systèmes de réfrigération de sauvegarde RUC, RUP et RUS, les dispositifs de surveillance de la température, des débits et fins de course des vannes motorisées sont dimensionnés au séisme.

Vis-à-vis du circuit de sauvegarde de réfrigération des piscines du BUA (EPS), les mesures de débit et de température ainsi que les fins de course des vannes du système EPS sont dimensionnés au séisme.

Les réserves d'eau des systèmes de réfrigération de sauvegarde RUS nécessaires au fonctionnement en mode humide des aéroréfrigérants (33 m³ pour chaque système) sont dimensionnées au séisme, permettant d'alimenter en eau les bassins afin d'assurer l'aspersion des aéroréfrigérants. La capacité de cette réserve d'eau est dimensionnée comme suit :

- 3 m³ pour assurer une opération de remplissage des bassins sous aéroréfrigérants en cas d'indisponibilité de l'alimentation en eau de ville,
- 30 m³ pour assurer le fonctionnement en mode humide du système RUS post-séisme avant de passer en fonctionnement en mode sec.

Réseaux de ventilation et de conditionnement

Les registres d'isolement des réseaux de ventilation normale (réseaux de soufflage MVE et MVJ et d'extraction MVB, MVC, MVD, MVF, MVG et MVH) ainsi que leur commande associée sont dimensionnés au séisme ainsi que les gaines de ces réseaux situées entre les DNF et les traversées d'enceinte. Par ailleurs, les systèmes de filtration THE des Derniers Niveaux de Filtration (DNF) des réseaux d'extraction MVB, MVC, MVD, MVG et MVH sont aussi dimensionnés au séisme.

Le pilotage normal et la surveillance des réseaux de ventilation normale ne sont pas garantis. En l'absence d'information sûre concernant l'état de ces réseaux, l'opérateur procède à l'arrêt des réseaux de ventilation normale à partir du pupitre de conduite post-accidentelle (action d'arrêt de la ventilation opérationnelle après séisme).

En situation post-séisme, seuls les réseaux de ventilation de sauvegarde sont disponibles et nécessaires à la gestion de la situation accidentelle et post-accidentelle, afin d'assurer le confinement des matières radioactives (3ème barrière de confinement).

Les systèmes de ventilation de sauvegarde de l'UN (MVK et MVL), assurent la ventilation/conditionnement des locaux du contrôle commande, des locaux abritant des tableaux électriques, de la salle de conduite (SDCI), du poste de repli (PDR) ainsi que des locaux batteries.

Ces systèmes sont dimensionnés au séisme, ils sont redondants et ségrégués géographiquement dans des locaux indépendants dans l'UN.

Concernant la ventilation des cellules chaudes, celle-ci est assurée en situation post-séisme par le réseau d'extraction D du BUA (MVI) dimensionné pour tenir au séisme.

D'autres systèmes de ventilation/conditionnement, dimensionnés au séisme, sont associés à la ventilation de sauvegarde, il s'agit :

- du réseau de ventilation accidentelle de la ZRF (MVM) qui assure l'extraction de la ZRF en situation post-accidentelle afin de collecter les fuites issues du BUR. Cette ligne de dégonflage du BUR (réseau, éléments filtrants des DNF, gaine, ...) est dimensionnée au séisme ; les actionneurs (ventilateur, vannes d'isolement, ...) et leur commande associée sont opérables après séisme ainsi que le capteur de pression post-accidentelle dans l'enceinte après isolement associé à la ventilation MVM,
- du réseau d'air de référence de l'UN (MVN) utilisé pour les mesures de pression pour les réseaux de sauvegarde MVK, MVL et MVI; du système de filtration THE et des mesures de pression de référence,
- des systèmes de ventilation/conditionnement de sauvegarde des bâtiments BAS (MVS) qui permettent de maintenir des conditions d'ambiance compatibles avec leur fonction.

En cas de séisme, le bon fonctionnement de ces systèmes de ventilation de sauvegarde nécessite les servitudes suivantes :

- le système de conditionnement de sauvegarde de l'UN (MVQ) assurant des conditions d'ambiance dans les locaux de sauvegarde compatibles avec le fonctionnement des réseaux MVK et MVL est dimensionné au séisme,
- le contrôle-commande associé à la ventilation de sauvegarde et celui associé à l'isolement du BUR sont dimensionnés au séisme,
- l'alimentation électrique de sauvegarde permettant d'alimenter les systèmes de ventilation de sauvegarde est dimensionnée au séisme.

Enfin, le système de conditionnement de sauvegarde de l'UN (MVQ) assurant des conditions d'ambiance dans les locaux de sauvegarde compatibles avec le fonctionnement des réseaux MVK et MVL est dimensionné au séisme.

* Principales dispositions d'exploitation

Les principales dispositions d'exploitation vis-à-vis du risque sismique sont les suivantes :

- Lorsqu'ils ne sont pas utilisés, les moyens de manutention lourds (pont polaire, pont nef, passerelle principale des piscines BUR, pont transbordeur, ...) sont mis en position garage, hors des zones abritant des éléments importants pour la sûreté.
- Un programme de suivi des appuis parasismiques est prévu. Des appuis et des échantillons de test seront stockés dans l'encuvement, dans les conditions des appuis en service, et testés périodiquement.
- Dispositions prises pour la maintenance des drains de la paroi clouée (distance de 2 mètres entre l'UN et la paroi).
- Limitation des hauteurs de manutention des charges lourdes.

Risques induits par un séisme

Les équipements susceptibles d'affecter simultanément plusieurs équipements essentiels et de conduire ainsi à un des risques d'effets faibles identifiés au paragraphe 2.1, sont indiqués au paragraphe 2.2. Des informations complémentaires sur les risques d'incendie, d'explosion et d'inondation internes induits par un séisme sont fournies ci-après. Il est rappelé que, d'une manière générale, les circuits de refroidissement de sauvegarde et leurs alimentations électriques sont structurés en deux voies A et B redondantes et séparées géographiquement.

Risque d'incendie interne induit par un séisme

Un séisme peut être initiateur d'un incendie interne en cas de court-circuit ou en cas d'incendie de produits chimiques ou de métal liquide (acide nitrique, NaK, ...). Il peut également engendrer la perte ou l'indisponibilité des moyens de lutte incendie.

Les équipements électriques sont dimensionnés au séisme a minima pour ne pas aggraver les EIS disposant d'une exigence de tenue au séisme. Ils sont conçus selon l'état de l'art de manière à ce que :

- les câbles d'alimentation d'une armoire arrivent par le bas,
- un degré de liberté soit observé vis-à-vis des sollicitations mécaniques autour du bornier,
- le système de connexion ait une bonne tenue à la traction en cas de vibration.

Ainsi, suite à un séisme, les câbles électriques restent en place ; aucun court-circuit n'est envisageable.

Les seules tuyauteries fluides traversant les locaux électriques (locaux TSS et locaux tableaux électriques) sont les tuyauteries d'alimentation en eau glacée (MVQ) des climatiseurs. Ces tuyauteries ainsi que les climatiseurs sont dimensionnés au séisme vis-à-vis du risque jet fluide.

Vis-à-vis des produits chimiques, les dispositions suivantes permettent de se prémunir contre le risque d'incendie interne en cas de séisme :

- les circuits d'acide nitrique présent dans l'UN (MFQ) ont une exigence de garder leur intégrité en cas de séisme afin de ne pas aggraver les EIS disposant d'une exigence de tenue au séisme,
- lors de la manipulation de métal liquide (NaK ou Na) en cellule associé à des échantillons de type matériau, et non de type combustible, l'inertage préventif à l'azote permet de prévenir le risque d'incendie en cellule.

La détection incendie est dimensionnée pour tenir au séisme. De manière générale, les équipements constituant la sectorisation incendie (parois, portes, trappes et traversées) sont dimensionnés pour rester intègres en cas de séisme. Les clapets coupe-feu, intègres en cas de séisme, sont spécifiés pour être opérationnels et manœuvrables après séisme. La propagation d'un éventuel incendie survenant dans l'UN est donc limitée par la sectorisation incendie.

L'UN dispose de colonnes sèches dimensionnées au séisme.

Risque d'explosion induit par un séisme

Les bouteilles de gaz sous pression sont principalement situées sur la façade sud du BMR et le stockage d'azote liquide est situé au sud-est du BMR (environ 20 m du BMR). Des murs de béton dimensionnés au séisme sont disposés sur 3 côtés autour de ces zones, afin de diriger l'éventuelle onde de surpression et les missiles générés vers une zone dépourvue de cibles de sûreté.

L'installation dispose de batteries électriques ouvertes qui dégagent de l'hydrogène lors de leur charge. En situation normale, la ventilation des locaux permet de maintenir la concentration en hydrogène à une valeur inférieure à la limite d'explosivité. De plus, dans les bâtiments classés de sûreté, les locaux contenant ces batteries disposent de détecteurs d'hydrogène ; ces détecteurs ainsi que les équipements de coupure de charge sont dimensionnés pour être opérationnels après un séisme.

Risque d'inondation induit par un séisme

D'une manière générale, à l'intérieur de l'UN, les capacités d'entreposage d'effluents, les réserves de circuits fluides et les circuits fluides sont dimensionnés pour rester intègres en cas de séisme (SI).

A l'extérieur de l'UN, les circuits de refroidissement normal secondaire et tertiaire (RSE, RSS, RSD et RST) ne sont pas dimensionnés au séisme. Les dispositions permettant de limiter les conséquences de leur rupture sont indiquées au paragraphe 5.2.b.

3.1.3. Conformité de l'installation

La conformité de l'installation sera assurée par la qualification des matériels requis et par le programme de réception et de mise en service.

3.2. Evaluation des marges

3.2.1. Indication du niveau de séisme au delà duquel la perte des fonctions fondamentales de sûreté ou l'endommagement du combustible (en cuve ou en piscine) deviennent inévitables ou, pour les installations autres que les réacteurs, conduisent à l'enclenchement d'actions relevant de situations accidentelles

- **points faibles de l'installation et de l'organisation et préciser tout effet falaise**
- **dispositions envisagées pour prévenir ces effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de la conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles...)**

Les structures pour lesquelles un examen des effets falaises sous séisme doit être réalisé sont les suivantes :

- Structures de Génie Civil :
 - ✓ Supportage de l'UN et système d'isolation parasismique
 - ✓ Piscine RER
 - ✓ Piscine REE et casemates du bloc eau
 - ✓ Bâtiments de Sauvegarde et Galeries de liaison associées
 - ✓ Agresseurs potentiels des ouvrages dont l'intégrité doit être maintenue
 - ✓ Toiture du BUA
 - ✓ Piscines BUA
- Equipements
 - ✓ Sources électriques de sauvegarde
 - ✓ Circuits électromécaniques de sauvegarde
 - ✓ Paniers et casiers des entreposages
 - ✓ Ponts

Supportage de l'UN et isolation parasismique :

➤ **Appuis parasismiques :**

Il convient d'analyser la robustesse des appuis de façon à s'assurer que l'isolation parasismique ne peut pas être le point faible du bâtiment pour un séisme hors dimensionnement, son endommagement constituant un effet falaise.



Mise en place d'un appui parasismique

Analyse du comportement des appuis :

Le déplacement sismique sous SDD est de 8 cm à mettre en regard d'une épaisseur d'élastomère de 12 cm. On peut considérer de façon enveloppe une déformation sous retrait et thermique égale à 2 cm. On a ainsi sous SDD un déplacement de 10 cm (soit une distorsion de $10/12 < 0.9$). Pour 2*SDD on a un déplacement de 18 cm (soit une distorsion de 1.5).

Niveau de séisme	Déplacement sismique (cm)	Déplacement retrait + thermique (cm)	Déplacement total (D en cm)	Distorsion de l'appui (D/12)
SDD	8	2	10	0.9
2*SDD	16	2	18	1.5

Le graphe ci-dessous montre que le comportement de l'appui est linéaire en statique jusqu'à une distorsion de 2, justifiant la qualité de l'adhérence entre les frettes et l'élastomère à de telles déformations d'appui.

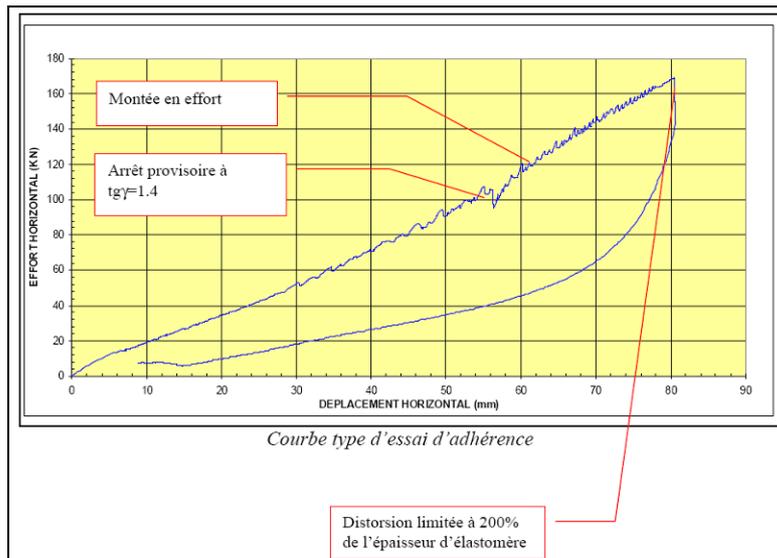


Figure 16 :
Comportement appui

En dynamique, le comportement n'est pas tout à fait linéaire puisque le module de rigidité de l'appui diminue légèrement avec la distorsion pour des distorsions faibles à fortes, comme l'illustre le graphe suivant (distorsion variant de 0.3 à 1.5), il augmente sensiblement ensuite.

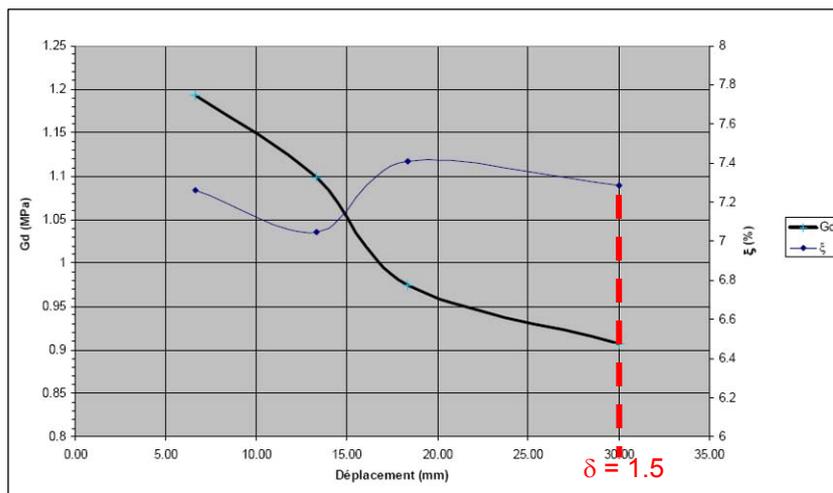


Figure 17 :
Comportement appui

On peut en déduire que jusqu'à $2 \cdot SDD^{(*)}$ (distorsion de 1.5), il y a linéarité du comportement (les accélérations dans le bâtiment augmentent en proportion de l'augmentation de l'accélération du sol) et que l'appui est parfaitement intègre.

Jusqu'à une distorsion de 2, l'appui est parfaitement intègre même s'il n'y a plus linéarité du comportement. L'accélération maximale du sol correspondant à cette distorsion est de l'ordre de 0.7g ce qui est irréaliste à Cadarache (cf § 3.1.1), et prouve que les appuis offrent une marge confortable.

(*) Nota : La marge de 2 est exprimée sur le paléoséisme, elle correspond à une marge de 3.4 sur le SMS proche et de 2.7 sur le SMS lointain.

Dans la direction verticale, il y a linéarité du comportement jusqu'à 3 fois le chargement statique soit une marge d'un facteur supérieur à 5 vis-à-vis du SDD.

➤ **Poteaux supportant les appuis :**

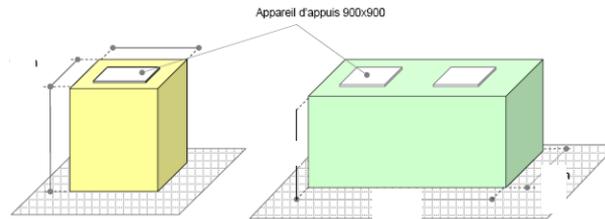


Figure 18 :
Poteaux

La marge minimale sur les poteaux est de 1.8 vis-à-vis du SDD, en considérant des hypothèses très pénalisantes :

- il a été considéré pour le calcul de tous les plots un effort normal vertical nul, sous-estimant ainsi la compression des plots, laquelle a un effet favorable sur la reprise des moments de flexion,
- il a été considéré pour le calcul de tous les plots l'effort horizontal maximal calculé.

Ces hypothèses sont très pénalisantes. Considérons un poteau double et une charge nominale par poteau^(*) de 2*560 tonnes et la décompression liée au séisme vertical (0.4g) pondérée par 0.4 (cumul de Newmark). On a, pour un séisme de niveau x*SDD, un effort vertical et un effort horizontal (en MN) par poteau de :

- $N_V = 5.6 * 2 * (1 - x * 0.4 * 0.4)$
- $N_H = 5.6 * 2 * x * 0.12$
- $M = N_H * h = 2.15 * N_H$

Le tableau ci-dessous présente les efforts pour x * SDD

x (x * SDD)	N _V	N _H	M
1	9.41	1.34	2.89
1.5	8.51	2.02	4.33
2	7.62	2.69	5.78
2.5	6.72	3.36	7.22
3	5.82	4.03	8.67
3.5	4.93	4.70	10.11
4	4.03	5.38	11.56
4.5	3.14	6.05	13.00
5	2.24	6.72	14.45

Ci-dessous le diagramme résistant d'un poteau double (12HA32/face) sur lequel sont positionnés ces efforts. On note que les efforts appliqués sortent du diagramme pour 3*SDD.

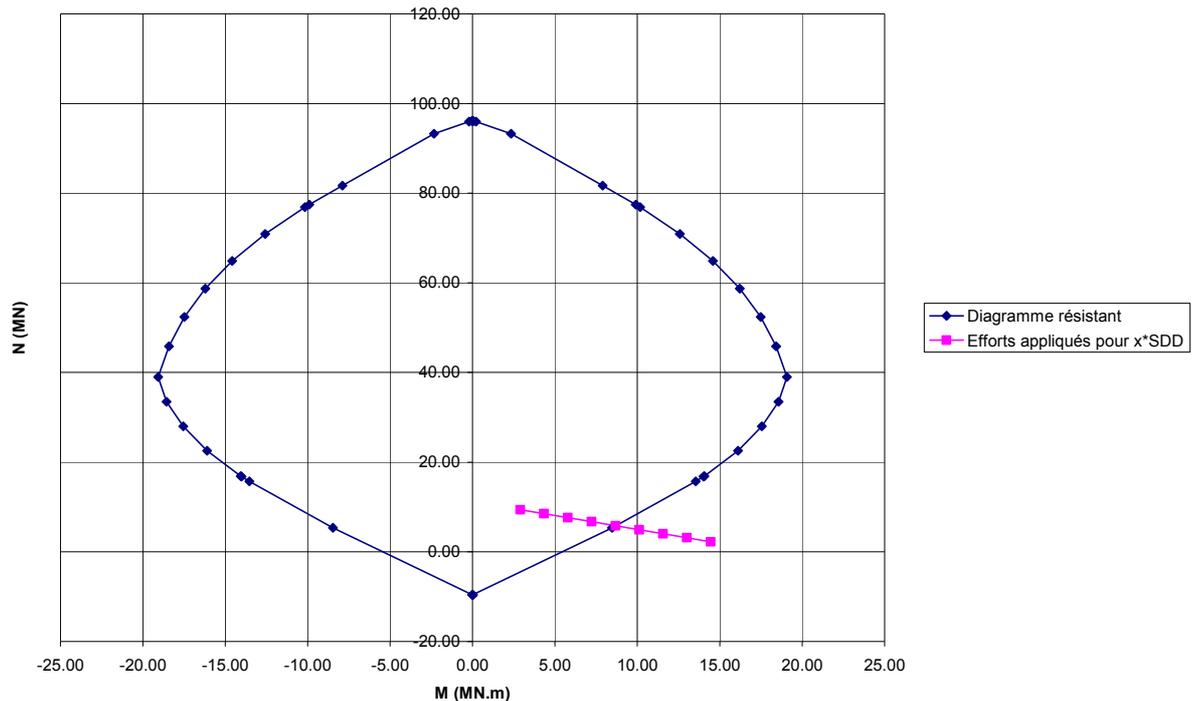


Figure 19 :
Diagramme de résistance d'un poteau double

Le même exercice avec les plots simples donne le même résultat (marge de 3 sur le SDD).

➤ **Transmission de l'effort du bâtiment aux appuis et des appuis aux plots :**

Comme développé ci-avant, l'effort vertical à considérer sous un séisme de 2*SDD est de $560 * (1 - 0.4 * 0.4 * 2)$ tonnes soit 380 tonnes.

L'effort sismique horizontal de 2*SDD est d'environ 140 tonnes ($0.12 \text{ g} * 2 * 550$ tonnes).

On obtient le ratio suivant :

$$\frac{\text{Effort Horizontal}}{\text{Effort vertical}} = \frac{140}{380} = 0.37$$

La transmission peut donc se faire par frottement sous 2*SDD si l'on considère un coefficient de frottement élastomère/béton de 0.4.

Par ailleurs, un système de butée anti-glisement, d'une capacité autonome de reprise d'efforts de 1.5*SDD vient en complément de cette analyse.

L'appui ne peut donc pas glisser sous 2*SDD et remplit donc sa fonction jusqu'à cette valeur.

➤ **Radier supérieur :**

Les superstructures du bâtiment, ie. celles au-dessus du radier supérieur, sont composées de poutres voiles reposant sur les appuis. La dalle du radier supérieur n'est pas une dalle de supportage des étages mais plutôt une membrane de liaison en pied des poutres voiles. Ainsi, une défaillance locale du radier supérieur ne remettrait pas en cause la tenue globale du bâtiment.

Il n'y a donc pas d'effet falaise lié à des désordres structurels du radier supérieur.



Piscine RER :

Ci-dessous un tableau issu des données de dimensionnement et comparant les armatures (en cm^2/m) issues du calcul de détail sismique (incluant température et pression hydrodynamique) et celles prévues d'être mises en place :

Fond de piscine	Calcul sismique				Mise en place				Marge sismique (en section d'armature)			
	Radial		Tangentiel		Radial		Tangentiel		Radial		Tangentiel	
	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext
Fond de piscine (travée)	13	24	8	51	50	50	92	92	3.8	2.1	11.5	1.8
Fond de piscine (appuis)	27	11	23	25	91	50	92	61	3.4	4.5	4.0	2.4

Voile piscine	Calcul sismique				Mise en place				Marge sismique (en section d'armature)			
	Horizontal		Vertical		Horizontal		Vertical		Horizontal		Vertical	
	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext
Fond de piscine à niveau -2 côté CEDE	22	29	19	26	105	121	73	91	4.8	4.2	3.8	3.5
Niveau -2 à niveau -1 côté CEDE	26	29	20	26	121	121	59	82	4.7	4.2	3.0	3.2
Niveau -1 à niveau 0 côté CEDE	26	27	23	26	121	80	48	71	4.7	3.0	2.1	2.7
Côté CER - zone 1	22	29	16	26	105	121	94	91	4.8	4.2	5.9	3.5
Côté CER - zone 2	23	31	29	30	121	105	59	71	5.3	3.4	2.0	2.4
Côté CER - zone 3	19	18	17	20	121	105	59	71	6.4	5.8	3.5	3.6
Côté CER - zone 4	22	29	23	27	121	105	59	67	5.5	3.6	2.6	2.5

Concernant la marge de 1.8 dans la direction tangentielle en extrados en travée du plancher, la section en place ne tient pas compte de la présence de la plaque métallique scellée en sous-face de 3 cm d'épaisseur, apportant une section équivalente d'armature tangentielle de $144 \text{ cm}^2/\text{m}$ (indépendamment des conditions de liaison de la plaque au niveau du voile), ce qui porte la marge à 4.6.

La marge sur le séisme peut donc être estimée comme au moins égale à 2 vis-à-vis du SDD (respect des critères du code de dimensionnement (RCC-G) et maintien de l'étanchéité de la piscine).

Piscine REE :

- Les efforts de membrane en SDD, issus du calcul global du BUR, sont du même niveau que ceux issus des autres situations et parfois légèrement supérieurs,
- Les moments en SDD, issus des calculs de détail incluant le SDD, sont un ordre de grandeur en dessous des moments thermiques accidentels.

A partir des efforts, en raisonnant en traction simple (moments négligeables), le tableau ci-dessous compare le besoin d'acier estimé sous séisme aux aciers en place.

	Efforts (MN/m)		Besoin aciers (cm ² /m)		Aciers en place (cm ² /m)		Marge (Aciers en place / besoin aciers) (cm ² /m)	
	selon X	selon Y	selon X	selon Y	selon X	selon Y	selon X	selon Y
Planchers								
Canal côté enceinte	1.42	1.47	28.4	29.4	80.4	80.4	2.8	2.7
Piscine REE	1.14	1.47	22.8	29.4	64.8	96.1	2.8	3.3
Canal côté RER	1.81	1.64	36.2	32.8	80.4	160.8	2.2	4.9
Voiles radiaux								
Canal côté enceinte	1.2	1.53	24	30.6	72.6	98.2	3.0	3.2
Canal côté RER	0.83	1.91	16.6	38.2	64.7	98.2	3.9	2.6
Piscine REE	1.38	0.95	27.6	19	80.4	80.4	2.9	4.2
Canal côté enceinte	1.29	1.4	25.8	28	64.8	72.6	2.5	2.6
Piscine REE	1.06	0.81	21.2	16.2	89.3	89.3	4.2	5.5
Canal côté RER	0.52	1.17	10.4	23.4	64.8	89.3	6.2	3.8
Voiles tangentiels								
UR -3.V.6.3	1.7	1.43	34	28.6	72.6	64.8	2.1	2.3
UR -2.V.7.1	2.08	1.3	41.6	26	81.5	72.6	2.0	2.8

Par ailleurs, une partie des efforts de membrane correspond à des efforts de cisaillement, pour lesquels la participation a été négligée, ce qui confère du conservatisme au calcul ci-avant.

On en déduit une marge globale sur le SDD supérieure à 2 vis-à-vis d'une exigence d'étanchéité de la piscine REE et des canaux du BUR.

Bloc eau hors piscines :

L'étanchéité des casemates du bloc eau est assurée par une résine époxydique qui a la capacité de ponter des fissures d'ouverture au moins égales à 0.5 mm.

