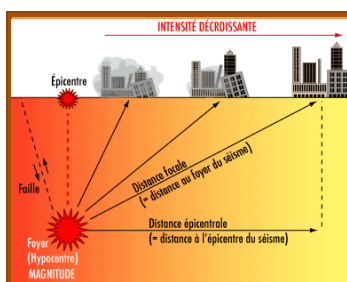


Méthodologie Générale



**Mise en application de l'article 12 de l'arrêté
du 4 octobre 2010 modifié (section II)**

**[Dispositions relatives aux règles parasismiques
applicables à certaines installations]**

DT 106 rev. 1

Février 2022

Table des matières

1.	Introduction et méthodologie générale	7
1.1	Introduction.....	7
1.2	Méthodologie générale	8
1.2.1	Définition du périmètre "risque spécial".....	10
1.2.2	Détermination des sollicitations sismiques à prendre en compte.....	10
1.2.3	Détermination du niveau d'exigences de comportement souhaité.....	11
1.2.4	Vérification de la compatibilité entre exigences de comportement souhaitées et sollicitations sismiques.....	11
1.2.5	Exploitation du résultat et démarche itérative	11
1.2.6	Mise en œuvre effective	12
1.2.7	Cas des équipements neufs.....	12
1.3	Délais d'application de l'arrêté pour l'étude séisme.....	12
1.3.1	Principes généraux	12
1.3.2	Distinction neuf / existant	13
1.3.3	Cas particulier d'une installation devenant "Seveso"	13
2.	Références réglementaires et normatives.....	15
2.1	Textes réglementaires	15
2.1.1	Extraits de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié	15
2.1.2	Extraits de l'arrêté du 24 janvier 2011	16
2.1.3	Identification des réglementations de référence.....	16
2.2	Cadre normatif	17
2.2.1	Définition de la sollicitation sismique	17
2.2.2	Cumul des actions et vérifications.....	17
2.2.3	Dispositions constructives et mesures parasismiques.....	18
3.	Périmètre des études sismiques (article 12)	19
3.1	Éclaircissements et notions de base.....	19
3.1.1	Installations visées.....	19
3.1.2	Équipements visés	19
3.1.3	Effets considérés	21
3.1.4	Zones touchées.....	22
3.1.5	Évènement sismique considéré.....	23
3.2	Application de l'arrêté pour la définition du périmètre.....	24
3.2.1	Les deux approches possibles	24
3.2.2	Établissement des scénarii liés au séisme	25
3.2.3	Approche "Équipements"	27

3.2.4	Approche "Études de dangers"	29
3.2.5	Suite de la démarche (commune aux deux approches)	33
4.	Mouvement sismique.....	35
4.1	Classification	35
4.1.1	Zone de sismicité	35
4.1.2	Classe de sol	36
4.2	Définition de l'action sismique	38
4.2.1	Spectres réglementaires.....	38
4.2.2	Déplacements de sol	41
4.2.3	Vitesses particulières.....	41
4.2.4	Magnitudes.....	41
4.2.5	Guide à la sélection d'accélérogrammes.....	42
4.2.6	Cas des classes de sol S_1 et S_2	45
4.3	Transfert de spectres.....	45
4.4	Règles de cumul des actions.....	45
4.4.1	Actions permanentes	46
4.4.2	Actions variables.....	46
4.4.3	Valeur caractéristique d'une action	46
4.4.4	Cumul d'actions avec le séisme.....	47
4.4.5	Masses pour l'action sismique de calcul	48
4.5	Données complémentaires informatives	49
4.5.1	Déplacement du sol.....	49
4.5.2	Vitesse particulière.....	49
5.	Exigences de comportement et méthodes de justification.....	51
5.1	Définitions générales des exigences de comportement	51
5.1.1	Opérabilité / capacité fonctionnelle.....	51
5.1.2	Intégrité du confinement / de la rétention	51
5.1.3	Stabilité et supportage	52
5.1.4	Absence d'interaction matérielle préjudiciable	52
5.1.5	Exigences spécifiques	52
5.1.6	Combinaison d'exigences / exigences induites	52
5.2	Critères de justification des structures et équipements	53
5.2.1	Définition des « états limites ».....	53
5.2.2	Critères liés aux exigences de comportement	53
5.2.3	Dispositions générales constructives et mesures parasismiques	54
5.2.4	Interfaces/ancrages.....	55
5.3	Méthodes générales de justification.....	55
5.3.1	Principes pour l'approche calculatoire.....	55
5.3.2	Justification par retour d'expérience	58

5.3.3	Essais	59
6.	Conception des ouvrages ou équipements neufs	61
6.1	Stratégie de conception d'une installation	61
6.1.1	Principes généraux guidant l'implantation des équipements.....	61
6.1.2	Distinction « risque spécial » / « risque normal »	61
6.1.3	Traitement