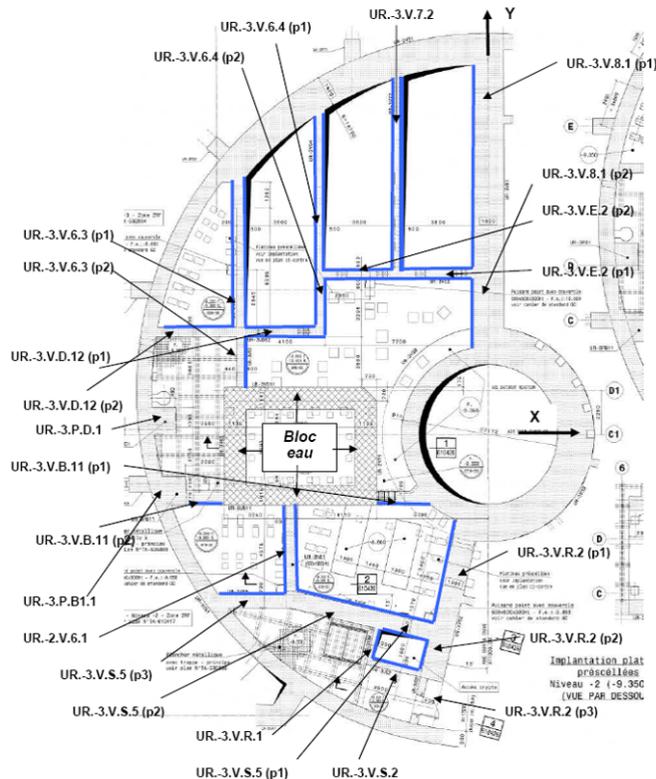


Figure 20 :
Voiles du Bloc Eau

Pour les voiles concernés indiqués sur le graphique ci-dessus :

- les efforts de membrane en SDD sont du même niveau que ceux issus des autres situations et parfois légèrement supérieurs,
- les moments en SDD sont faibles et un ordre de grandeur en dessous des moments sous inondation interne (remplissage du bloc eau).

Les efforts sous SDD sont principalement horizontaux et correspondent à du cisaillement dans les structures (pas de poussées hydrodynamiques comme en piscine, engendrant des tractions). Ainsi, la prise en compte de la résistance du béton en cisaillement, à hauteur de $0.5f_{ctm}$ donnerait une capacité de reprise d'effort par voile de $0.5 * f_{ctm} * \text{épaisseur voile}$.

Si l'on considère de façon conservative que l'effort sismique dimensionne les armatures, alors la marge sismique correspond à la valeur :

$$\text{Marge} = \frac{\text{Effort repris par le béton} + \text{effort sismique calculé}}{\text{Effort sismique calculé}}$$

Ci-dessous les calculs de marge pour les voiles du niveau -14.11 m à -9.35 m :

Voile	Panneau	Epaisseur	Effort sismique (MN/m)	Participation du béton à la reprise du cisaillement (MN/m)	Marge
UR-3V81	p1	1.60	1.04	2.80	3.7
	p2	1.60	1.08	2.80	3.6
UR-3V63	p1	0.50	0.50	0.88	2.7
UR-3V64	p1	0.50	0.63	0.88	2.4
	p2	0.50	0.40	0.88	3.2
UR-3V72		0.50	0.63	0.88	2.4
UR-3VE2	p1	0.50	0.31	0.88	3.8
	p2	0.50	0.43	0.88	3.0
UR-3VD12		0.50	0.49	0.88	2.8
UR-3VR1	p1	0.30	0.13	0.53	5.2
UR-3VS5	p1	0.90	0.46	1.58	4.4
UR-3VS2	p1	0.90	0.09	1.58	18.9

Ci-dessous les calculs de marge pour les voiles du niveau -9.35 m à 0 m :

Voile	Panneau	Epaisseur (m)	Effort sismique (MN/m)	Participation du béton à la reprise du cisaillement (MN/m)	Marge
UR-3.V.6.3	p1	0.50	0.56	0.88	2.6
UR-3.V.6.3	p2	0.50	0.43	0.88	3.0
UR-3.V.6.4	p1	0.50	0.64	0.88	2.4
UR-3.V.6.4	p2	0.50	0.30	0.88	3.9
UR-3.V.7.2		0.50	0.62	0.88	2.4
UR-3.V.8.1	p1	1.60	1.05	2.80	3.7
UR-3.V.8.1	p2	1.60	1.03	2.80	3.7
UR-2.V.6.1		0.60	0.45	1.05	3.3
UR-3.V.B.1.1	p1	0.70	0.70	1.23	2.7
UR-3.V.B.1.1	p2	0.78	0.85	1.36	2.6
UR-3.V.D.1.2	p1	0.50	0.79	0.88	2.1
UR-3.V.D.1.2	p2	0.50	0.94	0.88	1.9
UR-3.V.E.2	p1	0.5	0.44	0.88	3.0
UR-3.V.E.2	p2	0.5	0.64	0.88	2.4
UR-3.V.R.1		0.3	0.13	0.53	5.0
UR-3.V.R.2	p1	1.2	1.15	2.10	2.8
UR-3.V.R.2	p2	1.2	0.85	2.10	3.5
UR-3.V.R.2	p3	0.4	1.48	0.70	1.5
UR-3.V.S.2		0.3	0.13	0.53	4.9
UR-3.V.S.5	p1	0.9	0.40	1.58	4.9
UR-3.V.S.5	p2	0.9	0.94	1.58	2.7
UR-3.V.S.5	p3	0.7	0.98	1.23	2.2

On en déduit une marge sur le SDD de 1.5.

Piscines BUA :

Les notes de calcul ne permettent pas une estimation des marges sismiques au-delà du SDD. Toutefois, les méthodes de calcul étant identiques, on estime, à dire d'expert, pouvoir dégager une marge identique à celle prévue pour les casemates du bloc-eau (> 1,5).

Bâtiments de sauvegarde (BAS) et galeries de liaison (BAG) :

Les bâtiments de sauvegarde et les galeries de liaison sont calculés au RCC-G, donc sans coefficient de comportement. Compte tenu de la régularité de ces ouvrages et de leur exigence de stabilité, il est admissible de considérer un coefficient de sur-résistance de 2 et d'estimer ainsi **une marge globale sur le SDD de l'ordre de 2 vis-à-vis d'une exigence de stabilité structurelle des BAS et BAG.**

Les problématiques de basculement ne se posent pas compte tenu du faible élancement vertical (pour les BAS H = 8.60 m et L = l = 18 m),

Un jeu de 15 cm est aménagé entre les galeries de liaison et l'UN, soit environ le déplacement correspondant à 2 SDD (16 cm). Il est admissible ici de négliger la distorsion initiale des appuis, car le

retrait qui en est la source principale, engendre une déformation de contraction de l'UN, augmentant le jeu avec les galeries.

Toiture du BUA :

L'exigence de comportement examinée pour la toiture du BUA est le non effondrement. Le calcul sismique de dimensionnement est réalisé en élastique.

Etant donné que le séisme dimensionnant pour la toiture du BUA est le séisme vertical (le séisme horizontal étant filtré par les appuis) et qu'elle a une capacité à se plastifier au niveau des ancrages dans les voiles, il est admissible de considérer un coefficient de sur-résistance de 1.75 (cf. Safety Report AIEA n°28) et d'estimer ainsi **une marge globale sur le SDD de l'ordre de 1.75 vis-à-vis d'une exigence de non effondrement.**

Non agression de l'UN :

BAV :

Le BAV est dimensionné avec le spectre élastique suivant (spectre bleu), issu de « l'Eurocode 8 » :

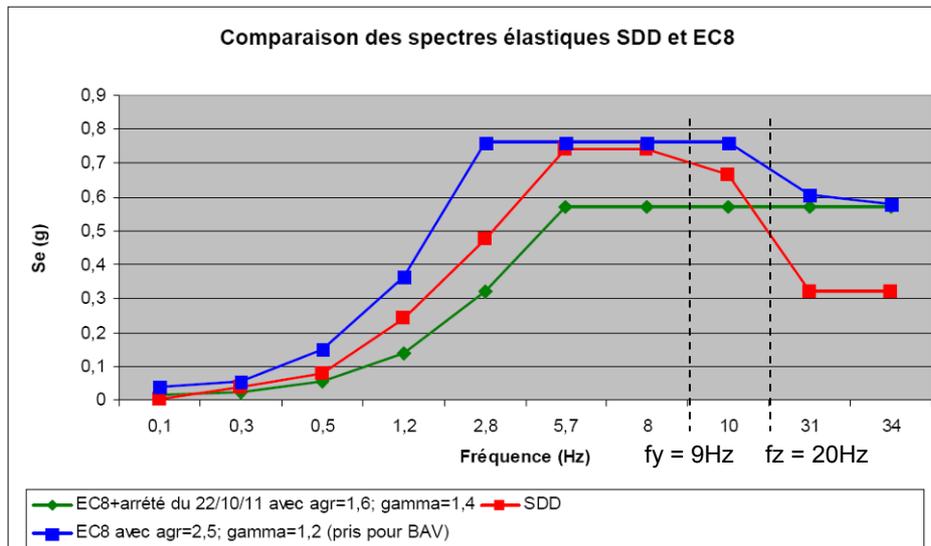


Figure 21 :
Comparaison des spectres élastiques SDD et Eurocode 8 sur le BAV

Le spectre retenu est enveloppe du SDD d'un facteur $0.75/0.7 = 1.07$ à la fréquence propre principale horizontale et $0.68/0.5 = 1.36$ à la fréquence propre principale verticale.

Le coefficient de comportement retenu pour le dimensionnement du BAV est de 1,5. Il serait admissible, compte tenu de la régularité de ce bâtiment, d'adopter un coefficient de 2.

Ce coefficient 2 est justifié par la très bonne régularité en plan du bâtiment (voiles porteurs extérieurs sur toute la périphérie + refend en croix à l'intérieur), et sa régularité moyenne en élévation (régularité du -3 au -1 mais appendice au niveau 0), comme le montrent les extraits de plan suivants :

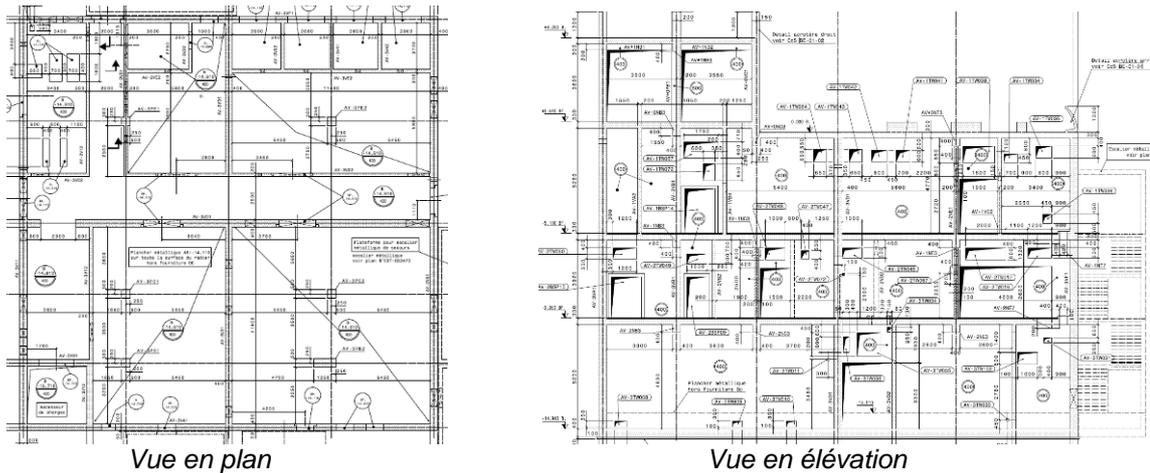


Figure 22 :
Plans du BAV

On a ainsi une marge sur le BAV de $\frac{2}{1.5} \cdot 1.07 = 1.4$ sur l'hypothèse du spectre de calcul.

L'exigence attribuée au BAV est la non agression de l'UN. Le BAV fait environ 20 mètres de hauteur (4 niveaux) et la distance qui le sépare de l'UN est de 12 mètres. Pour que le BAV agresse l'UN, il faudrait qu'il bascule ou qu'il s'effondre à la manière d'un parallélogramme.

Le basculement du bâtiment sur l'UN ne peut pas se produire, étant donné que le bâtiment est fondé sur du calcaire côté UN et sur du miocène de bonne qualité à l'opposé.

L'effondrement parfait du bâtiment à la manière d'un parallélogramme est peu envisageable compte tenu de la capacité du contreventement du bâtiment, composé de voiles de façade et d'un voile interne d'épaisseur 40 cm.

Analyse de la capacité résistante du bâtiment vis-à-vis d'un effondrement :

La prise en compte de la résistance du béton en cisaillement, à hauteur de $0.5f_{ctm}$, donnerait une capacité de reprise d'effort par voile de $0.5 * f_{ctm} * ep = 0.5 * 3.5 * 0.4 = 0.7$ MN/ml, soit un équivalent d'acier de $14 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Le ferrailage courant des voiles du BAV est de 1 acier de 20 mm de diamètre tous les 20 cm par face, soit $15.7 \text{ cm}^2/\text{m}$ /face. Les marges entre le ferrailage calculé et le ferrailage mis en place sont importantes, globalement supérieures à 40%.

La prise en compte de la participation du béton à la reprise du cisaillement donne donc une marge de résistance de $\frac{31.4 + 14}{\frac{31.4}{1.4}} = 2$.

Enfin, l'analyse de la résistance des voiles est effectuée à partir de cartes de ferrailage, qui est une approche conservatrice discrétisant le comportement des voiles au lieu d'analyser leur comportement global. Une vérification complémentaire peut être réalisée en vérifiant la reprise de l'effort de cisaillement en pied des voiles de façade :

La réaction en base du bâtiment est de 2660 tonnes. Si on la répartit sur les trois voiles de contreventement, en considérant que le voile central reprend moins d'effort compte tenu de la présence de nombreuses ouvertures, on peut estimer que l'effort en pied des voiles de façade est proche de $2660/2.5 = 1064$ tonnes, soit 10.44 MN.

En appliquant le § 6.2.3 de l'Eurocode 2 et en raisonnant sur une moitié de longueur du voile pour ne prendre en compte que la zone comprimée, on obtient les résultats suivants :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{ywd} * \cot \theta = 15.7E^{-4} * 2 * 12 * 500 * 2.5 = 47.1 \text{ MN}$$

Soit donc une marge de résistance supérieure à 4 sur les aciers en pied de voile.

Au bilan :

- **Le BAV ne peut pas basculer sur l'UN compte tenu de la nature du sol,**
- Une marge de 1.4 existe sur le spectre de calcul. Une marge supérieure à 2 existe sur les calculs.
On dispose d'une marge de 2.8 vis-à-vis du non effondrement structurel du bâtiment.

Galerie de liaison du BAV à l'UN :

La galerie de liaison du BAV à l'UN est constituée d'un étage en béton et de deux étages en charpente métallique. Cette galerie est dimensionnée au RCC-G, donc sans coefficient de comportement.

Compte tenu de la régularité de ce bâtiment, il est admissible de considérer un coefficient de sur-résistance de 2 à la fois pour la partie inférieure en béton armé et la superstructure en charpente métallique et d'estimer ainsi **une marge globale sur le SDD de l'ordre de 2 vis-à-vis d'une exigence de stabilité structurelle des BAS et BAG.**

Il existe également une marge d'un facteur 2 sur le renversement et d'un facteur 4 sur le glissement.

On a ainsi une marge sur la galerie de liaison du BAV à l'UN de 2 par rapport au SDD.

Paroi clouée :

Les talus sont repérés ci-dessous :

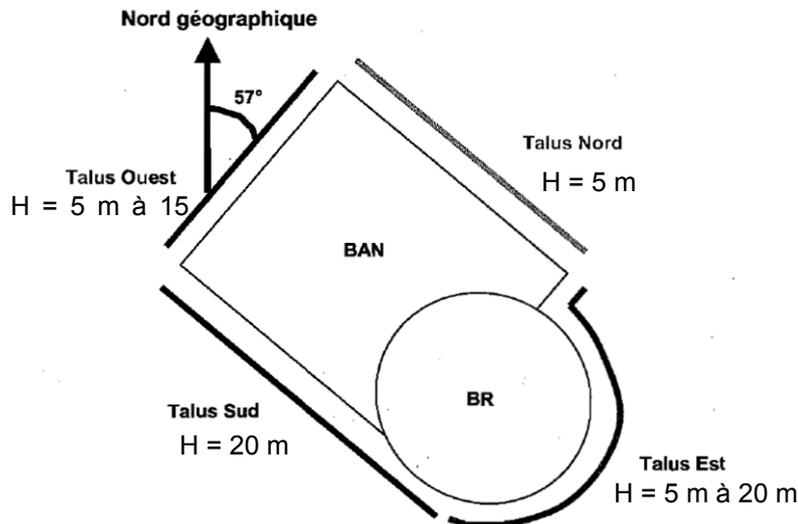


Figure 23 :
Talus paroi clouée

La stabilité du Talus Nord ne sera pas commentée compte tenu de sa faible hauteur et du fait qu'il est conforté avec une densité de clous équivalente aux autres.

L'ensemble des talus est dimensionné en considérant un séisme SDD.

Le schéma de calcul retenu correspond à un schéma de rupture bilinéaire :

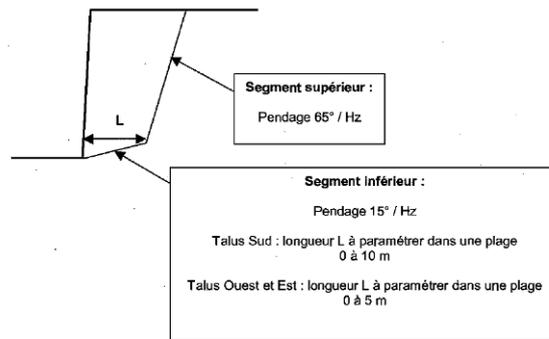


Figure 24 :
Schéma de calcul de rupture bilinéaire de la paroi clouée

Il s'est avéré à l'issue des travaux de terrassement que les talus Sud et Est présentent une stratification rentrante impliquant une stabilité intrinsèque, du moins une très grande robustesse.

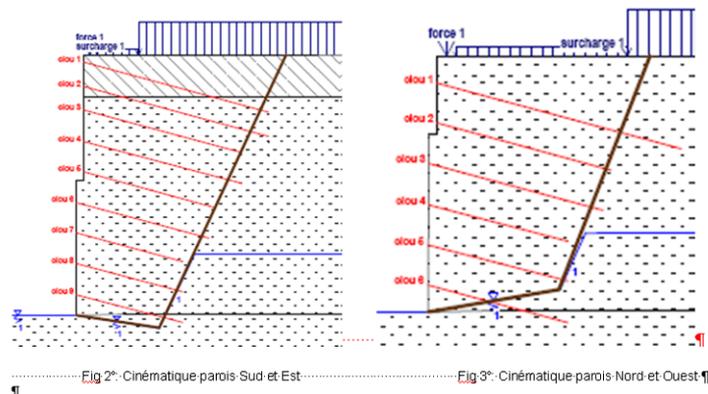


Figure 25 :
Etude géologique des talus

En ce qui concerne le talus Ouest, une marge de 37 % existe de par la différence entre les hypothèses de calcul et la géologie constatée (angle de pendage, discontinuité des joints).

Il convient d'ajouter qu'une paroi en béton projeté a été réalisée contre le talus, armée avec un treillis soudé de type 40 c à l'intérieur et 25 c à l'extérieur. La résistance du béton est de 30 MPa et l'épaisseur est de 20 cm minimum. Ce parement a été mis en place pour retenir des blocs qui seraient trop petits pour être stabilisés par les clous. Cette paroi n'a pas été valorisée pour la stabilité du massif.

Compte tenu de ces éléments, on peut estimer qu'il existe une marge supérieure à 100 % sur les talus Sud, Nord et Est et une marge de 50% sur le talus Ouest.

Synthèse des marges des structures de GC :

Structure	Exigence	Marge de dimensionnement vis-à-vis du SDD avec critères RCC-G	Marge en considérant un comportement post-élastique ou en faisant participer le béton à la reprise du cisaillement
Supportage et isolation parasismique de l'UN	Intégrité	> 2	
Piscine RER	Etanchéité	> 2	
Piscine REE	Etanchéité	> 2	
Casemates bloc eau hors piscines	Etanchéité		1,5
Piscine BUA	Etanchéité		1,5
Bâtiments de sauvegarde	Stabilité		> 2
BAV	Non effondrement		2.8
Galerie BAV	Non effondrement		> 2
Toiture BUA	Non effondrement		1,75
Paroi clouée	Non effondrement		> 1,5
Enceinte (cf. § 3.2.2)	Intégrité	> 2	
Crypte (cf. § 3.2.2)	Intégrité	= 2	

On constate que les structures de Génie Civil relatives aux fonctions principales de l'installation (supportage, maintien sous eau des EC et confinement des matières) présentent une marge de dimensionnement de 2 vis-à-vis du séisme de niveau SDD pour le BUR et a minima de 1,5 pour la partie BUA.

Equipements :Sources électriques et circuits électromécaniques de sauvegarde

Il est à noter que le dimensionnement des équipements au SDD permet de bénéficier d'une marge intrinsèque (de l'ordre de 1,5 en fonction des fréquences propres des équipements) issue de la méthodologie de calcul du SDD (cf. 3.1.1).

Les ordres émis par le contrôle-commande de sauvegarde sont à manque de tension ; ceci garantit l'émission de l'ordre vers les circuits électromécaniques concernés même au-delà du SDD.

Le retour d'expérience montre que l'utilisation de standards de montage pour la mise en œuvre des lignes de tuyauteries ainsi que des chemins de câble dimensionnés au séisme peut présenter une marge importante (de l'ordre de 3) par rapport à leur séisme de dimensionnement.

Un point particulier des circuits de sauvegarde est la connexion entre les galeries BAG A et BAG B avec l'UN. En effet, les déplacements de l'UN sur appuis parasismiques en cas de séisme sont importants et les circuits traversant le jeu UN/BAG doivent tolérer ces déformations imposées.

De façon à apporter de la robustesse en cas de séisme hors dimensionnement, il est demandé aux industriels de concevoir les circuits au droit du jeu UN/BAG avec un déplacement différentiel de +/- 17 cm, supérieur au déplacement sous 2*SDD.

Paniers et casiers des éléments combustibles en piscine

Les paniers et casiers des éléments combustibles en piscine sont de conception robuste. La perte de leur intégrité en cas de séisme et la modification de leur géométrie n'est pas à redouter. En revanche, il convient de s'assurer du non renversement de ces structures.

La formule de Ishiyama, préconisée dans Betbeder Volumes 2 (§2.1.1) et 3 (§3.2.1), permet d'évaluer la vitesse à partir de laquelle le renversement est possible :

$$V < 0.5 \frac{b}{H} * \sqrt{g * \frac{H}{2}}$$

Avec

V : Vitesse limite de non renversement (m/s)

b : Largeur de la base de l'objet (m)

H : Hauteur de l'objet (m)

Exprimée en cm et cm/s, la formule devient :

$$V < 10 * \frac{b}{\sqrt{H}}$$

On néglige ici l'effet favorable de l'eau vis-à-vis du non renversement.

La vitesse de l'objet est la somme de la vitesse relative par rapport au sol et de la vitesse du sol. Pour obtenir la vitesse relative, le graphe ci-dessous présente la vitesse maximale d'un oscillateur au niveau du sol (SDD/pulsation), laquelle est valable sur l'UN étant donné le mode de corps rigide des appuis :

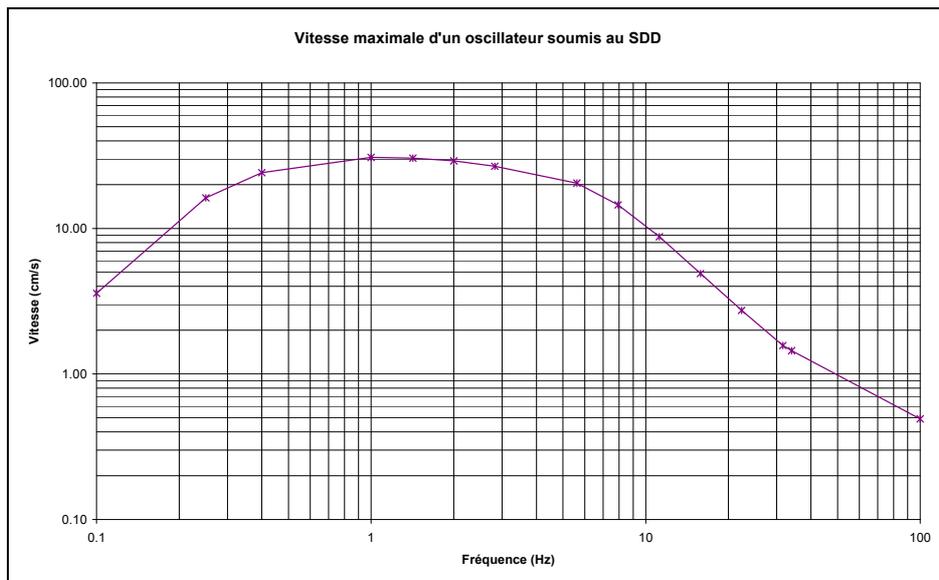


Figure 26 :
Vitesse maximale d'un oscillateur soumis au SDD

La vitesse relative maximum est de 30 cm/s.

La vitesse maximale du sol peut-être obtenue comme suit (extrait du guide ASN - § 2.2.4)

- la vitesse maximale V du mouvement sismique est prise égale au maximum du rapport $A(f)/(2\pi f)$, où A(f) est l'accélération lue pour la fréquence f sur le spectre à un amortissement de 20% ;

On obtient une vitesse maximale du sol de 18 cm/s.

Ainsi, pour un séisme de niveau SDD, la vitesse d'un objet sera au maximum de $30+18 = 48$ cm/s

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus pour les différentes structures :

Structures (entreposage EC)	Localisation	b (cm)	H (cm)	$10 * \frac{b}{\sqrt{H}}$ (cm/s)	Marge vis-à-vis du SDD
Rack de chargement / déchargement	Piscine RER	117	308	67	1.4 (*)
Casier d'entreposage	Piscine REE	115	178	86	1.8
Racks d'entreposage	Piscine EPU	152	274	92	1.9

(*) La marge de 1.4 suppose le rack posé au sol alors qu'il est fixé sur le platelage de la piscine RER, ce qui confère une robustesse bien supérieure, le platelage ayant un diamètre d'environ 7 m.

Racks d'entreposage des magasins

Les racks d'entreposage des magasins sont de conception robuste. La perte de leur intégrité en cas de séisme et la modification de leur géométrie n'est pas à redouter. En revanche, il convient de s'assurer du non renversement de ces structures.

A cet effet, les ancrages des racks seront dimensionnés vis-à-vis d'efforts correspondant à 2*SDD.

Passerelles piscine

L'exigence de comportement des ponts et des passerelles au-dessus de la piscine RER est le non effondrement.

Les passerelles RMT et RMD au-dessus de la piscine RER disposent d'une conception robuste. Structurellement, leur structure métallique leur confère une sur-résistance d'un facteur 2.

Leur stabilité est garantie par un dispositif anti-déraillement et un dispositif anti-envol. La passerelle RMT ne peut physiquement pas aggraver les EC du fait de l'éloignement des voies de roulement de la piscine.

En raison du positionnement de la passerelle RMD au-dessus de la piscine RER, des marges de dimensionnement par rapport au SDD seront prises en compte, à la conception, sur les galets et voies de roulement.

• Ponts du BUA

L'état actuel de la conception de ces ponts est insuffisamment avancé pour pouvoir évaluer les marges de dimensionnement au-delà du SDD. L'évaluation des marges au-delà du SDD sera faite en cours de conception.

- **Pont Polaire BR**

Présentation de l'équipement

Le pont polaire du RJH est l'organe de manutention principal desservant le dôme du réacteur. Il dispose de deux crochets de 6 et 36 T de capacité.

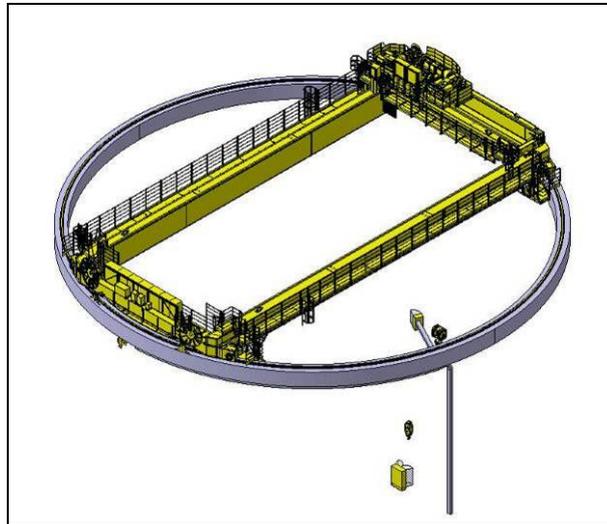


Figure 27 :
Vue générale du pont polaire

Les exigences principales de sûreté associées à cet équipement sont le maintien de la charge sous séisme, ainsi qu'une probabilité de chute de charge inférieure à 10^{-7} /an.

Il est regardé si, au cours d'un séisme supérieur à celui considéré actuellement (SDD), quelles sont les marges associées à son dimensionnement et quel pourrait être le comportement du pont compte tenu de sa conception mécanique, en regard du risque de chute du pont.

Approche calculatoire

Le pont est dimensionné aux accélérations sismiques du SDD. Ce dimensionnement est pris en considérant le pont dans sa position la plus défavorable (pouvant varier selon l'élément calculé) et chargé à sa charge maximum utile (CMU), soit 36 T.

Tous les éléments supportant la charge : ancrage, voie de roulement, galets, charpente, mécanisme de levage sont ainsi justifiés aux accélérations du SDD.

Les hypothèses conservatives de calcul retenues pour le dimensionnement des éléments du pont sont les suivantes :

- un calcul en charge à la CMU alors que la fréquence d'utilisation du pont avec une charge de 36 tonnes est inférieure à 0,1 % du temps d'exploitation du pont polaire (moins de 2 % avec une charge de 5 tonnes).
- des règles de calcul mécanique, liées notamment à l'application des CST/CRT (code de conception EDF des ponts Haute Sécurité) entraînant des valeurs de contraintes en cas de séisme inférieures aux limites admissibles des matériaux, avec les marges suivantes :
 - pour les mécanismes (galet de rotation et de translation) supportant le pont et son chariot, une marge minimale de 2
 - pour la poutre circulaire supportant la voie de roulement, une marge minimale de 1,8
 - pour les structures des ponts (poutre principale), une marge minimale de 1,3

Il est de plus à noter que les critères de résistance sont généralement ceux de la limite élastique, constituant une marge supplémentaire par rapport à la résistance à la rupture. En considérant la prise en compte de l'endommagement des structures du pont, on peut estimer un coefficient de sur-résistance des structures de 2, soit une marge de $2 \times 1,3$, supérieure à 2.

Ces marges, identifiées dans les calculs, conduisent à considérer que le pont dispose d'une marge supérieure à 2 par rapport au SDD. A noter que cette conclusion n'intègre pas le dimensionnement des platines d'ancrage, non encore finalisé, et qui devra présenter une bonne robustesse.

Approche géométrique

Le pont circule sur une voie de roulement disposée autour de l'enceinte. Cette voie est métallique et repose sur des consoles noyées dans le béton.

La figure 28 ci-dessous, présente, vu de dessus, le pont positionné sur sa voie de roulement. Il roule à l'aide de galets de rotation et est maintenu sur celle-ci, y compris sous séisme, par des galets de guidage en rotation. Ces derniers galets sont par ailleurs équipés d'anti-envol empêchant le pont de décoller de la voie de roulement sous sollicitation sismique (figure 29).

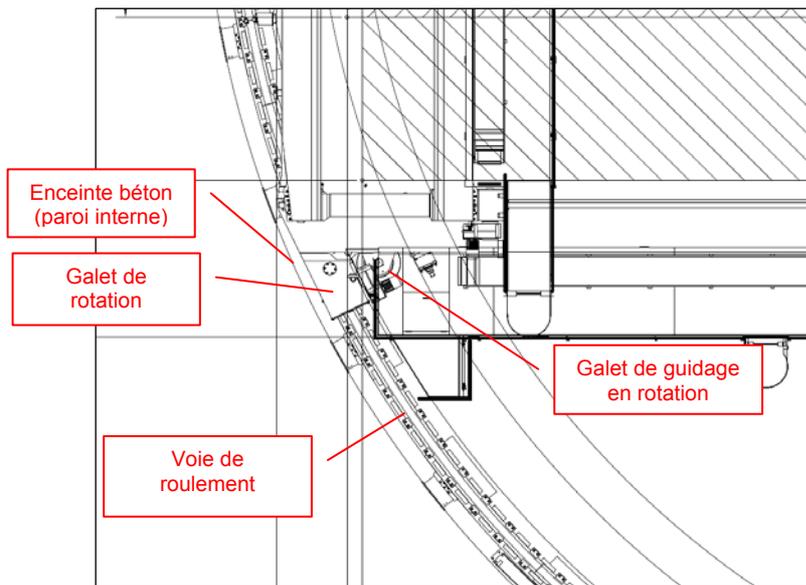
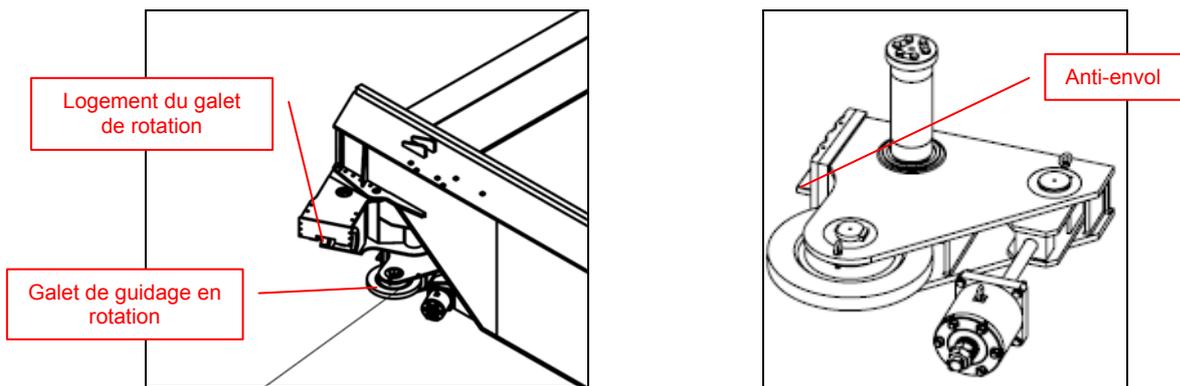


Figure 28 :
Pont polaire posé sur sa voie de roulement



Détail de l'angle du pont polaire

Galet de guidage en rotation

Figure 29

La figure 28 montre que l'espace entre l'enceinte et les structures du pont est très faible (de l'ordre de la dizaine de centimètres). Ce dernier étant maintenu par ailleurs dans toutes les directions, un séisme plus fort que le SDD, et qui pourrait entraîner une défaillance localisée d'un élément ou des déplacements plus importants que prévu, ne pourrait vraisemblablement pas conduire à une chute du pont. Les poutres principales seraient en effet en appui sur la voie de roulement, "coincant" le pont en position.

A noter enfin que le retour d'expérience d'équipements de manutention industriels dans des régions ayant subi des séismes n'a pas montré de chute complète de l'équipement.

3.2.2. Indication sur le niveau de séisme auquel l'installation peut résister sans perdre l'intégrité du confinement

L'enceinte du RJH est une structure peu vulnérable au séisme du fait

- de sa géométrie (fût circulaire et dôme hémisphérique)
- de fortes épaisseurs, offrant des capacités importantes de reprise des efforts de cisaillement par le béton, négligées dans le calcul,
- en partie haute, de la précontrainte assurant une compression en zone courante,
- en partie basse, des contreventements par les voiles radiaux et les planchers,
- du niveau d'accélération sur isolation parasismique.

Les combinaisons dimensionnantes de l'enceinte (hors radier supérieur) sont celles associées à la montée en pression du hall (épreuve ou situation accidentelle).

Pour évaluer la robustesse de l'enceinte, deux calculs de section seront effectués :

- vérification de la section d'ancrage du fût au niveau 0
- vérification de la ceinture du dôme

Vérification de la section d'ancrage du fût au niveau 0

Pour vérifier l'encastrement des superstructures de l'enceinte, en raisonnant avec 2*SDD, on utilise les éléments suivants :

Sachant que :

- le poids de l'enceinte est de 81.04 MN en superstructure
- l'accélération verticale pour 2*SDD est de 0.8 g
- l'accélération horizontale pour 2*SDD est de 0.22 g
- le centre de gravité en superstructures est au niveau 14.31m

On a vis-à-vis de la reprise des efforts verticaux :

- $N_{\text{séisme}} = 81.04 / (2 * 3.14 * 17.9) * 0.8 = 0.58 \text{ MN/ml}$
- $M_{\text{séisme}} = 0.4 * 81.04 * 0.22 * 14.31 = 102 \text{ MN.m}$

Soit au niveau 0 :

Force verticale due au séisme vertical		= 0.58 MN/ml
Force verticale due au séisme horizontal	$102 / (3.14 * 17.9^2)$	= 0.10 MN/ml
Poids propre	$81.04 / (2 * 3.14 * 17.9)$	= -0.72 MN/ml

La force résultante est négative, ce qui signifie que l'enceinte reste comprimée sous 2*SDD au niveau de l'ancrage dans le niveau 0, et ceci sans tenir compte de l'effet positif de la précontrainte.

On a vis-à-vis de la reprise de l'effort horizontal :

- $N_{\text{séisme}} = \frac{81.04}{2 * 3.14 * 17.9} * 0.22 = 0.16 \text{ MN/ml}$

Les aciers verticaux en zone courante sont de 26 cm²/m/face soit, en faisant travailler les aciers à 0.8F_{yk}, un effort capable de 1 MN/ml, 6.5 fois plus élevé que le besoin sous 2*SDD.

Vérification de la ceinture du dôme

La première vérification est la reprise de l'effort tangentiel exercé par

- l'effort horizontal lié à l'accélération sismique horizontale du dôme.
- la poussée du dôme sous cas de service normal cumulé au séisme vertical descendant

Le dôme est soumis sous séisme horizontal 2*SDD à l'effort horizontal

$$a_H * M = 0.12 * 2 * 45.6 = 11 \text{ MN.}$$

La masse du dôme est de 45.6 MN.

L'effort tangentiel F_H induit par l'effort correspond à la remontée de l'effort latéral par les cerces et vaut pour une section à 90° de la résultante :

$$F_H = 11/2 = 5.5 \text{ MN.}$$

Les efforts circonférentiels dans la ceinture du dôme sous poids propre et sous combinaison normale (poids propre + fluage + retrait + précontrainte + effet du liner) sont :

- Effort circonférentiel sous poids propre : $F_{PP} = 2 \text{ MN/m}$
- Effort circonférentiel en service normal : $F_{SN} = 1.5 \text{ MN/m}$

L'accélération verticale maximale du dôme est de 0.7g en SDD. On considèrera de façon conservatrice que l'ensemble de la masse du dôme est accéléré à 0.7g en SDD (les parties proches du fût sont en réalité accélérées à 0.4g / 0.5 g). Dans le cas d'un séisme vertical de 2*SDD, pondéré par le cumul de Newmark, on obtient donc un effort circonférentiel lié au séisme vertical de

$$F_V = 0.4 * F_{PP} * 0.7g * 2 = 1.1 \text{ MN/m}$$

A considérer que l'effort du séisme horizontal est repris sur un mètre de hauteur de ceinture torique, l'effort total circonférentiel à reprendre est donc de

$$F_{\text{Total}} = F_H + F_{SN} + F_V = 5.5 + 2 + 1.1 = 8.6 \text{ MN/m}$$

Dans la ceinture du dôme, la densité d'armatures est de :

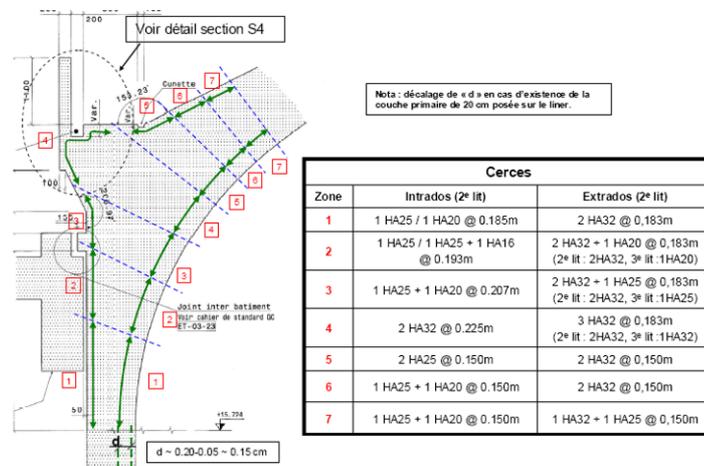


Figure 30 :
Ceinture du dôme

- intrados : 2 aciers de diamètre 32 mm tous les 22,5 cm, soit 71 cm²/m
- extrados : 3 aciers de diamètre 32 mm tous les 18,3 cm, soit 132 cm²/m

Soit donc, en faisant travailler les aciers à $0.8F_{yk}$, un effort capable de 10.1 MN/m, supérieur au besoin sous 2*SDD.

La seconde vérification est la reprise de l'effort de cisaillement généré par l'effort horizontal lié à l'accélération sismique horizontale du dôme, l'intégrale de la poussée du dôme donnant une résultante nulle en cisaillement.

Soit donc un effort de cisaillement sous 2*SDD de $F_H = 11 \text{ MN}$ (cf. ci-avant)

L'effort de compression dans la ceinture du dôme correspond à l'effort en service normal diminué de la décompression liée au séisme vertical.

La décompression sous séisme vertical de niveau 2*SDD vaut

$$F_{V\text{-séisme}} = -0.4 * M * a_{V\text{-SDD}} * 2 = -0.4 * 45.6 * 0.7 * 2 = -25 \text{ MN}$$

L'effort vertical dans la ceinture du dôme sous combinaison normale (poids propre + fluage + retrait + précontrainte + effet du liner) est :

$$F_{V\text{-SN}} = 0.5 \text{ MN/m (compression), soit } F_{V\text{-SN}} = 0.5 * \pi * D = 0.5 * \pi * 35 = 55 \text{ MN}$$

L'effort total de compression est donc de $F_V = F_{V\text{-SN}} + F_{V\text{-séisme}} = 55 - 25.5 = 30 \text{ MN}$.

D'après la règle des coutures du BAEL, l'effort de compression étant supérieur à l'effort tranchant ($F_V > F_H$), la section est équilibrée sans besoin d'armature. La vérification selon le §6.2.2 de l'EC2 donne la même conclusion.

L'enceinte dispose donc de marges en cas de séisme au-delà de 2*SDD, garantissant l'étanchéité du fût et du dôme.

NOTA : le débattement horizontal possible de la crypte est limité à 17 cm (distance minimale entre le voile externe de la crypte et les poteaux les plus proches supportant le radier supérieur). Compte tenu du comportement linéaire des appuis parasismiques, cette limite correspond à un séisme légèrement supérieur à 2 SDD (8 cm).

Il est à noter que le dimensionnement des équipements au SDD permet de bénéficier d'une marge intrinsèque (de l'ordre de 1,5 en fonction des fréquences propres des équipements) issue de la méthodologie de calcul du SDD (cf. 3.1.1).

4. Inondation

4.1. Dimensionnement de l'installation

4.1.1. Inondation de dimensionnement

a) Contexte hydrologique général

Le Centre de Cadarache est majoritairement implanté sur le bassin versant du ravin de la bête, ruisseau pérenne alimenté par des sources dans sa partie aval et dont la surface est de 2400 ha. Il s'agit donc d'un bassin versant de petite taille dont l'exutoire est la Durance.

Le réseau hydrologique est majoritairement constitué de talwegs naturels, les infrastructures pluviales étant essentiellement limitées dans le périmètre immédiat des installations et autour des voiries.

b) Situations prises en compte

Les situations pour le risque inondation retenues sont les suivantes :

- débordement du Ravin de la Bête,
- crue du bassin versant amont,
- eaux pluviales de l'INB,
- dégradation d'ouvrages hydrauliques,
- remontée de nappes phréatiques.

1. Débordement du Ravin de la Bête

Sur la base de considérations topographiques, le risque d'inondation du RJH par débordement du ravin de la Bête peut être exclu. En effet, la côte topographique basse de l'installation RJH est de 305 m NGF (308 m NGF autour du BMR) alors que le Ravin de la Bête est à la côte 297 mNGF au droit du site.

2. Crues du bassin versant amont

Pour le bassin versant amont, le positionnement retenu du RJH limite la surface du bassin versant amont d'apport à moins de 3 ha. Le risque d'inondation externe par l'amont est donc extrêmement limité d'autant que la nature des terrains (calcaires) est très favorable à l'infiltration.

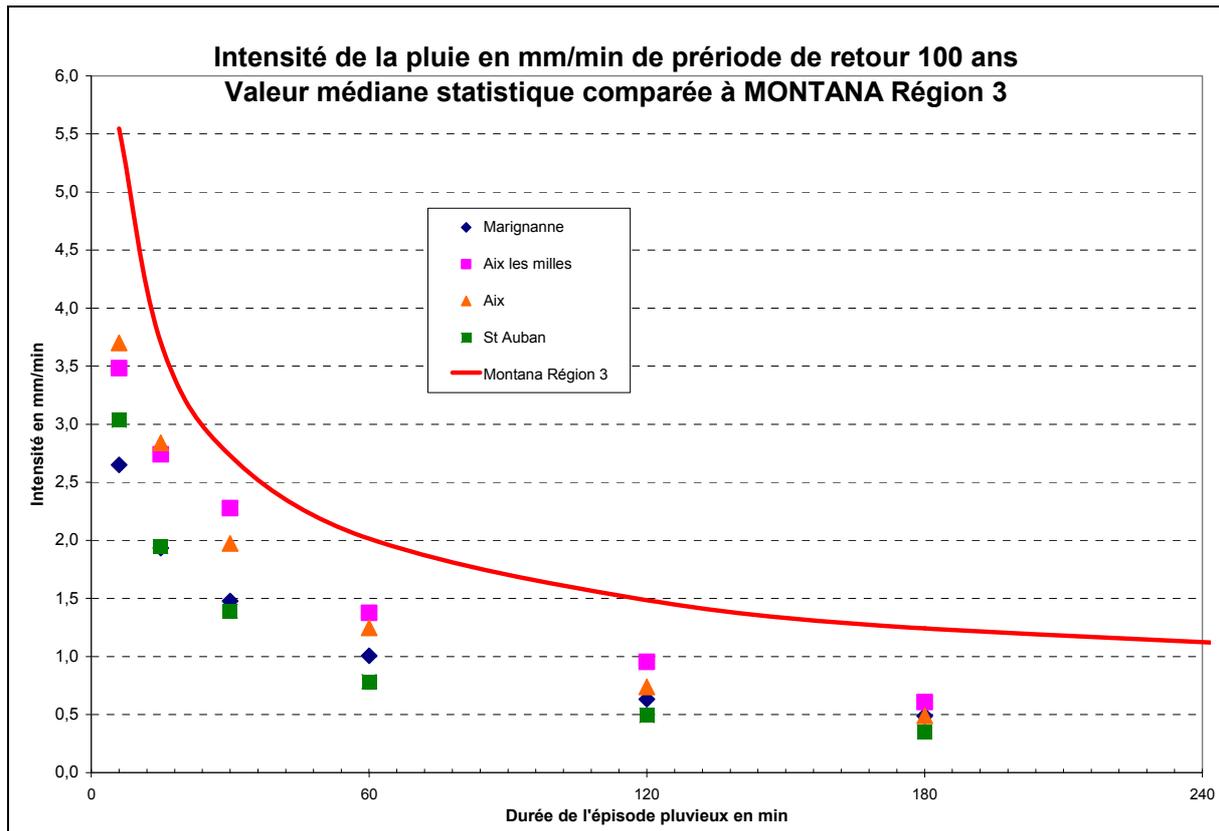
3. Eaux pluviales

a) *Pluie de référence*

L'occurrence retenue pour l'ensemble des études est la centennale.

Les historiques de pluies disponibles sur le site de Cadarache ne sont pas assez anciennes pour être exploitées de manière statistiques afin d'extrapoler des valeurs d'intensité à l'occurrence désirée. Une étude climatologique a alors été confiée à Météo France en 2005.

Elle donne les résultats de l'exploitation statistique des mesures pluviométriques relevées en diverses stations pour la caractérisation de la pluie centennale. Des écarts notables entre stations trouvent leur origine dans les effets géomorphologiques de site. Il a donc été décidé de prendre en compte un modèle générique de quantification d'intensité de pluie. En application des prescriptions de l'Instruction technique ministérielle 77, il est préconisé d'utiliser un modèle théorique donnant l'intensité de la pluie en fonction de la durée de l'évènement pluvieux. Il s'agit du modèle de Montana pour la Région III (quart sud est de la France) qui a été retenu comme pluie de référence du site de CADARACHE et qui traduit le fait que plus la durée de l'évènement pluvieux est brève plus l'intensité de la pluie est intense.



**Figure 31 :
Comparaison de la pluie centennale de Montana par rapport à la pluviométrie réelle
issue des données Météo France**

La pluie centennale de Montana Région III apparaît donc comme étant majorante par rapport à la pluviométrie réelle au niveau des stations Météo France les plus proches du centre de Cadarache. La station de St Auban serait, selon Météo France, la plus représentative de celle du site de Cadarache.

b) Quantification des débits de ruissellements

Les modèles retenus pour la transformation de la pluie en débit sont la méthode rationnelle et la formule de Caquot quand les conditions d'utilisation le permettent. Ces modèles permettent de calculer un débit de ruissellement à partir d'une intensité de pluie donnée en y tenant compte des caractéristiques du bassin versant telles que sa morphologie et son taux d'urbanisation.

c) Dimensionnement des ouvrages

Le modèle de dimensionnement des réseaux d'évacuation est le modèle d'écoulement qui prend en compte la rugosité des canalisations, appelé modèle de Strickler et classiquement utilisée en hydraulique à surface libre. Adaptable à toute morphologie d'ouvrage, il permet d'évaluer une capacité d'évacuation en y associant un taux de remplissage. Ce modèle associe à la nature de l'ouvrage un coefficient (de Strickler) dont la valeur dépend de la rugosité du matériau de l'ouvrage et de son niveau de maintenance.

4. Analyse des conséquences de la rupture d'un barrage sur la Durance (hors séisme)

Les calculs ont été effectués en prenant les conditions les plus défavorables qui correspondent à une onde de submersion se propageant sur lit sec. L'onde de submersion résulterait de l'effacement total mais progressif du barrage du fait de l'apparition d'un renard hydraulique.

Les modifications récentes intervenues dans le lit de la Durance telles que la construction de l'autoroute A51 et l'aménagement du bassin d'écluse ont été prises en compte.

Il s'avère que l'onde de submersion la plus pessimiste en terme de surélévation du plan d'eau correspond à la rupture du barrage de Serre-Ponçon. Cette onde atteindrait Cadarache 5h40min après la rupture du barrage ; elle se traduirait par un pic de débit de l'ordre de 60.000 m³/s avec une largeur à mi-hauteur de quelques heures. A noter qu'une crue centennale simultanée représenterait un débit supplémentaire de 5 000 m³/s ce qui ne modifierait pas sensiblement la cote maximale atteinte par l'onde de submersion.

La cote maximale atteinte serait de 265 m NGF.

On peut noter qu'aucune installation nucléaire ne serait concernée et l'accès au Centre resterait possible par les portes annexes.

5. Remontées de nappes

Le niveau moyen de la nappe phréatique (hors périodes de crue) se situe aux alentours de la cote 270 à 280 mNGF. En cas de pluie centennale le niveau extrême de la nappe phréatique pourrait atteindre la cote 316 mNGF au droit de l'UN.

4.1.2. Dispositions de protection du dimensionnement

a) SSC clés devant rester disponibles en cas d'inondation

Les structures clés devant rester disponibles après une inondation pour maintenir l'installation dans un état sûr sont :

- l'unité nucléaire (UN)
- les deux bâtiments de sauvegarde (BAS A et BAS B)
- les deux galeries (BAG A et BAG B) assurant respectivement la liaison entre l'UN et les BAS A et B

Les systèmes et composants clés regroupés dans chacune des structures listées ci-dessus sont présentés aux paragraphes 2.1 et 2.2

b) Dispositions de conception

Le réseau de collecte des eaux pluviales du RJH est dimensionné pour gérer l'occurrence d'une pluie centennale sur laquelle un facteur de sécurité de 1,5 a été appliqué.

En complément du réseau de collecte des eaux pluviales, les dispositions ci-dessous permettent d'éviter la pénétration des eaux de ruissellement à l'intérieur des structures.

✓ Pénétrations dans l'UN

De l'eau est susceptible de pénétrer à l'intérieur de l'UN par les ouvertures suivantes :

- la galerie d'accès à l'UN depuis le bâtiment vestiaire (BAV)
- les traversées de la galerie (BMN) de liaison entre l'UN et le bâtiment des réfrigérants (BMR)
- les traversées des galeries BAG A et B
- la porte du sas camion et du sas des dispositifs neufs de l'UN
- les ouvertures situées en toiture
- les portes de secours de l'UN

● Porte du sas camion et du sas des dispositifs :

Au niveau du sas camion et du sas des dispositifs neufs, des pentes de 2 % au niveau des passerelles d'accès extérieures de ces locaux permettent d'assurer l'écoulement préférentiel vers l'extérieur.

Néanmoins, en cas d'infiltration d'eau par les portes et d'écoulement d'eau sur le sol, les dispositions internes suivantes permettent d'éviter la propagation de cette infiltration :

- le sas camion dispose de siphons renvoyant les eaux vers un puisard permettant notamment de détecter d'éventuelles infiltrations d'eaux par la porte du sas camion. Des moyens mobiles de

pompage, disponibles à l'intérieur de l'UN, peuvent être déployés pour évacuer les infiltrations d'eau vers les circuits d'effluents de l'installation.

- la trappe d'accès reliant le sas d'entrée des dispositifs neufs à l'atelier chaud dispose d'un surbau étanche d'environ 10 cm.

● **Portes de secours :**

Les seuils des portes de secours disposent d'une pente permettant d'assurer l'écoulement préférentiel vers l'extérieur.

● **Ouvertures situées en toiture :**

En toiture, une pente minimum est réalisée de façon à éviter l'accumulation d'eau sur les bâtiments. Des descentes d'eaux pluviales assurent l'écoulement vers le réseau de collecte, elles sont pourvues d'un trop plein garantissant l'évacuation en cas de colmatage de la tuyauterie.

Les équipements en toiture sont situés en hauteur et les ouvertures de ventilation sont équipées de protections vis-à-vis d'infiltration.

De plus, les traversées de ventilation sont surélevées par rapport à la dalle du toit par le biais d'édicules de béton de 500 mm de hauteur (hors revêtement d'étanchéité). Par ailleurs, la toiture est recouverte d'un revêtement étanche.

● **Galeries BAG, BMN et BAV :**

Les dispositions suivantes sont prévues pour empêcher l'inondation de l'UN depuis les galeries de liaisons BAG, BMN et BAV :

- les traversées de canalisations de fluides et de câbles électriques avec l'UN sont surélevées par rapport au sol de ces galeries et rebouchées afin de maintenir une étanchéité empêchant les infiltrations,
- la galerie BMN est munie d'une pente permettant l'écoulement de l'eau vers le bâtiment BMR équipé d'une capacité de rétention de 200 m³. Au sol un muret de 0,45 m de haut, perpendiculaire à la galerie, favorise également l'écoulement vers le BMR.
- les BAG sont équipées de surbaux de 0,20 m et de puisards permettant l'évacuation des eaux vers le réseau des eaux pluviales et disposent de capteurs permettant une détection d'inondation.
- la dalle supérieure des BAG et BMN faisant office de toiture présente une pente supérieure à 5% et des débords de 0,20 m avec goutte d'eau.

✓ **Pénétrations dans les bâtiments de sauvegarde BAS A et B**

Les BAS sont surélevés et à des altitudes différentes (322 NGF pour BAS B et 314 NGF pour BAS A) sur des plateformes aménagées avec des formes de pente favorisant l'écoulement vers les réseaux de collecte des eaux pluviales.

Les planchers des locaux BAS sont surélevés entre 0,1 et 0,6 m par rapport au sol fini extérieur. Toutefois, en cas d'infiltration d'eau par les portes, l'eau s'écoulerait sur le sol sous des faux planchers. Les détections de présence d'eau permettent d'alerter l'équipe de quart en salle de commande.

Les cuves à gasoil alimentant les groupes de sauvegarde sont installées dans des fosses protégées par des dalles béton évitant les infiltrations d'eaux.

Ces fosses sont, par ailleurs, équipées d'une détection de présence de liquide installée en fond de fosse.

Enfin, il est à noter qu'aucun caniveau ne peut créer une communication entre les deux bâtiments BAS (ségrégation géographique) :

- les canalisations d'eaux pluviales des BAS A évacuent l'eau en périphérie Est du site,
- les canalisations d'eaux pluviales des BAS B évacuent l'eau en périphérie Ouest du site.

✓ **Remontée de la nappe phréatique et infiltration des eaux de pluies exceptionnelles**

L'UN est en partie encastrée dans la roche, au sein d'un encuvement. Le dispositif de protection retenu pour protéger les bâtiments de l'unité nucléaire comprend :

- le radier de fondation de l'unité nucléaire d'une épaisseur de 1,20 m, il est profondément encastré dans le rocher (entre 6 et 20 mètres selon les côtés),
- un parement sub-vertical de type paroi clouée qui entoure l'unité nucléaire et qui la protège des affaissements de terrains. Cette paroi est percée de drains sub-horizontaux (\varnothing 100 mm) forés profondément dans la roche et répartis sur toute la hauteur du talus. En complément, un réseau dense de barbacanes assure le drainage de l'interface entre le parement et le rocher,
- une forme de pente en périphérie du radier inférieur, permet de collecter de façon gravitaire les eaux vers le système d'évacuation.
- un dispositif d'évacuation des eaux collectées constitué d'une cunette et d'un tunnel d'évacuation gravitaire en direction du Ravin de la Bête. Il est implanté sur la face nord de l'UN. Ce réseau est dimensionné pour évacuer un débit de 1000 m³/h correspondant à une valeur enveloppe d'une remontée karstique d'occurrence centennale ou d'infiltrations suite à une pluie d'occurrence centennale.



Figure 32 :

Principe de l'encuvement de l'UN et des systèmes de drainage

L'UN est protégée de l'inondation induite par les remontées karstiques et des infiltrations des eaux de pluie par :

- l'étanchéité de la face interne du radier de l'UN (niveau -3) et des casemates primaires,
- le radier inférieur de l'UN support des appuis parasismiques, dimensionné aux sous-pressions lors d'une remontée karstique accidentelle,
- le confortement des fouilles (clouage passif du massif rocheux, voiles en béton projeté armé, drains forés et barbacanes),
- le dispositif de drainage de l'UN, indépendant du réseau d'évacuation des eaux pluviales, permet de collecter et d'évacuer vers le Ravin de la Bête les eaux des remontées karstiques, ainsi que celles consécutives à des apports d'eau d'infiltration de pluie.

Concernant les bâtiments hors UN, certains bâtiments sont situés à des altitudes supérieures aux niveaux des remontées karstiques centennales (BAS B et BAG B), leur permettant d'être hors d'atteinte. Les autres bâtiments disposent de dispositifs de drainage périphérique permettant de drainer les eaux des remontées karstiques correspondant à une valeur enveloppe d'une remontée karstique d'occurrence centennale vers le réseau des eaux pluviales.

- **Disposition d'exploitation pour alerter de l'imminence d'une inondation et pour en limiter les conséquences**

Le niveau des eaux souterraines est contrôlé périodiquement au niveau des piézomètres situés à proximité de l'installation. En fonction de l'évolution du niveau de la nappe phréatique, la périodicité de ces contrôles peut être renforcée.

Des détecteurs d'inondation reportés en salle de commande permettent d'alerter l'exploitant d'infiltration d'eau dans les BAS A et B, les BAG A et B, le radier inférieur de l'UN.

4.1.3. Conformité de l'installation

Le réseau de collecte des eaux pluviales est périodiquement contrôlé et nettoyé en fonction de son état, dans le but de débarrasser les caniveaux des matières susceptibles de l'obstruer.

Des rondes périodiques sont effectuées dans le radier inférieur pour contrôler le bon état du dispositif d'évacuation des eaux vers le Ravin de la Bête. En fonction de son état un curage est réalisé.

Suite à l'occurrence d'une inondation nettement supérieure à une crue centennale conduisant à une présence d'eau dans le radier inférieur, les dispositions suivantes seront engagées :

- Inspection de l'état des structures et pièces mécaniques de l'espace inter-radier
- Contrôle de l'état du radier de fondation

4.2. Evaluation des marges

a) Niveau d'inondation auquel peut résister l'installation sans endommagement du combustible

On retient comme élément d'appréciation le risque d'indisponibilité, par inondation, des deux voies redondantes regroupant les fonctions de sauvegarde (réfrigération et alimentation électrique de sauvegarde), ségréguées dans les bâtiments BAS A et B.

Le noyage des diesels de sauvegarde serait susceptible de rendre indisponibles les deux voies redondantes d'alimentation électrique. Cette situation est exclue en regard des éléments suivants.

Les deux bâtiments de sauvegarde BAS A et B étant sur des plateformes (313.90 mNGF et 322.20 mNGF) surélevées par rapport au local BMR (308 mNGF), une rupture de la canalisation du circuit tertiaire RST ne peut pas aggraver les BAS.

Au vu de la distance séparant les deux bâtiments BAS (environ 40 m) et du volume limité contenu dans les circuits de sauvegarde RUS (10 m³) ainsi que dans les réservoirs d'appoint d'eau (30 m³) de leurs aéroréfrigérants, une brèche sur une voie RUS n'est pas susceptible d'aggraver la seconde voie.

Les pompes de chaque voie du circuit RUS sont à l'intérieur de chaque bâtiment BAS sur des massifs (0,2 m). Les aéroréfrigérants de chaque voie sont sur des massifs (0,2 m) posés sur des plateformes pourvues de surbaux (0,1 m).

Les groupes électrogènes de sauvegarde sont à l'intérieur de chaque bâtiment BAS et surélevés sur des massifs (0,6 m).

Les cuves gasoil principales des groupes électrogènes de sauvegarde sont dans des casemates surélevées.

Dans l'hypothèse d'un colmatage du tunnel de drainage vers le Ravin de la Bête ou d'une pluie hors dimensionnement, l'eau s'accumulerait dans les zones de collecte des drains et des appuis parasismiques pour déborder par le bord nord de l'encuvement entourant l'UN (Cf figure 32) et s'écoulerait de façon gravitaire en direction du Ravin de la Bête sans dommage pour les bâtiments contenant des matériels de sûreté (cf paragraphe 5.2). Des moyens mobiles sont mis en œuvre pour évacuer l'eau accumulée dans l'encuvement (cf paragraphe 4.2 c).

b) Points faibles et effet falaise

Aucun risque d'effet falaise n'est identifié.

c) Dispositions envisagées pour renforcer la robustesse de l'installation

Bien qu'il n'y ait pas d'effet falaise identifié, la conception peut être rendue plus robuste avec les modifications suivantes :

- une traversée équipée d'une vanne d'isolement et d'un raccord pompier sera aménagée dans la partie basse du voile béton isolant l'encuvement pour faciliter le pompage des eaux accumulées dans la zone des appuis parasismiques suite à une inondation de l'encuvement.

5. Autres phénomènes naturels extrêmes

5.1. Conditions météorologiques extrêmes liées à l'inondation (tempête, pluies ...)

Les conditions météorologiques extrêmes liées à l'inondation sont la grêle, les vents violents et la foudre.

La grêle peut être un initiateur de bouchage partiel des avaloirs des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. Les vents violents associés à des pluies intenses peuvent entraîner des objets divers (branches d'arbres, ..) qui pourraient contribuer, comme dans le cas de la grêle, à perturber l'évacuation des eaux par un bouchage localisé du réseau.

Pour les raisons indiquées au paragraphe 4, ces événements, de la même manière qu'une pluie plus intense que celle prise en compte pour le dimensionnement, ne peuvent conduire à un effet falaise.

La foudre pourrait être initiatrice de perte partielle d'alimentation électrique, de court-circuit voire d'incendie. Ces événements seraient sans incidence sur les conséquences de l'inondation, dans la mesure où en cas d'inondation externe la mise en œuvre de moyens actifs n'est pas nécessaire à court terme. Il est par ailleurs à noter que la détermination du niveau de protection contre la foudre pour l'INB RJH est réalisée en prenant en compte la méthode de la norme NF-EN-62305-2.

5.2. Séisme dépassant le niveau de séisme pour lequel l'installation ou certains ouvrages sont dimensionnés et inondation induite dépassant le niveau d'eau pour lequel l'installation est dimensionnée

5.2.1. Identification des situations externes

5.2.1.1. Analyse du risque de rupture de barrages à proximité de Cadarache à la suite d'un séisme

Les failles potentiellement sismogéniques du Sud Est de la France sont des failles "intraplaques" présentant des dimensions relativement modestes comparées aux failles présentes en bordures des plaques tectoniques. Ces failles "régionales" présentent des longueurs de rupture potentielle de l'ordre de la vingtaine de kilomètres. On ne peut "physiquement" pas envisager un séisme dont les mouvements destructeurs toucheraient, au cours de la même séquence sismique, le Centre de Cadarache et un ouvrage éloigné d'une centaine de kilomètres ; à titre d'illustration, un séisme à Cadarache avec une intensité de 6,5 verrait l'accélération du sol diminuer d'un facteur 10 à 100km

Les principaux barrages de la région susceptibles de concerner Cadarache, sont :

- Les barrages situés sur le Verdon et éloignés de moins de 30 km de Cadarache (Sainte-Croix et Esparron/Gréoux) ; on ne peut pas exclure la possibilité de dommages sur ces ouvrages consécutifs à un séisme sur le Centre de Cadarache,
- Le barrage de Serre-Ponçon implanté sur la Durance et situé à plus de 95 km de Cadarache ; compte tenu de son éloignement, sa rupture consécutive à un séisme ayant lieu sur Cadarache n'est pas envisageable.

En cas de rupture des barrages du Verdon due à un séisme à Cadarache nous avons considéré que la cote de l'onde de submersion serait équivalente à celle résultant de l'effacement total mais progressif du barrage du fait de l'apparition d'un renard hydraulique.

Les calculs ont été effectués en prenant les conditions les plus défavorables qui correspondent à une onde de submersion se propageant sur lit sec, les modifications récentes intervenues dans le lit de la Durance telles que la construction de l'autoroute A51 et l'aménagement du bassin d'écluse ont été prises en compte.

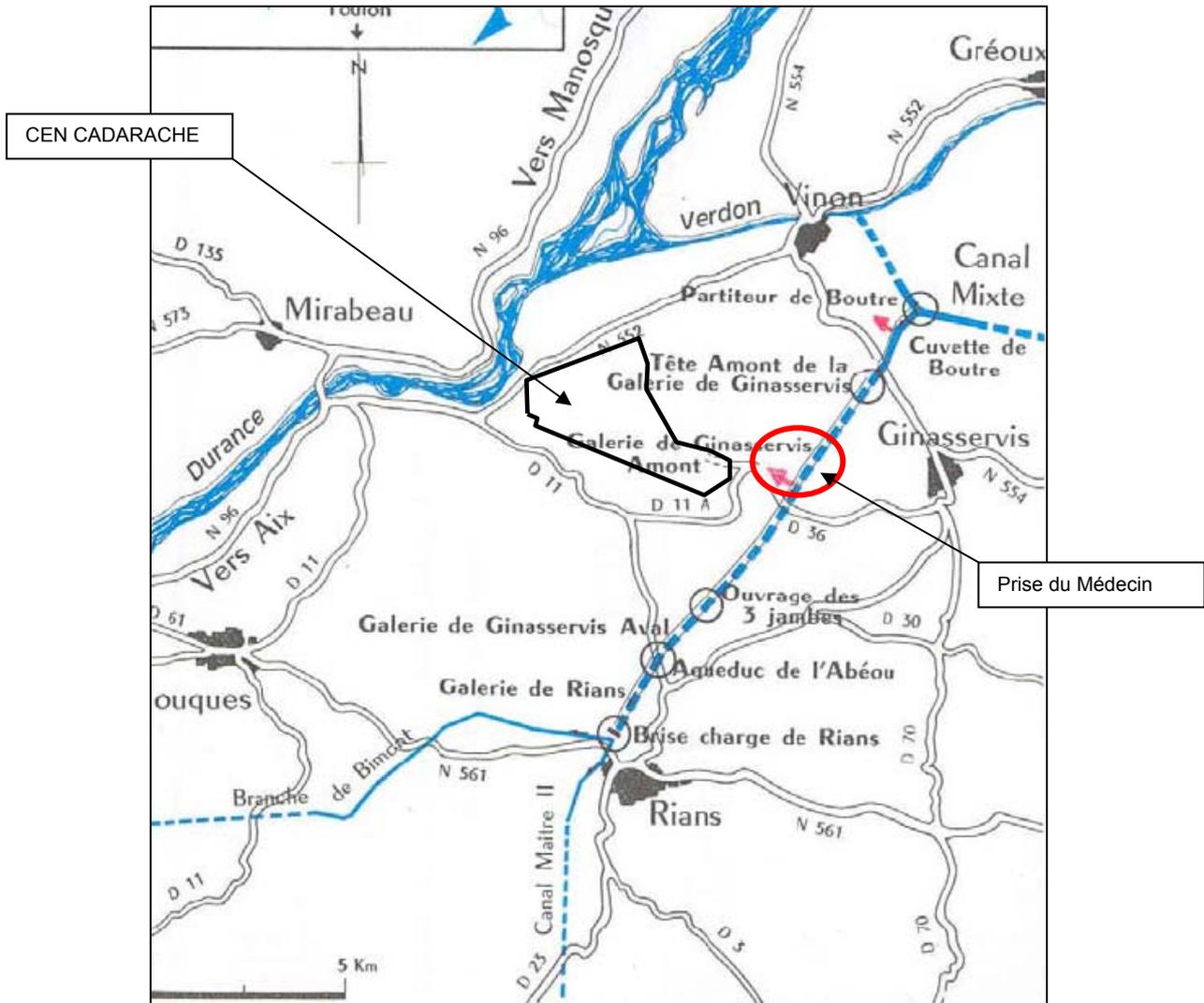
Les côtes maximales atteintes seraient de 254 m NGF pour Sainte-Croix et 250 m NGF pour Esparron/Gréoux avec un temps d'arrivée du front d'onde de 1h50min pour Sainte-Croix et 1h30min pour Esparron/Gréoux.

On peut noter qu'aucune installation nucléaire ne serait concernée et l'accès au Centre resterait possible par les portes annexes.

5.2.1.2. Analyse des conséquences d'une rupture du Canal de Provence consécutive à un séisme sur Cadarache

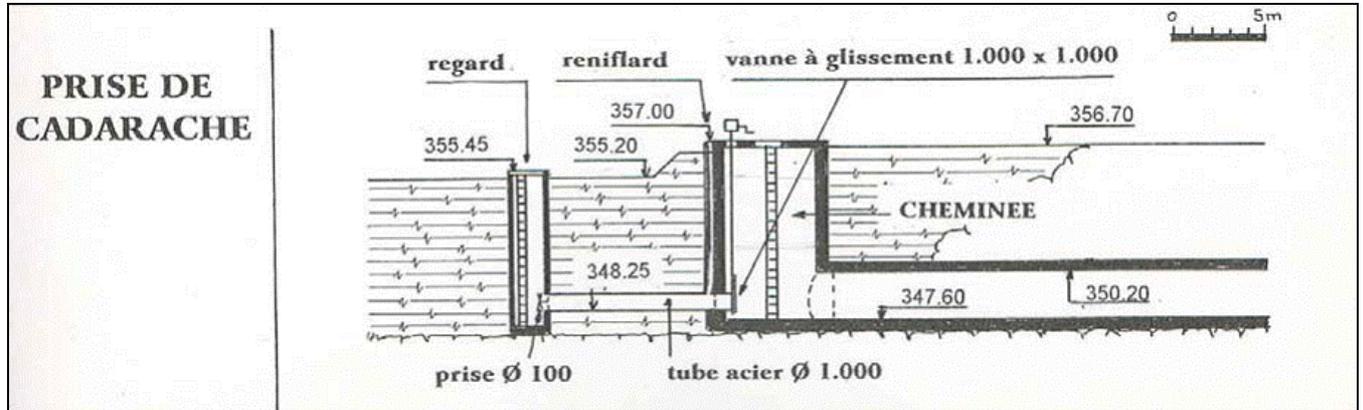
5.2.1.2.1. Description des ouvrages du canal de Provence

Le Canal de Provence est alimenté, via le canal mixte EDF/SCP, par la retenue de Gréoux-les-Bains. En aval du canal mixte, dans la cuvette de Boutre, démarrent les ouvrages SCP : un canal d'aménée à ciel ouvert et ensuite une galerie enterrée.

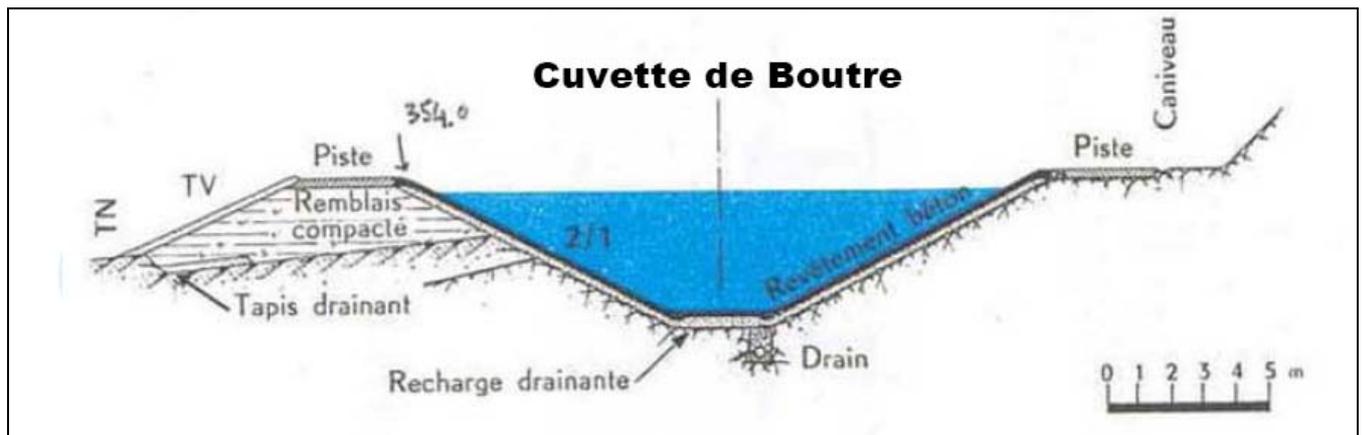


Le profil en long de la galerie fait apparaître une prise au niveau de Cadarache initialement construite pour alimenter le centre, cette prise est aussi appelée prise du « Médecin ».

Cette prise est une galerie « dérivée » ascendante de la galerie du Canal de Provence elle est située dans une zone où le terrain naturel (TN) est à la côte 357 m NGF et le radier du puits est à la côte 347,60 m NGF.



Au niveau de Boutre (canal à ciel ouvert d'alimentation de la galerie enterrée), le niveau des plus hautes eaux (canal à l'arrêt) est à la côte 353,70 m NGF avec des berges à 354 m NGF en point haut.



La côte piézométrique dans le puits du Médecin évolue de la manière suivante :

- canal est à l'arrêt : 353,7 m NGF
- débit maxi : 350,7 m NGF.

Le niveau piézométrique du puits du médecin ne peut hydrauliquement pas dépasser la côte 353,70 m NGF celle-ci correspond en effet au niveau maximum d'exploitation du canal dans la cuvette de Boutre.

Le profil géologique autour du puits du Médecin est constitué à partir du terrain naturel (357,2 mNGF) d'un horizon de cailloutis à matrice argileuse sur une puissance d'environ 2m puis, à partir de la côte 353 mNGF de calcaires beiges. Le niveau piézométrique a été relevé, hors période pluvieuse, à la côte 343,7 mNGF.

5.2.1.2.2. Analyse du risque inondation par les ouvrages du Canal de Provence

L'analyse cartographique permet de limiter le risque d'inondation externe du centre de CADARACHE par le canal de Provence, uniquement à la zone de la prise du Médecin ; il s'agit en effet du seul secteur traversant le bassin versant du Ravin de la bête.

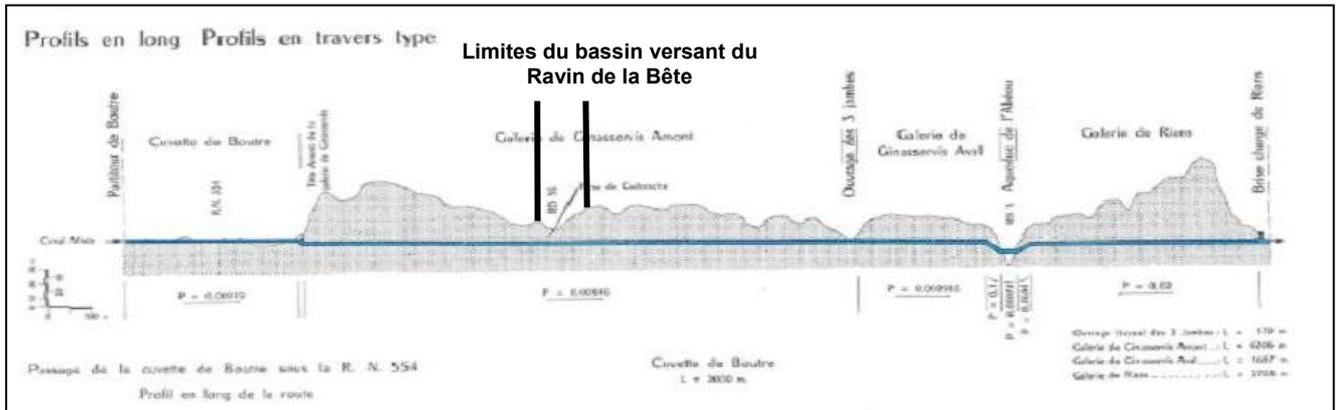


Figure 35

Le profil fait apparaître des profondeurs relativement importantes pour le canal. Dans le secteur retenu, seul l'ouvrage du Médecin apparaît le plus proche de la surface et, de plus, situé dans la partie amont du vallon du ravin de la Bête.

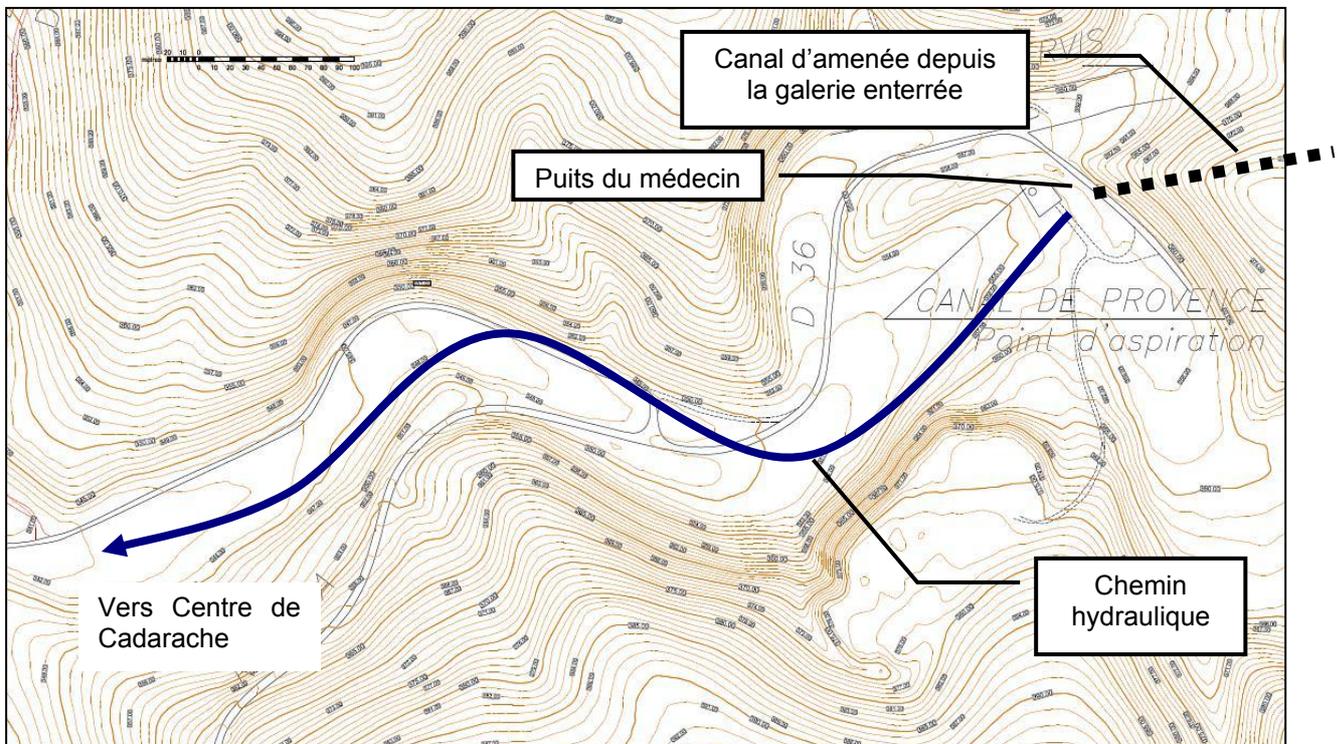


Figure 36

Par conséquent, l'aléa retenu pour analyser le risque inondation sera limité à l'analyse du puits du Médecin et de son canal d'amenée.

L'analyse a porté sur la prise en compte exhaustive des scénarios pouvant conduire à la génération d'un débit de fuite mobilisable dans le vallon du ravin de la Bête pour ensuite, par ruissellement, impacter le centre de Cadarache. Les scénarios de fuite suivants ont alors été identifiés :

1. Débordement du puits du médecin
2. Fuite par rupture guillotine sur la galerie d'amenée
3. Fuites par dégradation du puits

5.2.1.2.2.1. Débordement du puits du Médecin

La galerie est mise en charge par le canal maître qui est à ciel ouvert au niveau de cuvette de Boutre et dont les berges sont à la côte 354 mNGF.

La mise en charge du canal d'alimentation de la galerie est donc limitée à cette côte, au-delà, le canal se déverserait dans la cuvette de Boutre.

Le scénario par débordement du puits peut donc être exclu sur des considérations topographiques : le haut du puits est 3m plus haut que les berges du canal de Boutre.

5.2.1.2.2.2. Effacement du puits du Médecin

La galerie d'amenée est enterrée dans les calcaires entre 7 et 9 m de profondeur et la piézométrie interne fluctue entre 4 et 7 m de profondeur.

La mobilisation en surface d'un débit de fuite qui ruissèlerait vers le centre nécessiterait un effacement du puits et des terrains entre la côte 353 mNGF et la côte 347 m NGF.

L'observation topographique montre qu'il faut s'éloigner, au minimum de 300 m en aval du puits, pour que le terrain naturel soit à la côte du radier du puits (voir graphique ci-dessous). Cette distance est la plus défavorable car elle correspond exactement au cheminement hydraulique du fond de vallon. Dans toutes les autres directions, la topographie ascendante ne permet pas de mise à l'air libre.

Profil du terrain naturel le long du chemin hydraulique du vallon du ravin de la Bête à partir du puits du médecin

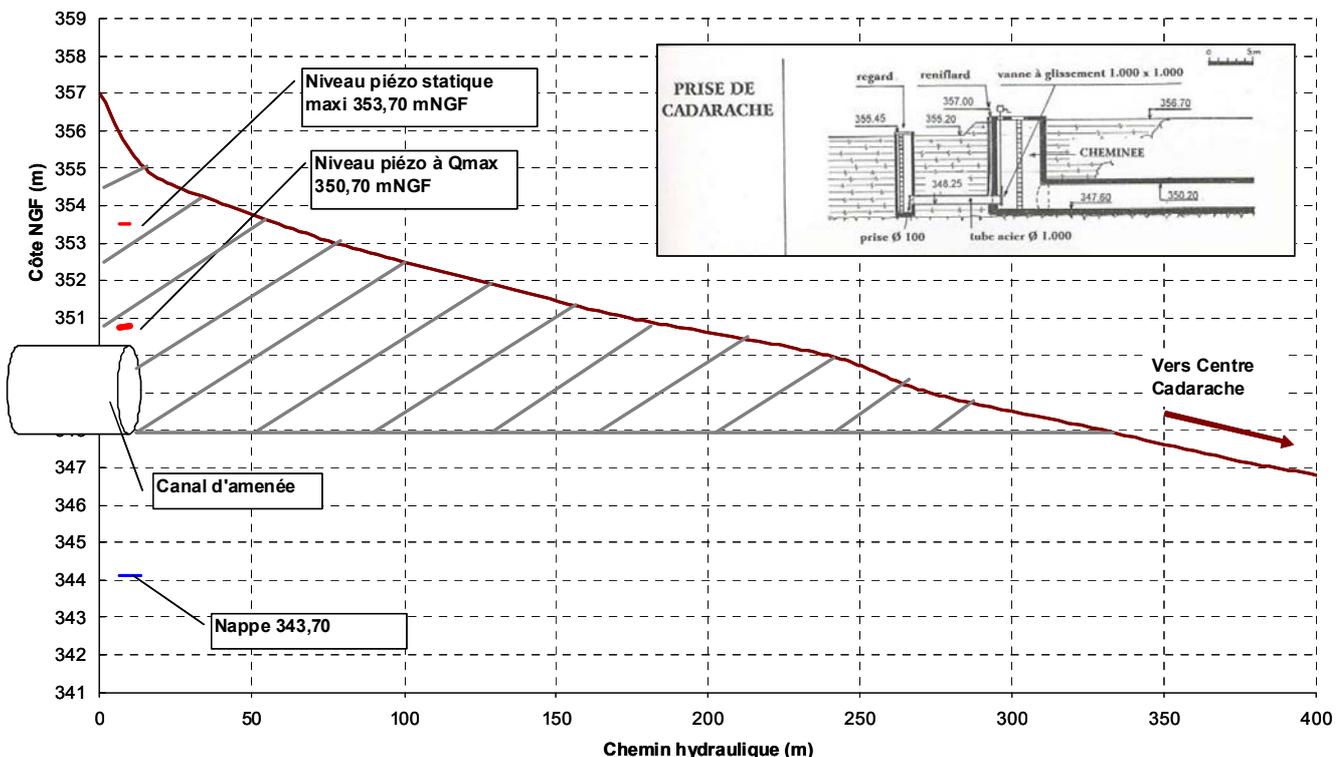


Figure 37

Le scénario pouvant conduire à une ouverture des terrains au droit de la galerie d'amenée avec décalage des terrains à l'aval sur une longueur de 300 m serait celui du jeu d'une faille active dont le rejet serait de plusieurs mètres (entre 4 et 9m). Ce scénario n'a pas été retenu compte tenu du contexte sismique local qui ne permet pas d'envisager des déplacements co-sismique supérieurs au décimètre.

Afin d'évaluer l'impact de l'effacement du puits, sur la piézométrie locale, nous avons considéré un scénario considérant l'effacement total du puits sans modification du profil du terrain. L'objectif de cette évaluation est de vérifier l'impact piézométrique de ce scénario qui mobiliserait une partie des eaux en surface par remontée de la ligne piézométrique.

Le calcul réalisé en fonction des données disponibles permet de caractériser l'évolution piézométrique en aval de la galerie du Médecin en considérant que toute la charge disponible dans la galerie est disponible pour l'aquifère, soit une hauteur piézométrique « imposée » correspondant à la cote 353,70 m NGF.

Cette considération permet :

1. de garantir que les flux vers l'aquifère sont uniquement limités par ses propres capacités (perméabilité/porosité efficace),
2. de majorer le débit du canal d'amenée car, quelle que soit la valeur de débit transféré vers l'aquifère, la charge piézométrique reste constante, ce qui, en réalité, n'est pas le cas (chute rapide à 350,3 mNGF)
3. de n'imposer aucune « perte de charge » ou « perméabilité » pour l'ouvrage du Médecin.

Une telle considération permet de simuler un effacement total du puits du Médecin.

Si la piézométrie calculée est supérieure à la cote du terrain naturel en aval du puits du Médecin, alors une partie des eaux de fuite pourrait être considérée comme mobilisée en surface et devrait alors être considérée comme source potentielle de risque d'inondation.

Les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère ont été considérées constantes avec des valeurs enveloppes : 10^{-3} m/s pour la conductivité hydraulique et 30% de porosité efficace.

Le graphique ci-après montre les différentes lignes piézométriques en aval du poste du médecin en fonction des différentes hypothèses retenues pour le gradient de la nappe (autour de 2% correspondant à la topographie locale) et du niveau de base au niveau du puits (343,70 mNGF +/- 2m).

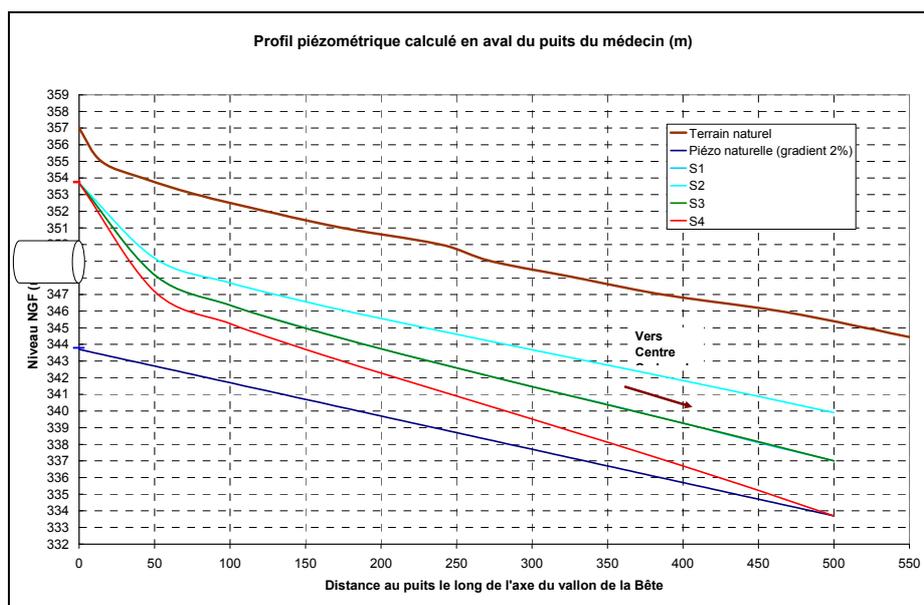


Figure 38

Les calculs font apparaître une évolution piézométrique en 2 phases pouvant s'expliquer par les phénomènes suivants successivement prépondérants :

- Forte chute piézométrique sur les 50 premiers mètres où les eaux de fuite rejoignent le niveau piézométrique de base située plusieurs mètres en dessous,
- Dissipation plus lente au dessus du niveau piézométrique.

Dans tous les cas simulés, la surface n'est jamais atteinte. Il n'y a pas donc lieu de retenir un scénario d'inondation externe de surface par dégradation sur les ouvrages constitutifs du puits du Médecin.

5.2.1.2.2.3. Fuites par dégradation du puits

Si l'effacement total du puits devant la galerie d'amenée apparaît improbable, des dégradations de type fissuration entraînant des débits de fuites ne peuvent pas être exclues.

Dans ce cas, les débits en jeu seraient limités aux débits de fuite des ouvrages entre les côtes 353, 70 et 347.60 mNGF. Immédiatement après avoir traversé des parois de l'ouvrage, les eaux de fuite seraient tenues par la perméabilité des terrains environnants. Cette perméabilité fait chuter la piézométrie et dévie les eaux de fuite vers la nappe sous-jacente (343 m NGF).

Si localement le taux de fracturation du calcaire évolue et des karsts sont présents, ils serviront de drains verticaux aux eaux de fuite

5.2.1.2.2.4. Synthèse de l'analyse sur la dégradation des ouvrages de la prise du Médecin

L'analyse du risque inondation par les ouvrages du Canal de Provence a donc montré que la dégradation des ouvrages de la prise du Médecin n'était pas susceptible de générer un débit de fuite mobilisable dans le vallon du ravin de la Bête.

On peut noter par ailleurs, que des ouvrages situés en amont et en aval de la prise du Médecin présentent une vulnérabilité plus importante que celle du puits du Médecin, leur rupture conduirait à l'écoulement des eaux du canal de Provence dans des bassins versant sans rapport avec celui de Cadarache ; il s'agit :

- Du canal de Boutre

Au niveau de la plaine de Boutre située au nord du Centre de Cadarache, le canal d'alimentation de la galerie enterrée) est à ciel ouvert ; en cas de séisme, la rupture de la berge du canal aurait pour conséquence le déversement des eaux du canal dans la plaine de Boutre sans conséquence pour le Centre de Cadarache

Canal de Boutre



- **De l'aqueduc de RIANs**

En aval de la galerie dérivée, entre Saint Paul Lez Durance et Rians, le Canal de Provence traverse la vallée de l'Abéou au moyen d'un aqueduc (à 4,6km à l'aval de la galerie dérivée). Cet aqueduc est posé sur patins et est raccordé de part et d'autre à la galerie enterrée. Cet ouvrage présente un niveau de faiblesse plus important que la prise du Médecin face à un séisme qui toucherait Cadarache.

En tant qu'aqueduc aérien, son effacement complet apparaît comme un scénario bien plus probable et, par sa position aval sur la galerie principale, il créera un appel de débit et le dénoyage de la prise du Médecin, ainsi que l'écoulement des eaux du canal dans la vallée de l'Abéou à l'extérieur du Centre.

5.2.1.2.2.5. Réseau d'alimentation en eau de refroidissement du RJH

Le seul ouvrage hydraulique qui peut potentiellement impacter le RJH en cas de rupture est le réseau d'alimentation en eau de refroidissement. Les autres infrastructures hydrauliques sont trop éloignées pour affecter l'installation.

Ce réseau est destiné à l'alimentation du RJH, du RES, d'ITER et de la Station d'eau potable du Centre de Cadarache. Il sera réalisé d'ici à l'horizon 2015.

Ce réseau sera raccordé sur les ouvrages de la Société du Canal de Provence, au niveau de la prise dite du Médecin. Le réseau d'eau brute est un réseau gravitaire en charge enterré cheminant le long du Ravin de la Bête.

A proximité du RJH, un poste de distribution d'eau brute est mis en place (côte 301 mNGF) pour le comptage, l'isolement et les dispositifs de protection des réseaux. Le réseau d'alimentation en DN1500 évolue vers une conduite en DN 1400 pour le RJH et un départ en DN700 pour les autres installations.

En aval du poste de livraison, la conduite d'eau brute remonte vers le bâtiment filtre (côte TN 308 mNGF). Au niveau du bâtiment filtre, la conduite d'alimentation est successivement réduite à un DN 1200 à l'entrée, puis à un DN 900 avant entrée dans le BMR.

En parallèle de la conduite d'alimentation se trouve la conduite de rejet des eaux de refroidissement qui évacue les eaux après traversée des échangeurs tertiaire.

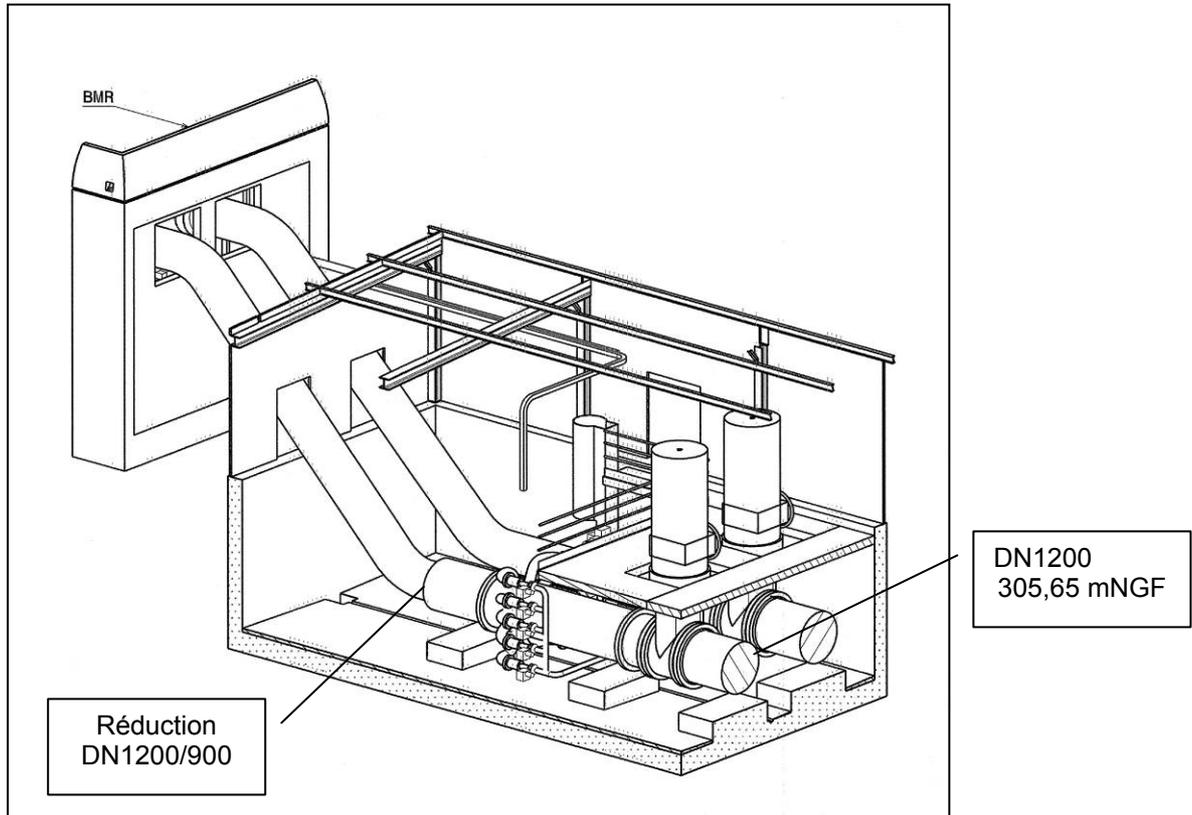


Figure 39 :
Schéma de la fosse à filtre située à proximité du BMR

La charge piézométrique amont dans la conduite est assurée par les ouvrages du canal de Provence dont la régulation est assurée par un maintien à niveau constant d'un canal ouvert à la côte 353,70 mNGF. En statique la charge dans les conduites est donc d'environ 5 bar. En dynamique, le réseau a été dimensionné pour assurer au débit nominal de 3,12 m³/s la traversée des échangeurs tertiaire, nécessitant 31 mCE à la côte 308 mNGF. Après la traversée des échangeurs tertiaire, toute la charge est consommée et l'eau s'écoule gravitairement à partir d'un bassin de mise en charge dans la conduite de rejet.

Compte tenu des éléments présentés ci-dessus, il est proposé de retenir comme scénario d'inondation externe la rupture d'ouvrage par séisme qui produira le débit de fuite le plus important dans le périmètre immédiat de l'installation.

Il s'agit donc d'une rupture sur la conduite d'alimentation avant l'entrée dans la galerie des filtres sur la conduite en DN 1400, juste avant réduction 1400/1200.

En effet :

- une rupture en amont hydraulique jusqu'au poste de livraison serait topographiquement plus basse et trop éloignée pour impacter le RJH, les eaux de fuite seraient immédiatement drainées vers le ravin de la Bête,
- une rupture en aval réduirait le débit de fuite par la perte de charge singulière des réductions, la réduction de diamètre et la remontée vers le BMR,
- une rupture sur la conduite de rejet limiterait le débit de fuite par la perte de charge nécessaire à la traversée des échangeurs,
- la rupture dans le BMR est traitée au § 5.2.2.

Il est à noter que ce scénario n'est pas le plus probable car ce point n'est pas un point singulier de la conduite d'alimentation.

La charge disponible dans la conduite permet d'évaluer un débit de fuite au point retenu (DN 1400 à la cote de 305,65 mNGF) **stabilisé à 9 m³/s**. Ce débit est évalué avec l'hypothèse d'une rupture de type guillotine sans charge aval. La rugosité de la conduite sur l'intégralité du tracé est celle d'une conduite neuve, valeur de 0,25 mm.

Enfin, pour la suite de l'étude, il sera considéré que tous les dispositifs de sectionnement automatiques et secourus ne sont plus opérationnels.

Nota : à titre de comparaison, les débits de fuite évalués sur les mêmes hypothèses mais au niveau du poste de livraison sont les suivants :

- En amont immédiat du poste, le débit maximal est de 14 m³/s,
- En aval immédiat du poste, le débit maximal est de 12 m³/s.

Pour ces deux cas de figure, le débit maximal sera très rapidement limité à environ 10 m³/s, ce qui est cohérent avec le résultat ci dessus.

5.2.2. Rupture d'une conduite des eaux de refroidissement à l'intérieur du local BMR

Le bâtiment des réfrigérants BMR abrite :

- Les canalisations du circuit RST de réfrigération tertiaire,
- les circuits secondaires de réfrigération normale RSS, RSE, RSD, EPB,

Dans la suite de l'étude, le scénario retenu sera une rupture sur l'un des circuits énoncés ci-dessus.

Les circuits secondaires de réfrigération contiennent un volume total de 198 m³ d'eau (180 m³ RSS, 12 m³ RSE, 3 m³ RSD et 3 m³ EPB). Le local BMR dispose d'une capacité de rétention de 200 m³ permettant de contenir les eaux épanchées en cas de brèches simultanées sur l'ensemble des circuits secondaires, évitant l'inondation des locaux voisins et notamment de la galerie BMN.

Le BMR est implanté sur une plateforme à la cote 308 mNGF. En cas de rupture de la canalisation RST à l'intérieur de ce local, les eaux s'évacuent de manière gravitaire vers le local filtre situé à la cote 303,5 mNGF au travers d'ouvertures implantées en partie basse du local. La section de passage des ouvertures autorisent un débit d'évacuation de 7 m³/s. .

La jonction entre la galerie BMN et l'UN, située à la cote 308,43 mNGF, est surélevée par rapport au local BMR (cote 308 mNGF). Au sol de la galerie BMN, une forme de pente et un muret de 0,45 m de haut, perpendiculaire à la galerie, favorisent l'écoulement vers le BMR. Les traversées vers l'UN des canalisations de fluides et des câbles électriques sont surélevées par rapport au sol de cette galerie et rebouchées afin de maintenir une étanchéité empêchant les infiltrations.

Bien que les dispositions constructives précitées excluent les écoulements vers l'UN, l'hypothèse est faite dans la suite de l'étude qu'une partie de l'eau s'évacue vers la galerie BMN de liaison entre le BMR et l'UN.

L'eau pourrait s'écouler vers :

- l'encuvement de l'UN, suite à une perte d'étanchéité au niveau du joint de dilatation entre l'UN et la galerie BMN. L'écoulement s'effectue de façon gravitaire vers la conduite de liaison avec le ravin de la Bête (Cf paragraphe 4.1.2).
- l'intérieur de l'UN, suite à une perte d'étanchéité au niveau des traversées des canalisations fluides ou des câbles électriques, inondant le niveau -3 du BUA. Les EIS présents dans ce niveau sont implantés à des hauteurs suffisantes pour ne pas être agressés par une inondation de la ZRF venant du BMR car compte tenu des altimétries du BMR, de la galerie et de la ZRF, le niveau d'eau atteint dans la ZRF ne pourrait pas dépasser une dizaine de centimètres.

5.2.3. Points faibles et effet falaise

Le positionnement en partie basse de la fosse des filtres et du BMR associé à des fortes pentes de voiries favorise l'évacuation gravitaire des eaux directement vers le Ravin de la Bête.

Après dissipation de l'énergie dans la zone située entre le bâtiment filtre et le BMR, les eaux de fuite s'évacueront de manière gravitaire par la voirie d'accès au BMR, en direction de la rocade sud. Elles seront ensuite drainées vers le ravin de la Bête. Il est à noter qu'il n'est pas identifié, sur le cheminement des eaux, d'infrastructures qui pourraient être des obstacles à l'écoulement en cas de chute/ruine après séisme.

Une estimation de la lame d'eau au niveau des voiries (point de rétrécissement) donne une hauteur de l'ordre de 25 cm, évaluées avec les hypothèses suivantes :

- Strickler de 50 pour la voirie d'accès au BMR (valeur pénalisante),
- Largeur de voirie : 10 m,
- Pente : 3%.

Une cartographie schématique de zone inondée est présentée en page suivante.

Les conséquences sont limitées à des éventuels problèmes de circulation limités à des véhicules légers, à un isolement du poste diesel prévu sur la plateforme devant le BMR et des potentielles entrées d'eau dans le bâtiment BMX.

Les autres zones de l'installation restent hors d'eau et accessibles par tous les moyens usuels. Le poste d'accès normal étant susceptible d'être inondé, un autre portail est prévu côté nord-ouest.

Il n'y a donc pas d'effet falaise identifié vis-à-vis du risque de rupture d'une conduite des eaux de refroidissement à l'intérieur du local BMR.

5.2.4. Dispositions envisagées pour prévenir ces effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de la conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles...)

Bien qu'il n'y ait pas d'effet falaise identifié, la conception peut être rendue plus robuste avec les modifications suivantes :

1. Déplacement du diesel de disponibilité vers une zone hors zone de ruissellement,
2. Adaptations locales des VRD 2nd phase de façon à améliorer l'évacuation de l'eau vers le Ravin de la Bête.

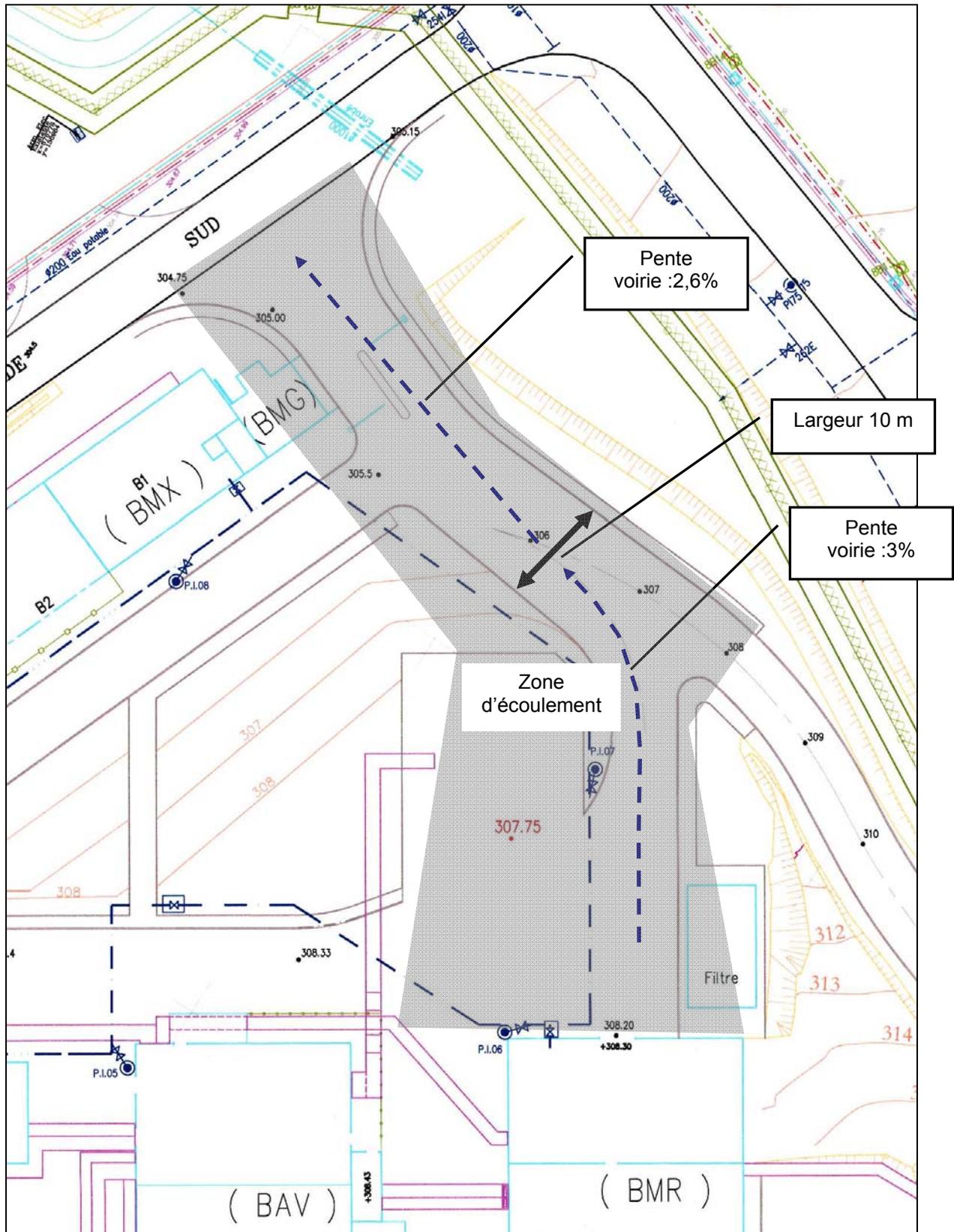


Figure 40 :
Cheminement hydraulique des eaux de fuite

6. Perte des alimentations électriques et perte des systèmes de refroidissement

6.1. Perte des alimentations électriques externes

6.1.1. Dispositions de conception de l'installation tenant compte de cette situation, moyens de secours prévus et conditions de mise en œuvre

Le RJH reçoit l'énergie électrique depuis le réseau du centre CEA Cadarache via deux postes de livraison (PDL) implantés sur la plateforme IRE.

L'énergie est ensuite acheminée en HT vers le bâtiment BAV pour être distribuée vers les autres bâtiments dont l'UN.

En cas de perte du réseau 15kV normaux issu des PDL A et B, les réseaux suivants sont automatiquement sollicités :

- Le Diesel de disponibilité DS alimente en secours une partie du réseau prioritaire (MEPA),
- Les 2 Diesels de sauvegarde DAS alimentent chacun une voie (voies A et B) du réseau de sauvegarde (MEQ),
- Les 2 sources d'ultime secours SUS A et B constitués d'onduleurs et de batteries, alimentent chacune une voie du réseau de sauvegarde (MEU).

On distingue 2 situations de manque de tension :

MDT (Manque De Tension) correspondant à la perte des réseaux normaux et normaux prioritaires avec reprise des réseaux de sauvegarde sans défaillance des diesels de sauvegarde (MES), les SUS A et B étant également opérationnelles.

MDTG (Manque De Tension Généralisé) correspond à un manque de tension des réseaux normaux et normaux prioritaires, ainsi que la défaillance avérée des 2 diesels de sauvegarde DAS A et B.

Dans cette situation une partie des réseaux de sauvegarde est reprise en situation ultime depuis les SUS A et B du réseau (MEU).

Un groupe mobile peut être raccordé en remplacement d'un DAS défaillant ; cette opération implique l'acheminement d'un groupe électrogène externe au RJH ainsi que son raccordement sur l'un des coffrets prévu à cet effet.

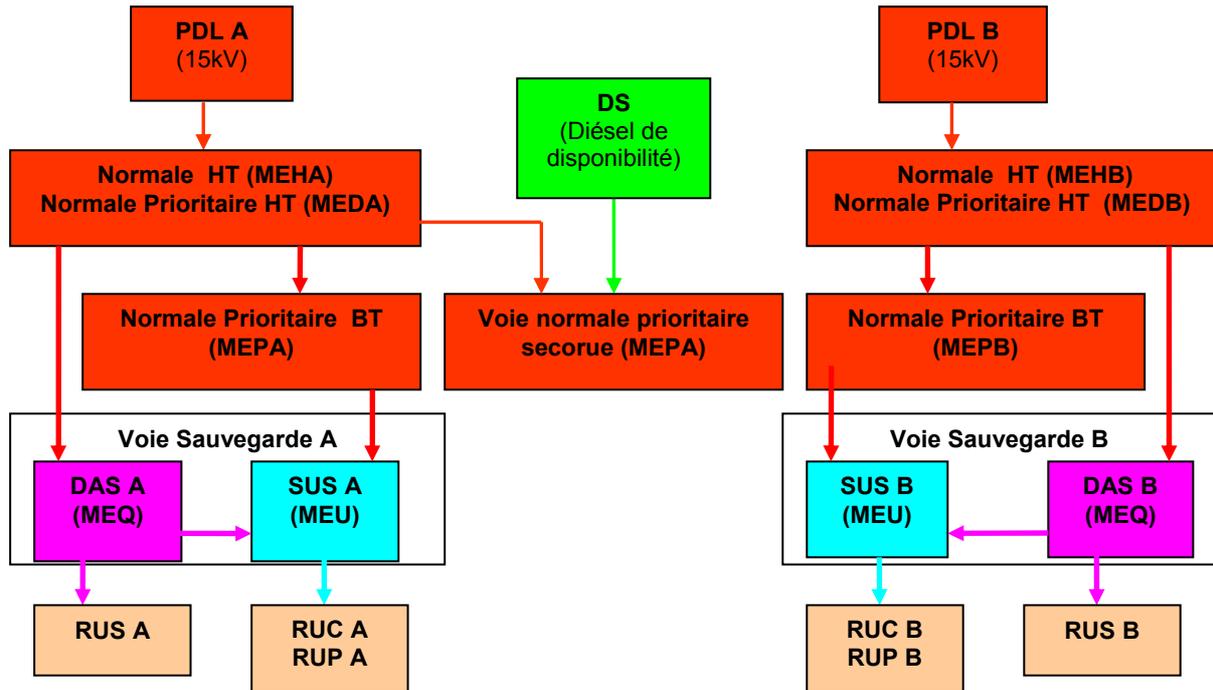


Figure 41 : Alimentation de Sauvegarde

Descriptif du réseau prioritaire secouru (MEP)

Le réseau MEP est scindé en 3 circuits :

- Les 2 premiers (MEP voie A et MEP voie B) sont uniquement alimentés depuis les réseaux prioritaires HT MED A et B.
- Le 3ème circuit, Normal prioritaire secouru (MEPA) est alimenté, soit par le réseau MED, soit, en cas de manque de tension du réseau MED, depuis le diesel de disponibilité (DS). Ce diesel de disponibilité est implanté à proximité du BAV, au sein du bâtiment BAD.

Le diesel de disponibilité (DS), non classé EIS ni séisme, dispose d'une puissance de 1,5 MVA, son démarrage est automatique suite à un manque de tension du réseau prioritaire (perte du réseau 15 kV).

Les actionneurs alimentés par le réseau MEP ne concernent pas les équipements de sauvegarde, ils intéressent la disponibilité de l'installation (levage, ascenseurs, éclairage, effluents, trappes, portes, télémanipulateurs, tableaux zone CEDE, compresseurs d'air...).

Nota : un groupe mobile pourra être raccordé en remplacement du groupe de disponibilité (MER) défaillant. Cette opération implique l'acheminement d'un groupe électrogène externe au RJH ainsi que son raccordement sur le coffret prévu à cet effet.

Descriptif des réseaux de sauvegarde (MEQ et MEU)

Les générateurs électriques sont constitués de groupes électrogènes pour le réseau MEQ et d'onduleurs batteries (SUS) pour le réseau MEU.

Ces équipements sont installés dans 2 voies A et B redondantes et ségréguées. Ils sont implantés dans 2 bâtiments BAS A et B volontairement éloignés l'un de l'autre et positionnés sur des altimétries différentes en périphérie de l'UN.

Tous les équipements constituant ces réseaux sont classés séisme SO/O (maintien de l'opérabilité pendant et après séisme).

Les bâtiments BAS A et B, les galeries de liaison avec l'UN (BAG A et B), ainsi que les réseaux et les tableaux de distribution jusqu'aux actionneurs, sont conçus pour résister au séisme.

Le réseau de sauvegarde (MEQ) dispose pour chaque voie d'une source de secours classée EIS2, SO/O, constituée d'un **groupe diesel de sauvegarde** (MES) d'une puissance de 1,5 MVA, à démarrage automatique suite à *un manque de tension du réseau prioritaire* (perte du réseau 15 kV).

Le réseau de sauvegarde (MEQ) assure l'alimentation des équipements réalisant des actions nécessaires à mettre et à maintenir en état sûr l'installation et les dispositifs expérimentaux en situations accidentelles y compris la conduite et la surveillance de ces actions (conduite accidentelle et post-accidentelle). Le réseau de sauvegarde assure également l'alimentation des équipements réalisant les actions nécessaires après un séisme.

Chaque BAS est équipé de deux tableaux principaux délivrant une alimentation vers les tableaux BT des équipements de sauvegarde implantés dans le BAS et BUA. Ces tableaux assurent l'alimentation des équipements :

- Classés EIS2

SUS A et B réseau ultime secours (MEU), les chargeurs MAQ 1, 2, 3 (CIQ), le traitement d'air locaux électriques, les auxiliaires des DAS, les vannes d'isolement bloc eau et confinement enceinte BUR, ventilation d'extraction BUA, la ventilation salle de commande et de replis, le groupe de production d'eau glacée (liste non exhaustive).

- Classés EIS 3

Le réseau (CIC) radioprotection classé, le contrôle commande de service classé et éclairage classé, les vannes d'isolement MDG, pompe EPF, Système d'incendie de l'UN, les vannes d'isolement vers MDG, vannes Isolement bloc eau et confinement BUR, les vannes Isolement échangeurs RPP côté secondaire, Pompe de refroidissement, le système RUS (refroidissement ultime sauvegarde), les aérothermes locaux BAS et BAG A et B (liste non exhaustive).

Condition de mise en œuvre MEQ

En cas de manque tension (MDT) sur les 2 voies A et B du réseau MED, les 2 voies de sauvegarde sont sollicitées.

La détection d'absence tension est envoyée au contrôle commande de sauvegarde qui retransmet l'ordre de démarrage au diesel, cet ordre provoque également le basculement de l'inverseur la voie prioritaire vers la voie sauvegarde.

Si seulement une voie prioritaire est hors tension, par exemple suite à défaillance d'un PDL, alors seul le DAS de la voie concernée sera mis en service.

Durant la première ½ h après le MDT, le contrôle-commande de sauvegarde interdit le retour sur le réseau prioritaire et l'arrêt du diesel même si le réseau prioritaire est rétabli.

Descriptif du réseau ultime secours SUS A et B (MEU)

Le rôle du réseau d'ultime secours est d'alimenter des actionneurs BT de sauvegarde participant à l'évacuation de la puissance résiduelle à court terme (RUC, RUP, pompe ultime, vannes de convection naturelle, classés EIS 2), ainsi que leurs fonctions support (ventilation, éclairage, ...).

Ce réseau est constitué de deux sources ultimes secours (batteries et onduleurs), classée EIS2 et SO/O.

Ces deux SUS A et B sont implantées au sein des bâtiments BAS A et B, dans des locaux différents des diesels de sauvegarde (secteur feu).

Pour des raisons de maintenance et de charge au sol, les batteries sont implantées au RDC et les tableaux électriques à l'étage des bâtiments BAS.

Les alimentations électriques desservant les tableaux d'ultime secours transitent par les galeries BAG A et B.

La SUS A (MEUA) alimente

- les balises de radioprotection de la cheminée
- les pompes RUC et RUP voie A
- les 2 vannes motorisées RUP
- les vannes de convection naturelle haute et basse
- l'éclairage de sauvegarde et la salle de conduite
- le conditionnement d'air des locaux SUS A
- quelques vannes de confinement BUR et isolement bloc eau
- quelques vannes RPK et RSD

La SUS B (MEUB) alimente

- les balises de radioprotection de la cheminée
- les pompes RUC et RUP voie B
- les 2 vannes motorisées RUP et RUC
- la pompe de brassage ultime et sa vanne d'isolement
- quelques vannes d'isolement RSD
- l'éclairage de sauvegarde du poste de repli
- le conditionnement d'air des locaux SUS B

Condition de mise en œuvre MEU

Les SUS sont constamment en service et assurent une alimentation permanente des réseaux MEU, quelle que soit la configuration du réseau amont (présent ou absent).

Durant la première heure après MDT, les batteries des sources ultimes sont utilisées pour l'alimentation des équipements listés ci-dessus.

A l'issue de cette première heure, les actionneurs concernés sont aiguillés automatiquement via l'inverseur statique des SUS, vers le réseau MEQ (diesels de sauvegarde) sans interruption du fonctionnement des actionneurs.

La réserve d'énergie (batterie) des 2 sources ultimes est constituée et entretenue par le réseau prioritaire (MEP), la recharge de ces batteries ne se fera qu'au retour de la tension de ce réseau.

La situation MDTG correspond à la perte du réseau prioritaire et à la défaillance des 2 diesels de sauvegarde.

Dans cette situation de MDTG, les sources ultimes assurent, jusqu'à fin d'autonomie, l'alimentation simultanée (voies A et B) des équipements concernés.

Descriptif et condition de mise en œuvre du réseau (CIP)

Ce réseau, redondant voies A et B, est alimenté en situation normale par des onduleurs batteries raccordés sur les réseaux (MEP) A ou B. En cas de MDT ces réseaux basculent sur les réseaux MEP (diesel de disponibilité).

Les actionneurs alimentés par ces réseaux sont non classé EIS :

Contrôle commande normal et radioprotection, contrôle commande de l'usine électrique, pupitre chef de quart, le pupitre conduite normale, pupitres conduite piles et métiers PDR, pupitres expérimentaux et radioprotection non classée (liste non exhaustive).

Descriptif et condition de mise en œuvre du réseau (CIC)

Ce réseau, redondant voies A et B, est alimenté en situation normale par des onduleurs batteries raccordés sur les réseaux (MEP) A ou B. En cas de MDT, le temps de démarrage des DAS, ces réseaux sont alimentés via les batteries des onduleurs puis basculent automatiquement sur les réseaux (MEQ) des DAS.

Les actionneurs alimentés par ces réseaux sont classé EIS 3 :

Pupitre accidentel, clapets coupe-feu du BUA et BUR et systèmes SSI, baie d'acquisition séisme, mécanisme de commande A, contrôle commande ventilation sauvegarde, salle de commande et sale de replis (liste non exhaustive)

Descriptif et condition de mise en œuvre du réseau (CIQ)

Le réseau CIQ est un système composé de trois files ségréguées d'alimentation maintenue par MAQ avec deux voies d'alimentation secourue par diesels de sauvegarde :

1. La file 1 constituée par le MAQ1 est alimentée par la voie MEQA.
2. La file 2 constituée par le MAQ2 est alimentée par la voie MEQB.
3. La file 3 constituée par le MAQ3 peut être alimentée en amont par les deux voies électriques MEQ A et B du RJH (Voie A par défaut, utilisation d'un commutateur de source manuel).
4. L'autonomie de ces alimentations doit permettre au système de protection d'assurer ses fonctionnalités pendant une durée de **6 heures**.

Le système CIQ garantit l'alimentation TBT ininterrompibles du contrôle-commande de sauvegarde.

En fonctionnement normal, les MAQ sont alimentés depuis les réseaux prioritaires par l'intermédiaire des chargeurs.

Sur perte des réseaux prioritaires, immédiatement et sans action manuelle ou automatique, la permanence de l'alimentation des consommateurs du système de protection est assurée dans un premier temps par les batteries. Ensuite par les redresseurs depuis les réseaux de sauvegarde après la reprise de la distribution électrique par les groupes de sauvegarde.

6.1.2. Temps de fonctionnement des alimentations électriques internes sans secours extérieur

Le réseau prioritaire secouru (MEP)

Le diesel de disponibilité MER, réseau prioritaire (MEP) est équipé d'une cuve de 33m³ lui assurant une autonomie de 3,5 jours à puissance nominale soit 1.5 MVA.

Les réseaux de sauvegarde (MEQ)

Les 2 diesels de sauvegarde MES, réseaux de sauvegarde (MEQ), sont équipés chacun d'une cuve de 33M³ assurant pour **chacun des diesels une autonomie de 3,5 jours à puissance nominale soit 1.5 MVA.**

Chaque diesel est également équipé d'une cuve journalière d'environ 1000l, toujours pleine (gavage) assurant ainsi une autonomie de 2h en cas de défaillance des pompes de transfert entre les cuves principales et journalières. Ces cuves journalières sont installées dans le local groupe.

Le réseau de sauvegarde (MEU)

Les 2 sources d'ultime secours sont constituées d'onduleurs et de batteries alimentant chacune une voie du réseau de sauvegarde MEUA et B.

La SUS A a une autonomie de **2 heures** pour l'alimentation des pompes RUP et RUC de la voie A **+ 4 heures** d'autonomie supplémentaire pour l'éclairage de sauvegarde, la manœuvre des vannes de convection naturelle hautes et basses et la climatisation du local SUS...

La SUS B a une autonomie de **2 heures** pour assurer l'alimentation des pompes RUP et RUC de la voie B, de l'éclairage de sauvegarde, le fonctionnement de la pompe de brassage ultime et la climatisation du local SUS...

Le réseau (CIP)

Ce réseau dédié au contrôle commande normal et radioprotection non classé a une autonomie de **1 heure** sur chaque voie A et B, de plus ce réseau peut être alimenté par le réseau (MEPA) diesel de disponibilité.

Le réseau (CIC)

Alimentation de la radioprotection classée, le contrôle commande de service classé et l'éclairage classé a une autonomie de **2 heures** sur chaque voie A et B, de plus les onduleurs qui alimentent ces réseaux sont repris par le réseau (MEQ) diesel de sauvegarde.

Le réseau (CIQ)

Alimentation du contrôle commande réacteur MAQ 1, 2 et 3 a une autonomie de **6 heures** sur chaque voie, de plus les onduleurs qui alimentent ces réseaux sont repris par le réseau (MEQ) diesel de sauvegarde.

6.1.3. Dispositions prises pour prolonger la durée d'utilisation de ces alimentations

Evaluation des marges sur l'autonomie des diesels, critères Puissance et Capacités gas-oil

Marges sur l'autonomie des 3 diesels à Puissance nominale

Les trois diesels ont une Puissance nominale de 1500 kVA (Pn).

Ils disposent chacun des capacités maximales de gas-oil suivantes :

- cuve principale de 33 000 l (contenance utilisable de 30 000 l) pour une autonomie de 3,5 jours à Pn
- en série, une cuve journalière de 1 000 l (contenance utilisable de 900 l) pour une autonomie de 2 heures à Pn

De cette contenance totale utilisable (30900 l cuves pleines), il faut retrancher 2000 l pour les essais périodiques soit 28900 l de capacité de sauvegarde.

Les données du motoriste indiquent une consommation de 320 l/h à Pn, ce qui donne des marges supplémentaires sur les autonomies requises de l'ordre de :

$28900 \text{ l} / 320 = 90 \text{ h}$ d'autonomie au lieu de 84 h requises soit une marge **de 6 heures**.

Marges sur l'autonomie des 3 diesels à Puissance consommée

Dans l'état actuel des études et dans l'attente de la consolidation du Bilan de Puissance par les différents lots consommateurs, la puissance consommée des diesels de sauvegarde est la suivante :

- DAS A = 1279 kVA soit une consommation estimée à 273 l/h
- DAS B = 1210 kVA soit une consommation estimée à 258 l/h
- DS = 1500 kVA (voir la marge estimée à Puissance nominale)

A puissance consommée, les marges supplémentaires sur les autonomies requises seraient de l'ordre de :

- Cuve principale : plus 8 h sur les 84h pour DAS A
- Cuve principale : plus 10 h sur les 84h pour DAS. B

Conclusions :

En cumulant les 2 marges 6 +8 h = **14 h pour DAS A**

En cumulant les 2 marges 6+10 h = **16h pour DAS B**

Fonctionnement en parallèle des RUS, RUC et RUP voies A et B

L'alimentation électrique de la fonction de refroidissement en cas de MDT est assurée par les deux diesels de sauvegarde voies A et B.

Chaque diesel de sauvegarde alimente les actionneurs RUS, RUC et RUP de leur voie pour évacuer la puissance résiduelle du réacteur.

Une seule voie suffit pour assurer 100% de la fonction de refroidissement.

Coffret de raccordement GEM

Chaque diesel peut être suppléé en cas de défaillance par le raccordement de Groupe Electrogène Mobile. Les coffrets de raccordement sont situés au niveau des bâtiments BAS A, BAS B et BAD.

6.1.4. Dispositions envisagées pour renforcer la robustesse de l'installation

Modifications de conception

- **Utiliser le Diesel de Disponibilité (DS) pour remplacer l'un des deux Diesels Alternateur de Sauvegarde (DAS)**

Le remplacement d'un DAS par le DS est déjà prévu dans le cadre du marché, mais la durée de l'opération envisagée est assez longue (sur plusieurs jours).

Pour répondre plus efficacement et rapidement (quelques heures) à la défaillance d'un DAS, il est envisagé de renforcer le DS en le classant SI/O (Système Intègre pendant séisme et opérationnel après séisme), pour qu'il puisse aussi alimenter l'une des voies de sauvegarde.

De plus, pour le protéger d'un éventuel risque d'inondation issu du BMR, ce DS (renommé Groupe d'Ultime Secours (GUS)) sera déplacé sur une plateforme surélevée pour alimenter au choix l'une des voies électriques suivantes :

- voie de sauvegarde A (remplacer le DAS A)
- voie de sauvegarde (remplacer le DAS B)
- voie prioritaire secourue

A noter que les deux DAS A et B gardent la possibilité d'être remplacés par un Groupe Electrogène Mobile.

- **Homogénéiser la puissance des SUS (réf. SUS A à 500kW/h)**

Les SUS A et B ont actuellement des autonomies différentes :

- SUS A et B = 2 heures pour l'alimentation de tous les équipements des tableaux secourus
- SUS A possède 4 heures supplémentaires après l'arrêt des RUC et RUP.

Afin d'augmenter l'autonomie des matériels secourus en voie B, il est proposé d'augmenter la capacité de la SUS voie B pour la rendre identique à celle de la voie A.

6.2. Perte des alimentations électriques externes et des alimentations internes

6.2.1. Perte des alimentations électriques externes et des alimentations de secours conventionnelles

Cette situation correspond, pour le RJH à la perte :

- des réseaux normal et prioritaire (**MED, MEH et MEP non secouru**)
- du diesel de disponibilité (MER) alimentant une partie du réseau prioritaire (**MEP**),
- des 2 diesels de sauvegarde (MES), alimentant les voies A et B de sauvegarde (**MEQ**).

Les SUS, A et B, alimentent les réseaux ultimes de sauvegarde (**MEU**), via les batteries.

Actionneurs alimentés par SUS A (MEUA)

- les balises de radioprotection de la cheminée
- les pompes RUC et RUP voie A
- les 2 vannes motorisées RUP
- les vannes de convection naturelle haute et basse
- l'éclairage de sauvegarde et la salle de conduite
- le conditionnement d'air des locaux SUS A
- quelques vannes de confinement BUR et isolement bloc eau
- quelques vannes RPK et RSD

Actionneurs alimentés par SUS B (MEUB)

- les balises de radioprotection de la cheminée
- les pompes RUC et RUP voie B
- les 2 vannes motorisées RUP et RUC
- la pompe de brassage ultime et sa vanne d'isolement
- quelques vannes d'isolement RSD
- l'éclairage de sauvegarde du poste de repli
- le conditionnement d'air des locaux SUS B

Les MAQ, 1, 2 et 3 alimentent le contrôle-commande de sauvegarde via le réseau CIQ.

Deux onduleurs du réseau de sauvegarde, voies A et B, alimentent via le réseau (**CIC**) :

- la radioprotection classée,
- le contrôle commande de service classé,
- l'éclairage classé.
- Etc.

Deux onduleurs du réseau prioritaire, voies A et B, alimentent via le réseau (**CIP**) :

- la radioprotection non-classée,
- Etc.

Indication sur le temps pendant lequel le site peut faire face à la perte des alimentations électriques externes et des sources d'énergie de secours, sans intervention extérieure
Capacité et autonomie des batteries, voir le § 6.1.2

Actions extérieures prévues

Acheminement et raccordement d'un groupe mobile en remplacement d'un des 2 DAS défaillants :

- A partir des moyens disponibles sur le Centre de CAD (2 X 800kVA) disponibles en 4 heures Cf § 7.
- Un délai de 8 heures à partir des moyens externes au Centre de CAD.

Dispositions envisagées pour prévenir les effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles...)

Cf § 6.1.4.

6.2.2. Perte des alimentations électriques externes et de toutes les alimentations de secours

Cette situation correspond, pour le RJH à la perte :

- Du réseau (MEH) et des réseaux normaux prioritaires (**MED**)
- Du diesel de disponibilité (MER), alimentant une partie du réseau prioritaire (**MEP**),
- Des 2 Diesels de sauvegarde MES, alimentant les voies A et B de sauvegarde (**MEQ**).
- Des 2 SUS A et B, réseau ultime de sauvegarde (**MEU**), fin d'autonomie
 - o Des 3 MAQ
 - o Des 2 CIC
 - o Des 2 CIP

Les 3 MAQ, autonomie 6 heures, alimentent le contrôle-commande de sauvegarde du réacteur :

- | MAQ1 | MAQ2 | MAQ3 |
|--|--|--|
| - Contrôle-commande 1 | - Contrôle-commande 2 | - Contrôle-commande 3 |
| - Pupitre statique post accidentel (SDCI) – alimentation de la signalisation | - Pupitre statique post accidentel (SDCI) – alimentation de la signalisation | - Pupitre statique post accidentel (SDCI) – alimentation de la signalisation |
| - Pupitre statique post accidentel (PDR) – alimentation de la signalisation | - Pupitre statique post accidentel (PDR) – alimentation de la signalisation | - Pupitre statique post accidentel (PDR) – alimentation de la signalisation |

Les 2 CIC, autonomie 2 heures, alimentent:

- | CICA | CICB |
|------------------------------------|------------------------------------|
| - Baie acquisition séisme | - Baie acquisition séisme |
| - Pupitre accidentel SDCI | - Pupitre accidentel SDCI |
| - Pupitre accidentel PDR | - Pupitre accidentel PDR |
| - Armoires réseau de conduite | - Armoires réseau de conduite |
| - Balises de surveillance classées | - Balises de surveillance classées |
| Etc. | Etc. |

Les 2 CIP, autonomie 1 heure, alimentent :

- | CIPA | CIPB |
|--|--------------------------------------|
| Pupitre conduite pile SDCI | Pupitre conduite pile SDCI |
| Pupitre spécialiste métier SDCI | Pupitre Chef de Quart |
| Pupitre expérimentateurs | Pupitre spécialiste métier SDCI |
| Pupitre de dépotage des effluents liquides | Pupitre expérimentateurs |
| Balises de surveillance non classées | Pupitre conduite normale PDR |
| Etc. | Pupitre prélèvement BAG |
| | Balises de surveillance non classées |
| | Etc. |

6.2.2.1. Capacité et durée des batteries

Voir § 6.1.2

6.2.2.2. Indication sur le temps pendant lequel le site peut faire face à la perte des alimentations électriques externes et des sources d'énergie de secours, sans intervention extérieure

Le temps pendant lequel l'installation peut rester sans alimentation électrique, à l'issue de l'autonomie des batteries, est indiqué au paragraphe 6.4.a.

6.2.2.3. Actions extérieures prévues

Voir § 6.2.1

6.2.2.4. Dispositions envisagées pour prévenir les effets falaise ou pour renforcer la robustesse de l'installation (modification de conception, modification des procédures, dispositions organisationnelles...)

Voir § 6.1.4

6.3. Perte du système de refroidissement

Nota : dans ce paragraphe, la perte du système de refroidissement n'est pas associée à la perte du réseau électrique ; ce cas étant traité au § 6.4.

6.3.1. Perte de la source froide principale

La source froide principale est constituée du circuit tertiaire RST.

Ce circuit est décrit dans le § 1.2.6

La dégradation ou la perte de la fonction de réfrigération tertiaire assurée par le circuit RST entraîne une dégradation ou la perte de :

- la fonction de réfrigération du circuit RSS, source froide de l'échangeur RPP / RSS qui est un moyen normal d'évacuation de la puissance issue du cœur,
- la fonction de réfrigération du circuit RSE, source froide de l'échangeur REP / RSE qui est un moyen normal d'évacuation de la puissance des piscines du BUR,
- la fonction de réfrigération du circuit RSD, source froide de l'échangeur dispositif / RSD qui est un moyen normal d'évacuation de la puissance du dispositif,
- la fonction de réfrigération du circuit EPB, source froide de l'échangeur EPA / EPB qui est un moyen normal d'évacuation de la puissance des piscines du BUA (EPU et EPI).

Le circuit RST n'est pas dimensionné au séisme.

Les dispositions de prévention prises au niveau de la conception du circuit sont les suivantes :

- les tuyauteries du circuit RST sont conçues selon les codes de construction industriels.
- les vitesses de circulation de l'eau tertiaire sont limitées pour ne pas générer de risques d'érosion susceptibles de mettre en péril l'intégrité de la tuyauterie,
- le dimensionnement en pression et température 9,5 bars et 45°C du circuit RST,
- la réalisation du circuit en acier inoxydable.

La perte de la source froide externe conduit à l'arrêt du réacteur par arrêt automatique sur paramètre température entrée cœur.

Après l'arrêt du réacteur, deux systèmes de sauvegarde redondants évacuent la puissance résiduelle du cœur et des piscines.

Il n'y a pas d'action extérieure nécessaire en cas de perte de la source froide principale.

6.3.2. Perte de la source froide principale et de la source froide de secours

La réfrigération du cœur est assurée par le circuit RUC/RUP pour bénéficier de l'inertie des piscines.

Le passage en convection naturelle est possible.

L'inertie des piscines permet d'avoir :

- pour le BUR 30 heures avant d'atteindre la température de 70°C prise en compte pour le dimensionnement des cuvelages en situation accidentelle,
- pour le BUA 8 jours avant d'atteindre la température de 60°C prise en compte pour le dimensionnement des cuvelages en situation accidentelle.

Appoint en eau possible par les circuits normaux permettant de refroidir et compenser l'évaporation. A défaut utilisation du circuit REW réalimenté par l'extérieur pour les piscines du BUR.

En ultime secours, la réfrigération des piscines peut également être assurée par le circuit primaire REN de réfrigération de la piscine REE, la source froide étant assurée par le circuit de conditionnement MVO connecté au circuit secondaire RSE.

Les dispositions de prévention prises au niveau de la conception des circuits de sauvegarde sont les suivantes :

Ces moyens bénéficient des dispositions suivantes de conception :

- Les systèmes de sauvegarde sont redondants 2x100 % (voie A / voie B),
- Chaque aéroréfrigérant de secours dispose d'une réserve propre d'eau de 30 m³ ; à l'issue de la consommation de cette réserve d'eau, le faible niveau de puissance restant à évacuer (moins de 700 kW) permet de passer l'aéroréfrigérant en fonctionnement à sec,
- Les circuits et équipements sont dimensionnés au séisme (Cf. § 3.1.2),
- Les deux aéroréfrigérants de secours sont positionnés dans deux bâtiments de sauvegarde, qui sont : séparés, implantés de part et d'autre de l'unité nucléaire, en rehausse par rapport à la hauteur du sol fini, et situés chacun à une altimétrie différente (bénéfice de l'implantation du réacteur en flanc de colline, qui assure par ailleurs une protection naturelle par rapport au risque d'inondation externe Cf. § 4.2),
- L'ordre de démarrage des circuits RUC et RUP s'accompagne de l'ordre de démarrage de la pompe de brassage du circuit primaire (Cf §2.2.1) Cette pompe permet d'assurer temporairement un refroidissement suffisant dans le cas d'un non-démarrage des deux voies du circuit RUC. Pour pouvoir transférer la puissance résiduelle du circuit cœur vers la piscine réacteur, on procède au bout de 20 mn à une ouverture des deux vannes de convection naturelle placées en amont et en aval cœur, puis à un arrêt ultérieur de la pompe de brassage.

- 1 heure et 20 minutes après l'arrêt du réacteur, les vannes de convection naturelle suffisent pour assurer le refroidissement du cœur.

En cas ultime :

- La puissance résiduelle du cœur dans la piscine tombe à moins de 500 kW au bout de 24 h; l'élévation moyenne de température de la piscine est alors de moins de 1°C/h et continue de décroître lentement.
- On dispose de circuits de réalimentation en eau des piscines, dont un circuit ultime permettant une réalimentation des piscines du BUR depuis l'extérieur des bâtiments nucléaires, **par moyen mobile externe** et raccord pompier (circuit REW) ; les piscines du BAN n'ont pas de circuit ultime équivalent mais, compte tenu de la durée de refroidissement des combustibles entreposés, la puissance résiduelle totale des combustibles est ≤ 80 kW.
- Le rétablissement d'une boucle de refroidissement normale ou de secours des piscines (ex : RUP/RUS dimensionnés à plus de 800 kW) permet de ramener rapidement la température des piscines à leur valeur habituelle.

En conclusion :

La perte de la source froide est traitée par conception. On s'appuie sur des moyens de sauvegarde redondants, autonomes et dimensionnés au séisme.
En situation ultime des moyens de secours externes peuvent être mis en place.

- **En termes d'amélioration, il est envisagé de créer 2 piquages sur les circuits RUS. Ces piquages permettront à des moyens externes (camion citernes équipés d'une pompe autonome) d'alimenter en eau froide le circuit RUS sans utiliser la pompe et l'aéroréfrigérant du circuit.**
- **Par ailleurs il est envisagé d'étendre les capacités du circuit REW à la réalimentation des piscines du BUA.**

6.4. Perte du système de refroidissement principal, cumulée avec la perte des alimentations électriques externes et des alimentations internes de secours

a) Gestion de l'installation en fonction des états réacteur

Les circuits énumérés ci-dessous sont présentés au paragraphe 1.2.6 et 1.2.7.

Réacteur en puissance :

Cette configuration correspond aux états réacteur HP, BP-CF, BP-CN et AO-CF présentés au paragraphe 1.2.5. L'état HP réacteur en puissance à 100 MW est enveloppe vis-à-vis de la perte cumulée de la source froide principale, des alimentations électriques externes et des groupes électrogènes de sauvegarde (Cf § 1.2.1). Cette situation de fonctionnement provoque :

- l'AU du réacteur sur ΔP cœur, température entrée cœur et manque tension externe,
- L'arrêt des pompes du circuit primaire RPP à l'issue de leur inertie,
- Le démarrage des circuits RUC/RUP alimentés par les batteries SUS.

Les circuits de sauvegarde RUC/RUP assurent pendant 2 heures l'évacuation de la puissance résiduelle du cœur par convection forcée vers la piscine réacteur

Les vannes de convection naturelle, alimentées par les batteries SUS, sont ouvertes dans ce délai sur la piscine pour assurer l'évacuation de la puissance résiduelle par convection naturelle.

Les circuits RUS, alimentés par les groupes électrogènes de sauvegarde, ne peuvent pas être mis en service, entraînant une élévation progressive de la température des piscines REE/RER et l'évaporation de l'eau. La température de la piscine réacteur atteint 70°C en une trentaine d'heures.

Le raccordement d'un groupe électrogène mobile au coffret de raccordement prévu à cet effet sur chacun des bâtiments BAS, permet de réalimenter les voies de sauvegarde, dont les RUS, pour assurer une surveillance minimale de l'installation et l'évacuation de la puissance résiduelle sur le long terme.

A défaut, la réfrigération des piscines peut également être assurée par le circuit primaire REN de réfrigération de la piscine REE, la source froide étant assurée par le circuit de conditionnement MVO connecté au circuit secondaire RSE.

Cette configuration nécessite la mise en place :

- de liaisons fluides, connectées sur des piquages prévus à cet effet, entre les circuits MVO et RSE
- de 2 groupes électrogène de secours connectés à des coffrets d'alimentation ad'hoc,
- de liaisons électriques pour réalimenter les équipements des circuits REN, RSE et MVO.

Sans réalimentation des tableaux électriques ou sans appoint d'eau en piscine, le dénoyage des éléments combustible est atteint au-delà de 35 jours après l'arrêt du réacteur.

L'appoint en eau des piscines du bâtiment réacteur est effectué par l'intermédiaire des circuits d'appoint d'eau MFP ou, à défaut, par le point de connexion extérieur à l'UN d'appoint d'eau ultime, relié au circuit REW de remplissage et d'appoint d'eau des piscines.

L'autonomie des batteries permet d'assurer une surveillance réduite de l'installation pendant un délai de 6 heures.

Réacteur à l'arrêt, phase de rechargement du combustible en cœur :

Cette configuration correspond à l'état réacteur AO-CN. Dans cet état les vannes de convection naturelle sont ouvertes assurant l'évacuation de la puissance résiduelle vers la piscine du réacteur. La gestion de la perte de la source froide et des alimentations électriques est traitée suivant le point précédent.

Les moyens de manutention utilisés pour le rechargement du cœur sont sécurisés et secourus par le groupe électrogène de disponibilité (MES). En cas de perte des alimentations électriques externes et internes de secours l'élément combustible est maintenu verrouillé sur l'équipement de manutention.

Au retour d'une des alimentations électriques, l'élément combustible est déposé dans son rack d'entreposage.

Réacteur à l'arrêt, phase de maintenance avec baisse de niveau de la piscine

En situation exceptionnelle de maintenance nécessitant la baisse du niveau de la piscine réacteur à - 4,50 m, réacteur à l'arrêt, le dénoyage des éléments combustibles est atteint après 18 jours, en faisant l'hypothèse que la baisse de niveau est faite 5 jours après l'arrêt du réacteur en l'absence de réalimentation des tableaux électriques ou sans appoint d'eau en piscine.

Gestion des piscines du BUA :

Les matières nucléaires irradiées peuvent être entreposées dans les piscines du BUA :

- EPU pour les éléments combustibles usés
- EPT pour les dispositifs expérimentaux

Le refroidissement normal de ces piscines est assuré par les circuits EPA (primaire), EPB (secondaire) et RST (tertiaire).

En cas de perte des circuits de refroidissement normaux, les circuits de sauvegarde redondants EPS A et B permettent d'évacuer la puissance thermique de ces piscines respectivement vers les circuits RUS A et B (Cf paragraphe 1.2.7).

En cas de perte cumulée de la source froide principale, des alimentations électriques externes et des groupes électrogènes de sauvegarde, les circuits EPS et RUS alimentés par les groupes électrogènes de sauvegarde ne peuvent pas être mis en service, entraînant l'élévation progressive de la température des piscines EPU/EPT et l'évaporation de l'eau. La température de 60°C prise en compte pour le dimensionnement des cuvelages en situation accidentelle est atteinte à 8 jours.

Sur le long terme, sans remise en service d'une alimentation interne de secours ou sans appoint d'eau en piscine, le dénoyage des éléments combustible est atteint après plusieurs mois.

b) Renforcement de la robustesse de l'installation

Les capacités EPV situées dans le BUA sont destinées à collecter l'eau issue d'une vidange des piscines. Une mesure d'amélioration envisagée consiste à entreposer en permanence un volume d'eau dans l'une de ces capacités EPV pour assurer l'appoint d'eau des piscines du BUA par les circuits de sauvegarde EPFA et B, après réalimentation des tableaux électriques de sauvegarde voie A ou B.

L'utilisation du diesel de disponibilité pour remplacer l'un des deux diesels de sauvegarde, présenté au paragraphe 6.1.4, permettrait de renforcer la robustesse de l'installation en s'affranchissant du délai de mise en place d'un groupe électrogène mobile de secours.

L'appoint d'eau des piscines du BUA peut être renforcé en créant un piquage entre les piscines du BUA et la ligne de connexion extérieure à l'UN d'appoint d'eau ultime.

7. Gestion des accidents graves

7.1. Mesures de gestion des accidents actuellement en vigueur aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur

Afin de garantir une réactivité optimale en cas de situation d'urgence survenant sur un de ses centres, le CEA s'appuie chaque jour sur un dispositif d'astreinte et de permanence pour motif de sécurité, constitué de personnels prêts à intervenir 24h/24 et à se mobiliser dans les plus brefs délais.

Le CEA organise et participe chaque année à une vingtaine d'exercices de grande ampleur dont certains mobilisent l'ensemble de la chaîne décisionnelle et opérationnelle publique. Ces exercices permettent de tester l'ensemble des chaînes décisionnelle et opérationnelle dont l'efficacité et la réactivité sont essentielles pour assurer la meilleure gestion de la situation d'urgence voire de la situation extrême. Ces exercices permettent d'assurer ainsi l'entraînement des équipes de crise, de mettre à l'épreuve les moyens opérationnels mobilisables, de tester l'organisation de crise décrite dans les plans d'urgence, d'en vérifier l'efficacité et enfin de consolider le dispositif de gestion de crise grâce à l'exploitation d'un retour d'expérience.

Des exercices au scénario orienté pour prendre en compte le retour d'expérience de Fukushima seront proposés, dans le futur, en liaison avec les autorités compétentes.

L'organisation de crise mise en place par le CEA doit permettre de faire face à une crise qui surviendrait sur un ou plusieurs de ses 10 centres. Cette organisation repose :

- au niveau national, sur le Centre de Coordination en cas de Crise (CCC) situé à Saclay (avec repli possible à Fontenay-aux-Roses),
- au niveau local, sur un Poste de Commandement de Direction Local (PCDL) dans chaque centre.

Placé sous l'autorité de l'Administrateur Général du CEA ou de son représentant, le CCC est en liaison étroite et permanente avec le PCDL du centre où la crise est survenue. Le CCC, point de contact des autorités gouvernementales et des responsables des autorités de sûreté nationales, est notamment chargé de superviser et coordonner les interventions du CEA, arbitrer les choix stratégiques et consolider et diffuser l'information vers les pouvoirs publics nationaux, les médias, le personnel CEA.

Des Equipes Techniques de Crise, aux niveaux national et local, ont pour mission, en appui du CCC et du PCDL, de :

- valider le diagnostic de l'accident établi dans les premiers instants de la crise ;
- étudier l'évolution prévisible de la situation, et fournir un pronostic sur l'état de l'installation, les rejets, leurs conséquences dans l'environnement, ainsi que sur les parades envisageables ;
- anticiper les aggravations éventuelles de la situation en les identifiant et en proposant des parades préventives au niveau de l'installation.

7.1.1. Mesures de gestion des accidents actuellement en vigueur sur le centre de Cadarache aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur

7.1.1.1. Moyens de gestion de la situation de crise

Le plan d'urgence interne (PUI) est une organisation de gestion de crise qui est activée en cas d'accident susceptible d'avoir des conséquences nécessitant l'application de mesures qui dépassent le cadre d'action du responsable de l'installation accidentée. Le PUI complète donc les consignes et les dispositions d'urgence de chaque installation en cas d'accident important survenu ou menaçant l'installation. Ces dispositions visent à circonscrire le sinistre, à mettre l'installation dans un état sûr, à secourir et à protéger les personnes et l'environnement, à évaluer les conséquences et l'évolution du sinistre, à informer le personnel, les autorités, les élus locaux.

Les relations entre les divers organismes impliqués dans la gestion de crise sont gérées au travers de protocoles et de conventions :

- Protocole, entre le CEA, l'ASN et l'IRSN, relatif à l'organisation mise en place en cas d'incident ou d'accident affectant une Installation Nucléaire de Base dont l'exploitant est le CEA ;
- Convention particulière, entre le CEA, l'ASN et l'IRSN, relative aux relations entre les équipes techniques de crise en cas d'incident ou d'accident affectant une Installation Nucléaire de base dont l'exploitant est le CEA ;
- Convention entre le CEA et la Préfecture relative aux modalités d'information réciproque et de concertation pour l'alerte de la population implantée dans le périmètre d'application du PPI et l'information du public ;
- Convention, relative aux modalités d'intervention des secours extérieurs sur le Centre de Cadarache, entre le SDIS 13 et le CEA.

Le Plan Particulier d'Intervention (PPI) est une organisation de gestion de crise qui est activée en cas d'accident susceptible d'avoir des conséquences à l'extérieur d'un site industriel ou nucléaire important ; il est placé sous la responsabilité du Préfet qui organise l'intervention des secours pour la protection de la population et de l'environnement à l'extérieur du site.

7.1.1.1.1. Risques liés à l'environnement industriel

L'emplacement du Centre de Cadarache a été choisi en grande partie pour des raisons d'éloignement des grandes agglomérations et des grands centres industriels. De fait, les concentrations industrielles importantes se situent à plus de 50 km (usine chimique Arkema à Saint-Auban, Sanofi à Sisteron, les industries situées au sud et à la périphérie de l'Etang de Berre)

Dans un rayon de 20 km autour du Centre se sont développées des zones industrielles de taille plus modeste qui accueillent beaucoup de sous-traitants du CEA. Elles sont situées à Saint-Paul-lez-Durance et Vinon-sur-Verdon, mais aussi à Manosque et Sainte-Tulle dans les Alpes de Haute-Provence. On y trouve des entreprises spécialisées en mécanique de précision, en électronique ainsi qu'en traitement de déchets.

L'activité industrielle la plus importante de la vallée de la Durance concerne la production et la distribution d'énergie hydroélectrique par un ensemble hydraulique comprend 18 centrales représentant une puissance de 2000 MW, les centrales les plus proches étant situées à Sainte-Tulle, Beaumont-de-Pertuis et Jouques.

Il est à noter également à Manosque la présence d'un site de stockage souterrain pour les hydrocarbures ou le méthane dans des cavités de sel. La liaison avec l'artère principale qui passe au sud d'Aix-en-Provence s'effectue par une canalisation de 68 km de long qui transporte du méthane humide à la pression de 80 bars, dont le cheminement passe à 1,5 km de la limite ouest du Site, l'INB la plus proche se situant à plus de 2 km de la canalisation.

Deux pipelines passent par ailleurs à plus de 15 km au nord-ouest du Centre et relient la zone de Fos-sur-Mer à Manosque.

Un recensement des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soumises à autorisation a été réalisé auprès des DREAL des régions concernées, il en ressort qu'aucune ICPE de ce type n'est présente dans un rayon de 10 km autour du Centre.

Par conséquent le Centre n'a pas d'environnement industriel particulier dans un rayon de 5 km, pouvant représenter une source potentielle de risque. La conduite de gaz « Corbière-Manosque » située à 1,5 km de la limite ouest du site et la canalisation arrivant sur le Centre ne présentent pas de risque particulier.

Les risques externes sont dus essentiellement au transport de matières dangereuses sur les voies de communications alentours et plus précisément la route départementale D952. Le niveau de risque demeure toutefois faible et il concerne la partie du Centre située le long de la RD 952 (côté nord-ouest).

Le positionnement du RJH côté Sud-Est minimise encore plus le risque.

7.1.1.1.2. Organisation générale de la sécurité du centre

Le Directeur de Centre est responsable de la sécurité générale de l'établissement, il exerce sur l'ensemble du site les pouvoirs de réglementation interne, de contrôle et de discipline générale et définit les objectifs à atteindre localement en application de la politique de sécurité.

Il lui appartient :

- de gérer la fonction « sécurité générale » dans son établissement, c'est-à-dire l'application de la politique générale de sécurité et des textes réglementaires en vigueur dans les différents domaines de la sécurité,
- de contrôler que la sécurité est correctement assurée dans toutes les installations implantées sur le site,
- d'apporter les prestations de sécurité aux départements et aux directions implantées, aux établissements hébergés dans des conditions définies chaque fois que nécessaire par des conventions ou protocoles locaux avec les chefs de départements ou d'établissements des filiales implantés.

Pour cela il est assisté :

- par des unités spécialisées : la Cellule de Sûreté et des Matières Nucléaires (CSMN), la Cellule Qualité, Sécurité et Environnement (CQSE), le Service de Protection contre les Rayonnements (SPR), la Formation Locale de Sécurité (FLS), le Service de Santé du Travail (SST), le Laboratoire d'Analyses de Biologie Médicale (LABM) et l'Unité de Communication et Affaires Publiques (UCAP) ;
- par des services qui participent à la sécurité du fait de leurs activités spécifiques ou des moyens dont ils disposent : le Service Technique et Logistique (STL), le Service des Technologies de l'Information et de la Communication (STIC), le Service de Gestion et de Traitement des Déchets (SGTD) et le Service Métiers Conduite de Projets (SMCP) pour les questions relatives à l'alimentation électrique du Centre ;
- par des organes consultatifs, notamment le Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT).

Les effectifs et moyens de ces différentes unités permettent de constituer des équipes d'intervention pluridisciplinaires, dans certains cas, la Direction pouvant décider de faire appel à des équipes d'intervention extérieures.

Chaque bâtiment du Centre est placé sous la responsabilité d'un Chef d'Installation, celui-ci :

- est responsable de l'ensemble des mesures de sécurité à prendre dans son Installation. Il a autorité dans son installation en matière de sécurité.
- est assisté par un Ingénieur de Sécurité d'Installation qui peut lui-même (en fonction de la taille ou des risques de l'installation), coordonner l'action d'animateurs de sécurité.
- établit et maintient à jour la liste et l'ordre de succession des personnes ayant qualité pour intervenir en cas d'accident dans son Installation.

Le Centre est découpé en secteurs d'alerte, les communications en cas de crise s'établissent entre le Directeur du Centre et chacun des chefs de secteurs au moyen du réseau de haut-parleurs de commandement. Chaque chef de secteur a la responsabilité de faire appliquer dans les bâtiments composant son secteur, les mesures correspondant à la configuration d'alerte dans laquelle se trouve son secteur, celles-ci peuvent aller de la simple mise à l'abri des personnes à l'intérieur des bâtiments jusqu'à l'évacuation des bâtiments.

7.1.1.1.3. Organisation en cas de crise

En cas d'accident, une organisation locale de crise est mise en place au niveau du Centre, elle comprend les structures suivantes :

- le Poste de Commandement Direction Local (PCD-L) qui est dirigé par le Directeur du Centre (ou son représentant) seul responsable des décisions à prendre pour assurer la sûreté des installations, l'information des Autorités et des Pouvoirs Publics, la protection des personnes présentes sur le Centre, et pour limiter les conséquences dans l'environnement,
- l'Equipe Technique de Crise Locale (ETC-L) qui exerce ses compétences en matière de sûreté et de connaissance des installations et qui communique au PCD-L la synthèse de l'évaluation de son équipe et de l'Equipe Contrôle (EC),
- l'Equipe Contrôle (EC) qui a à sa charge les mesures radiologiques et les calculs de conséquence dans l'environnement,
- l'Equipe Mouvement (EM) qui est chargée :
 - o d'assurer la logistique interne du Centre ;

- de coordonner les mouvements de personnes présentes sur le Centre en termes de regroupement et d'évacuation,
- de fournir après accord du PCD-L, les moyens et prestations demandés par l'installation sinistrée
- la Cellule de Communication Locale qui est chargée de préparer la communication autour de la crise destinée au public et aux médias locaux,
- la Cellule de Presse Locale qui est chargée de réaliser l'information du public et des médias locaux,
- le Poste de Commandement Local (PCL) placé dans ou à proximité de l'installation sinistrée, est chargé d'assurer les fonctions de conduite et de sauvegarde de l'installation.

7.1.1.1.4. Modalités de déclenchement et de diffusion de l'alerte

7.1.1.1.4.1. Alerte au niveau de l'installation accidentée et du site

Le Chef d'Installation dispose d'une information donnée par des alarmes qui, pour certaines d'entr'elles, sont visualisées et identifiées sur un poste informatique de regroupement des alarmes (SAFIR) et reportées :

- soit vers le PC Sécurité, 24h/24h,
- soit vers la permanence du Service de Protection Radiologique, pour les alarmes relatives à la radioprotection.

Le Chef d'Installation en heures ouvrables (ou le cadre de Permanence pour Motif de Sécurité (PMS) en dehors des heures ouvrables) prévient le Directeur du Centre (ou le Cadre d'Astreinte de Direction) :

- lorsque le développement et/ou les conséquences d'un sinistre en rendent la gestion délicate ou simplement inhabituelle ;
- lorsque les conséquences d'un sinistre pourraient ne plus être maîtrisées ;
- lorsque les conséquences ou la gestion d'un sinistre impacte une installation voisine ;
- lorsque la gestion du sinistre nécessite de faire appel à des renforts ou à des moyens centralisés.

La diffusion de l'état d'alerte sur l'ensemble du site peut se faire :

- au moyen d'une sirène à son modulé, appelée « sirène PUI » ;
- au moyen de messages transmis depuis le Poste de Commandement de la Direction Local (PCD-L) vers les secteurs d'alerte qui retransmettent à l'ensemble des bâtiments composant les secteurs.

7.1.1.1.4.2. Déclenchement des dispositifs d'urgence relevant du PUI et alerte des organismes officiels

La décision de déclencher le PUI appartient exclusivement au Directeur du Centre ou à son représentant.

Lorsque le Directeur ou son représentant décide de mobiliser l'organisation de crise, l'appel de l'ensemble des membres de l'organisation de crise se fait via un système d'appel automatique complété par des appels téléphoniques.

Des dispositions sont mises en place pour l'alerte des interlocuteurs extérieurs au site :

- la Direction Générale du CEA,
- les pouvoirs publics : Préfecture des Bouches du Rhône, Sous Préfet d'Aix-en-Provence et DREAL,
- l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), qui a en charge l'information de l'IRSN,
- l'Autorité de Sûreté Nucléaire de Défense (ASND),
- la gendarmerie, le SDIS.

Ces procédures d'alerte s'appliquent à toutes les installations du Centre, y compris celles qui ne sont pas CEA.

7.1.1.1.4.3. Alerte relative à l'environnement proche du site

Les entreprises, établissements et populations environnantes sont alertés, sans délai, en cas de déclenchement du PPI, et ce, sous la responsabilité du Préfet.

Les maires des sept communes (Beaumont-de-Pertuis, Corbières, Ginasservis, Jouques, Rians, Saint-Paul-lez-Durance et Vinon-sur-Verdon) inscrites dans le périmètre du PPI sont informées du déclenchement du PUI et de son évolution.

Le sinistre, son développement, ses conséquences, sa gestion font l'objet d'une communication externe de la part du CEA vers le public et les médias.

7.1.1.1.5. Exercices et formations

Les activités concernant la formation et l'entraînement du personnel à la sécurité comprennent des séances d'instruction et des exercices destinés à informer le personnel de la conduite à tenir en cas d'incident, d'accident ou de sinistre.

7.1.1.1.5.1. Exercices particuliers dans les installations

L'entraînement du personnel aux interventions courantes est assuré par l'exécution d'exercices particuliers, ces exercices font intervenir :

- le personnel de l'installation,
- l'Equipe Locale de Premier Secours du bâtiment ou, à défaut, les secouristes de l'installation,
- les équipes d'intervention du Centre.

Ces exercices permettent de contrôler :

- l'application des règles d'intervention,
- la diffusion intérieure et extérieure de l'alerte,
- l'action de l'Equipe Locale de Premier Secours du bâtiment,
- l'action des équipes d'intervention du Centre,
- la coordination des actions.

7.1.1.1.5.2. Exercices généraux

Ces exercices font intervenir, en plus du personnel d'une ou plusieurs installations supposées sinistrées, l'organisation de gestion de crise du Centre et mettent en œuvre les moyens des Services d'Intervention ; certains de ces exercices sont organisés au niveau national en liaison avec l'autorité de sûreté et les préfetures.

Ils ont pour but de vérifier l'application des instructions et consignes dans le cadre du Plan d'Urgence Interne du Centre et en particulier :

- la bonne diffusion des ordres à tous les secteurs d'alerte,
- la mise en sécurité des installations,
- la mise en œuvre des moyens de transport pour l'évacuation du personnel,
- la mise en place des moyens de contrôle du personnel provenant des installations évacuées.

Les exercices de criticité qui permettent de vérifier l'application des dispositions d'alerte particulière au risque criticité font partie de ces exercices.

7.1.1.1.5.3. Formation du personnel à la sécurité

La formation du personnel à la sécurité comprend plusieurs volets :

- la formation initiale à la sécurité qui comprend le suivi d'une formation générale à la sécurité organisé par le Centre et le suivi de la formation à la sécurité au poste de travail organisée par le Chef d'Installation (cette formation sur le terrain est renouvelée à chaque changement de poste ou en cas de modification de celui-ci) ;

- la formation spécifique à la sécurité : en fonction des risques liés aux activités de son poste de travail, une personne pourra être amenée à suivre un stage consacré à la prévention d'un risque particulier (risque chimique, conduite d'appareils de levage, habilitations électriques, prévention du risque radiologique, risque du sodium, ...) ; il existe également des stages spécifiques à certaines fonctions dont le suivi est obligatoire : Chef d'Installation, Ingénieur de Sécurité d'Installation, ... ;
- la « semaine de sécurité » organisée par le Chef d'Installation. Cette formation a lieu une fois par an sur chaque installation. Elle comprend en général :
 - des exposés généraux sur la prévention des risques rencontrés dans l'installation,
 - un exercice de sécurité,
 - une séquence d'entraînement à l'utilisation d'extincteurs,

7.1.1.1.5.4. Formation des acteurs de la gestion de crise

L'ensemble des acteurs de la gestion de crise bénéficie d'une formation spécifique à la gestion de crise à l'occasion de leur prise de fonction et ensuite, de façon périodique.

7.1.1.1.6. Contrôles techniques de sécurité

Les matériels utilisés dans le cadre des interventions ainsi que les réseaux de diffusion d'ordres font l'objet de contrôles techniques de sécurité dont la périodicité est définie, soit par la réglementation en vigueur, soit par des dispositions internes au Centre.

7.1.1.2. Robustesse des moyens disponibles

7.1.1.2.1. Moyens d'intervention

7.1.1.2.1.1. Dissémination de matières radioactives

Les mesures générales de protection du personnel, en cas d'accident entraînant un risque radiologique, sont les suivantes :

- interdiction de circulation sur le site sauf pour les équipes participant à l'organisation des secours,
- interdiction d'entrée et de sortie du site, sauf autorisation spéciale du Directeur,
- balisage de la zone sinistrée,
- gardiennage de la zone sinistrée,
- mise à l'abri du personnel se trouvant à l'extérieur des bâtiments,
- mise en place dans chaque bâtiment des mesures de protection du personnel,
- évacuation immédiate des secteurs se trouvant en zone dangereuse,
- préparation à une éventuelle évacuation des secteurs se trouvant en zone suspecte,
- mise en œuvre des moyens de protection individuelle du personnel (masques, tenues de protection ...),
- contrôle et pré-décontamination du personnel,
- décontamination du personnel,
- contrôle des véhicules de transport du personnel,
- regroupement du personnel pour son transport vers les localités d'habitations.

Par ailleurs, le Service de Protection Radiologique (SPR) dispose de moyens de mesures « embarqués » qui permettront, de façon urgente et limitée, d'établir un premier relevé de mesures radiologiques dans les lieux jugés les plus pertinents en situation accidentelle, compte tenu des conditions météorologiques.

7.1.1.2.1.2. Inondation

Les moyens d'intervention de la Formation Locale de Sécurité (FLS) en cas d'inondation, sont les suivants :

- des fourgons de premiers secours permettant d'assurer des débits de pompage allant jusqu'à 90m³/h,
- des motopompes remorquables à moteur thermique avec un débit de pompage de 90 m³/h,
- une pompe type « vide cave » avec un débit de maximal de 100m³/h,
- une cellule de transport portable contenant :
 - o des pompes thermiques de 15m³/h,
 - o des pompes électriques jusqu'à 24m³/h qui peuvent être alimentées par l'alimentation électrique normale ou un par des groupes électrogènes entreposés dans la cellule,
 - o des pompes électriques « eaux chargées » avec un débit allant jusqu'à 60 m³/h,
 - o des turbo pompes hydrauliques avec un débit allant jusqu'à 120m³/h.

A ces moyens de pompage s'ajoutent un dévidoir automobile transportant 2 km de tuyaux et une réserve de 2 km de tuyaux répartis dans les différents engins de secours.

7.1.1.2.1.3. Alimentations électriques de secours

Les INB sont équipées de sources d'énergie autonomes de secours (groupe électrogène, onduleurs, batteries) et disposent également de prises de raccordement externes dans le cas où il serait nécessaire d'avoir recours à une source d'alimentation électrique mobile.

Le bâtiment abritant le PC sécurité et une partie des équipements de téléalarme est équipé de deux groupes électrogènes, d'onduleurs et de batteries. En cas de défaillance d'un groupe, un délestage automatique est réalisé sur des circuits non indispensables.

Le bâtiment abritant le système de communication des équipes d'intervention est équipé d'un groupe électrogène à démarrage automatique

En cas de perte totale des alimentations électriques, c'est-à-dire en cas de perte des alimentations externes du Centre cumulée avec la perte des sources internes de secours des installations, le Centre dispose d'un parc de Groupe Electrogène Mobile (GEM) qui sont affectées aux installations selon un ordre de priorité défini en fonction de l'importance pour la sûreté des équipements devant être réalimentés..

Le centre dispose de deux cuves de fuel d'un volume unitaire de 540 m³ fuel destinées au fonctionnement des groupes électrogènes.

7.1.1.2.2. Gestion de crise en cas de séisme

Concernant les situations accidentelles susceptibles de résulter d'un séisme :

- le centre sera accessible à partir du réseau routier extérieur, en effet, un séisme impactant la vallée de la Durance, ne devrait pas impacter pas le Var,
- le centre dispose des outils permettant d'assurer la détection d'un séisme et donner l'alerte,
- le réseau de voirie interne sera praticable avec des véhicules « tout terrain »,
- des moyens de communications seront disponibles après séisme : téléphones satellitaires pour les communications vers l'extérieur, réseau hertzien dimensionné au séisme pour les communications à l'intérieur du Centre,
- des groupes électrogènes mobiles seront disponibles après séisme,
- les moyens de radioprotection mobiles sont disponibles dans les INB dimensionnées au séisme,
- afin d'éviter des risques d'électrocutions ou d'incendies, la coupure de l'alimentation électrique du centre peut être assurée par RTE sur demande du Centre de Cadarache,
- une étude de vulnérabilité a mis en évidence que la disponibilité après séisme d'un certain nombre de bâtiments abritant des moyens communs aux installations n'est pas acquise,
- les salariés d'astreinte hors du centre ne seront pas forcément en mesure de rejoindre le centre.

Deux configurations sont, à ce jour, envisagées pour la gestion de crise :

- une gestion de crise nominale avec armement d'un poste de commandement dédié et la mise en œuvre des moyens généraux non dégradés par le séisme ou disponibles,
- une gestion de crise dégradée avec quelques salariés pouvant donner des informations sur l'état des installations au Centre de Coordination en cas de Crise (CCC) qui assurera, au niveau national, la gestion de crise en faisant intervenir des moyens extérieurs.

7.1.2. Mesures de gestion des accidents actuellement prévues par l'Installation RJH aux différents stades d'un accident grave, en particulier consécutif à la perte de la fonction de refroidissement du cœur

La mise à l'arrêt du réacteur et l'évacuation de la puissance résiduelle sont assurées par :

- la chute automatique d'au moins 3 absorbants de sécurité sur 4 (voir 3.1.2),
- la mise en service automatique des systèmes de réfrigération de sauvegarde redondants.

- Avant endommagement du combustible

Avant endommagement du combustible l'accident est géré conformément aux paragraphes 6.3 et 6.4, résumés ci-dessous.

Pour gérer la perte de la réfrigération normale du cœur cumulée avec la perte des systèmes de réfrigération de sauvegarde RUC/RUP/RUS, une pompe ultime de brassage du circuit primaire RPP est automatiquement mise en service sur perte de la réfrigération normale (Cf paragraphe 2.2.1). Cet équipement est alimenté par la batterie de sauvegarde SUS B. L'équipe de quart doit alors ouvrir les vannes de convection naturelle sur la piscine RER.

Le circuit REN de refroidissement de la piscine intermédiaire REE est si nécessaire utilisé pour évacuer la puissance thermique dissipée dans les piscines RER et REE. La source froide associée à ce circuit est le circuit tertiaire RST ou le circuit de conditionnement MVO (Cf paragraphes 6.3 et 6.4). Ces circuits sont alors à alimenter par une source électrique mobile externe.

✓ Brèches sur le circuit primaire ou en piscine

Les circuits véhiculant de l'eau primaire ou de l'eau des piscines sont implantés dans un ensemble de casemates constituant le Bloc Eau.

La conception du Bloc Eau a pour rôle fonctionnel de garantir, en cas de brèche, un inventaire en eau des piscines afin de maintenir sous eau le cœur et les matières radioactives entreposées.

Des dispositions de conception, portant notamment sur le dimensionnement des piscines et des casemates ainsi que sur l'aménagement des casemates et des circuits, permettent en cas de brèche d'équilibrer les niveaux d'eau entre les piscines et les casemates afin d'exclure le risque de dénoyage du cœur.

En complément le maintien sous eau du cœur peut également être assuré par la mise en œuvre des systèmes suivants :

- le circuit EPL de vidange/remplissage des piscines. Il permet de transférer dans les piscines de l'eau entreposée dans les capacités EPV du BUA. Ce circuit est alimenté par le réseau électrique externe.
- le circuit REU système ultime de recirculation. Il permet, en cas de brèche, de renvoyer l'eau collectée dans les casemates du Bloc Eau vers les piscines du BUR. Ce circuit est alimenté par le réseau électrique externe.
- un point de connexion extérieur à l'UN d'appoint d'eau ultime, relié au circuit REW d'appoint et de remplissage des piscines.

Améliorations envisagées :

- Remplissage permanent d'une capacité EPV du BUA par quelques centaines de mètres cube d'eau : création d'un stockage interne d'eau permettant de réalimenter les piscines sans apport extérieur
- Extension de la fonction du système ultime de recirculation dans les zones attenantes au bloc-eau : permettre la collecte puis relevage des fuites dans les zones attenantes à la piscine réacteur
- Dimensionnement au séisme de la partie du circuit EPL permettant d'alimenter la piscine réacteur : accroître la robustesse du circuit d'appoint

✓ Gestion du confinement de l'enceinte

L'isolement total de l'enceinte de confinement du réacteur est déclenché :

- de manière automatique sur une montée d'activité dans le bâtiment réacteur,
- manuellement par l'équipe de quart depuis la salle de commande.

Cet automatisme entraîne :

- l'arrêt des ventilateurs de soufflage et d'extraction du BUR,
- le confinement (isolement du soufflage et l'extraction) de l'enceinte du BUR,
- l'isolement des circuits traversant l'enceinte et non requis pour la réfrigération du cœur
- la mise en service d'une ventilation MVM « ZRF post-accidentelle » indépendante des autres réseaux de ventilation, équipée de filtres THE et pièges à iode, permettant de collecter les éventuelles fuites au niveau des traversées de l'enceinte. Cette ventilation permet également le dégonflage de l'enceinte en cas de besoin.

En cas de perte de la source électrique externe, la ventilation du hall BUR s'arrête. Les vannes et registres d'isolement de l'enceinte restent dans leur position. Le confinement de l'enceinte, la mise en service de la ventilation ZRF et l'isolement des circuits traversant l'enceinte sont repris en secours par les alimentations internes de sauvegarde.

En cas de besoin, l'équipe de quart peut commander alors l'isolement total de l'enceinte de confinement depuis la salle de commande.

En cas d'indisponibilité des alimentations internes de sauvegarde, l'équipe de quart peut isoler manuellement en local les vannes de confinement et des circuits traversant l'enceinte, implantées en ZRF.

- **Après endommagement du combustible**

On récapitule ici les moyens à disposition de l'opérateur dans une situation avec fusion partielle ou complète d'assemblages combustibles du réacteur.

- ✓ A l'issue de l'autonomie des batteries de sauvegarde

Les vannes de convection naturelle ont été ouvertes sur la piscine. Sans réalimentation des tableaux électriques ou sans appoint d'eau en piscine, le dénoyage des éléments combustible est atteint après au moins 35 jours (Cf paragraphe 6.4).

- ✓ Perte des batteries de sauvegarde avant ouverture des vannes de convection naturelle

Le cumul des défaillances des moyens de sauvegarde actifs est postulé (perte du réseau électrique, ainsi que des diesels et batteries de sauvegarde ou défaillance des systèmes de sauvegarde RUC/RUP/Pompe de brassage ultime), ce qui conduit à l'impossibilité d'évacuer la puissance résiduelle et au risque du dénoyage du cœur.

Le scénario est le suivant :

t0 : perte du réseau électrique et défaillance des systèmes de sauvegarde RUC/RUP/Pompe de brassage ultime

- arrêt des pompes primaires : décroissance de la vitesse de rotation sur inertie (1/2 vitesse en 30 s, arrêt complet des pompes à environ 600 s),
- arrêt des alimentations normales au secondaire,
- arrêt de la pompe de gavage du système de pressurisation.

Arrêt d'urgence sur DPcœur insuffisant entraînant la décroissance de la puissance.

Les clapets en aval des pompes et les clapets des lignes d'injection sont opérationnels. Les principales séquences du transitoires sont :

- de 0s à 250 s : la puissance échangée décroissant brutalement, la température sortie cœur monte jusqu'à 130 °C environ; on observe une vaporisation momentanée de l'eau en haut du

cœur ; le débit à l'entrée des éléments devient très faible; les clapets anti-retour en aval des pompes sont quasiment fermés.

- de 250 à 3000 s, un débit intermittent s'établit à l'entrée du cœur dû aux battements des clapets en aval des pompes. Il permet de refroidir le cœur (convection naturelle et ébullition nucléée) bien que les échanges restent faibles. On observe une circulation (en sens inverse) entre le caisson et le casier qui contribue à la réfrigération. Le débit au primaire décroît régulièrement et on assiste à un échauffement progressif du primaire et du secondaire.

Dans ce transitoire, le primaire reste majoritairement en eau. La température de paroi du combustible est d'environ 120°C dans la phase de moyen terme.

Ce scénario est très sensible à la valeur d'ouverture des clapets en aval des pompes primaires. Dans le cas pénalisant où les clapets au refoulement des pompes primaires sont fermés dès que la vitesse des pompes primaires est insuffisante le scénario devient :

- t~1 min: Apparition du taux de vide en haut du cœur (caisson supérieur, têtes et cœur); ébullition en masse du haut du cœur ; montée en température dans le caisson ; la dilatation du fluide engendre un débit dans le bipasse vers la piscine.
- t~75 s : le débit en entrée du caisson devient quasi-nul ; inversion de débit dans les différents canaux formés par le bypass, caisson casier, les dispositifs et les différents absorbants.
- t~725 s : en haut du cœur, le taux de vide est proche de 1 (assèchement), la masse d'eau dans le cœur n'est plus que de 10 kg, les températures plaques sont à saturation (échange en ébullition nucléée). Le primaire a perdu environ 8000 kg via le by-pass primaire vers la piscine. Le combustible est endommagé.

L'ouverture manuelle des vannes de convection naturelle au plus tôt, non considérée dans ces deux transitoires a un effet favorable.

7.2. Mesure de gestion des accidents et éléments de conception de l'installation permettant de protéger l'intégrité du confinement après l'endommagement du combustible

Gestion du risque hydrogène

Le risque d'atteindre dans le hall de l'enceinte de confinement une concentration en hydrogène supérieure à la limite d'explosivité est exclu, compte tenu des éléments suivants :

- la quantité d'hydrogène produit par radiolyse de l'eau des piscines du fait de la puissance résiduelle des combustibles présents, est négligeable par rapport au volume du hall,
- les éventuels fragments issus d'une fusion du cœur représentent une masse très limitée, s'agissant d'un réacteur expérimental, et ne risquent pas d'entrer en contact avec le béton du plancher de la piscine (cf. § Gestion du risque du percement du radier).

Gestion du risque de surpression dans l'enceinte de confinement

La ventilation MVM « ZRF post-accidentelle » permet le dégonflage de l'enceinte et la filtration du rejet. Pour cela une ligne sort du BUR via deux vannes de confinement en série sur la ligne, fermées en fonctionnement normal. Après ouverture des vannes de confinement, deux vannes de réglage, petit et grand débit, en parallèle permettent de contrôler le débit de dégonflage pour réduire la pression dans l'enceinte du BUR. Ces matériels sont pilotés manuellement depuis le pupitre classé de la salle de commande. Les actionneurs du circuit ZRF post-accidentelle et de la ligne de dégonflage sont alimentés en secours par le diesel voie B.

En l'absence de réalimentation de la voie de sauvegarde B, les vannes permettant d'ouvrir le circuit de dégonflage peuvent être opérées manuellement. Il est considéré à ce stade de l'analyse que l'ouverture manuelle du circuit permettrait de limiter la montée en pression et donc d'éventuels dommages irréversibles de l'enceinte.

Toutefois, au-delà de 130mbar, l'ouverture progressive des fissures dans le GC de l'enceinte limiterait la montée en pression et éviterait la ruine de l'enceinte. La pression de dimensionnement de l'enceinte vis-à-vis de sa résistance est de 200 mbar.

Gestion du risque de re-criticité

Dans l'analyse de sûreté actuelle de l'installation, le cas d'une fusion du cœur suivie de la reconstitution d'un réseau critique est considéré comme exclu. Toutefois, au titre de la défense en profondeur, un système d'empoisonnement de secours existe, permettant le cas échéant l'injection de poison neutronique soluble au voisinage du cœur, via la voie A du circuit RUC, dans les heures qui suivent l'accident. La mise en œuvre de ce système est réalisable depuis les locaux du BUA, les commandes de vannes d'isolement du système étant elles aussi déportées.

Gestion du risque de percement du radier

En cas de fusion du cœur, des fragments de combustible pourraient tomber, sous eau, vers le bas de la piscine :

- sur le bouchon de traversée des mécanismes d'absorbants. Ce bouchon, inséré dans le plancher de la piscine au droit du cœur, sépare le bloc-pile et la crypte située sous la piscine. Il est constitué de plaques d'acier de forte épaisseur et le jeu entre les arbres des mécanismes (en inox) et le bouchon est faible,
- ou sur le platelage en acier inoxydable situé au-dessus du plancher de la piscine. Ce plancher est quant à lui recouvert d'un cuvelage en acier inoxydable.

Les éléments combustibles ayant une matrice et une gaine en aluminium, leur température de fusion est d'environ 660°C, soit une valeur très inférieure à la température de fusion de l'acier inoxydable. Par ailleurs, la masse de combustible dans le cœur est elle aussi relativement faible. Les fragments de combustibles auraient donc une faible inertie en regard de l'échange thermique avec l'eau environnante et de l'inertie thermique des éléments rencontrés (bouchon, platelage et cuvelage).

Il est donc considéré que ces situations ne peuvent pas conduire à une détérioration spécifique de l'étanchéité de la piscine (noter par ailleurs que la démonstration de sûreté du réacteur postule déjà, en cas d'accident Borax avec destruction du cœur, un passage d'eau vers la crypte des mécanismes située sous la piscine) donc le percement du radier par du combustible fondu est exclu.

Besoin en alimentation électrique pour gérer ces risques

Les vannes permettant le dégonflage de l'enceinte sont alimentées par le diesel du bâtiment BAS B.

Les actionneurs du système d'empoisonnement de secours (pompe et malaxeur) sont sur l'alimentation électrique normale.

7.3. Mesure de gestion des conséquences de la perte de la fonction de refroidissement de l'eau de la piscine ou tout autre entreposage du combustible

Les mesures de gestion des conséquences de la perte de la fonction de refroidissement de l'eau des piscines sont indiquées au paragraphe 6.4.

Afin de rendre possible le suivi du niveau d'eau dans chaque piscine depuis la salle de conduite et le poste de repli (en plus des alarmes existantes liées aux dépassements de seuils), il est envisagé de mettre en place des capteurs spécifiques sous réserve que les équipements déjà prévus ne permettent pas d'assurer la fonction.

L'analyse des conditions d'intervention aux postes de travail en cas de dénoyage des matières nucléaires contenues dans la piscine d'entreposage du BUA est menée en prenant en compte des épaisseurs de béton cumulées entre la piscine d'entreposage du BUA et :

- la salle de conduite : 3,6 m de béton
- le poste de repli : 7,40 m de béton
- la face externe de l'UN, au niveau du raccord pompier au circuit REW : 4,2 m de béton
- les locaux diesels pour réalimentation en gasoil : 4,2 m de béton

Compte tenu des épaisseurs de béton précitées et sans prendre en compte les atténuations liées à la distance des zones d'intervention concernées, le débit de dose attendu dans celles-ci conduit à les assimiler à des zones contrôlées simples au sens du code du travail.

8. Conditions de recours aux entreprises prestataires

Compte tenu que le RJH n'est pas encore en exploitation, la problématique de recours aux entreprises prestataires ne concerne pas les opérations d'exploitation et de maintenance.

Pour les activités de conception et de construction, le CEA a recours à des fournisseurs spécialisés (ingénierie, industriels, entreprises de travaux et de montage). Ces fournisseurs sont sélectionnés à partir de critères de compétence et d'aptitude qui exigent entre autres la maîtrise des référentiels nucléaires, en particulier de l'arrêté du 10 Août 1984 (Arrêté Qualité).

Le CEA est responsable de la surveillance du bon déroulement des opérations permettant de garantir la qualité finale de l'installation, de sa conformité aux référentiels et du respect des exigences de sûreté. Le CEA exerce lui-même directement cette fonction de surveillance, en s'appuyant autant que de besoin sur son Maître d'Œuvre (AREVA).

L'ensemble du dispositif de contrôle et de surveillance mis en place par le CEA est régulièrement inspecté par l'ASN.

9. Synthèse

A la demande de l'ASN, le CEA a mené une évaluation complémentaire de la sûreté du Réacteur Jules Horowitz, au regard de l'accident survenu à la Centrale de Fukushima Daiichi. Conformément au cahier des charges de l'ASN, cette évaluation a été conduite sur la base des études existantes et du jugement d'ingénieur. Elle a permis d'identifier des études ou dispositions complémentaires qui peuvent être envisagées pour améliorer la robustesse de l'installation face à des situations extrêmes. Ces actions, rappelées ci-après, pourraient être mises en œuvre au regard de l'amélioration qu'elles seraient susceptibles d'apporter en termes de prévention, de résistance, ou de gestion des accidents.

- Bilan de l'évaluation complémentaire de la sûreté

L'évaluation complémentaire de sûreté au regard de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima I a été menée à partir de l'état actuel de la conception du RJH. L'exercice a permis d'identifier que le dimensionnement tel que prévu comporte un ensemble de marges intrinsèques permettant d'ores et déjà de supporter des situations plus critiques que celles induites par les événements inclus dans le dimensionnement.

L'évaluation complémentaire a permis de confirmer le haut niveau de robustesse du RJH par rapport au risque de séisme et d'inondation ainsi que sa bonne autonomie vis-à-vis des pertes de sources électriques et de refroidissement externes. A ce titre, le document identifie :

- un coefficient de marge en accélération sur les structures compris entre 1,5 et 2 vis-à-vis du séisme de dimensionnement,
- une absence d'effet falaise lié à l'inondation externe,
- une large autonomie (plus de 3 jours) vis-à-vis de l'extérieur en cas de perte des alimentations électriques externes pour parvenir à l'état sûr du réacteur (atteignable en moins de deux heures),
- une totale indépendance vis-à-vis de l'extérieur en cas de perte des sources froides pour parvenir à l'état sûr du réacteur,
- une très grande autonomie de l'installation (supérieure à un mois) vis-à-vis de l'extérieur en cas de perte des sources froides et des alimentations électriques une fois l'état sûr atteint (supérieure à un mois).

Néanmoins, dans un souci de défense en profondeur, il peut être envisagé des renforcements complémentaires de la robustesse générale du RJH.

Ces améliorations viseraient principalement à améliorer encore l'autonomie du RJH en disposant de moyens propres sur site et à l'intérieur du RJH en cas de situation extrême, ainsi que de faciliter les interfaces entre RJH et moyens de secours externes.

Les principales évolutions envisagées visent à :

- augmenter les marges sismiques de certains équipements/fonctions critiques face au cas séisme,
- augmenter la robustesse des sources électriques internes,
- augmenter la capacité de refroidissement du combustible,
- faciliter l'exploitation post-accidentelle.

Les évolutions envisagées sont rappelées dans le paragraphe suivant.

- Evaluation de propositions de dispositions complémentaires qui pourraient être mises en place au regard de l'amélioration qu'elles seraient susceptibles d'apporter en termes de résistance des composants, de renforcement de l'indépendance entre les différents niveaux de défense de l'installation ou de gestion de l'accident

Evolutions visant à augmenter les marges sismiques de certains équipements	Gains attendus
Surdimensionnement des ancrages des racks d'entreposage du combustible neuf	Accroissement de la robustesse de l'entreposage du combustible à sec au-delà du SDD
Introduction de marge de dimensionnement sur les galets et voies de roulement de la passerelle positionnée au dessus de la piscine réacteur (RMD)	Accroissement de la robustesse de la passerelle au-delà du SDD
Accroissement du jeu entre l'Unité Nucléaire et les galeries de sauvegarde	Accroître la robustesse des circuits de sauvegarde au-delà du SDD

Evolutions visant à augmenter la robustesse des sources électriques internes	Gains attendus
Déplacement du Diesel de Disponibilité (DS) et sa transformation en Groupe d'Ultime Secours (GUS)	Renforcer la disponibilité des sources électriques de sauvegarde
Homogénéisation de la puissance des batteries d'ultime secours (SUS)	Augmentation de l'autonomie des matériels secourus en voie B

Evolutions visant à augmenter la capacité de refroidissement du combustible	Gains attendus
Création de 2 piquages sur les circuits de réfrigération de sauvegarde (RUS).	Permettre à des moyens externes (camion citernes équipés d'une pompe autonome) d'alimenter en eau froide le circuit RUS
Entreposage d'un volume d'eau dans les capacités de vidange des piscines (EPV) pour assurer l'appoint d'eau des piscines en secours	Création d'un stockage interne d'eau permettant de réalimenter les piscines sans apport extérieur
Dimensionnement au séisme de la partie du circuit (EPL) permettant d'alimenter la piscine réacteur à partir du stockage interne ci-dessus	Accroître la robustesse du circuit d'appoint
Extension de la fonction du système ultime de récupération d'eau en casemates du bâtiment réacteur	Permettre la collecte puis la réinjection en piscine des fuites dans les zones attenantes à la piscine réacteur
Création d'un piquage entre les piscines du BUA et la ligne de connexion extérieure à l'UN d'appoint d'eau ultime	Permettre à des moyens externes de réalimenter en eau les piscines du BUA en plus de la piscine du BUR

Evolutions visant à faciliter l'exploitation post-accidentelle	Gains attendus
Aménagement d'une vanne d'isolement et d'un raccord pompier dans la partie basse du voile béton de la zone des appuis parasismiques	Gestion facilitée d'une inondation de l'encuvement
Ajout de capteurs spécifiques (suivi de niveau d'eau en piscines)	Renforcer la disponibilité d'informations en cas d'accident
Adaptations locales des VRD	Minimiser l'impact d'une inondation liée à la rupture de la source froide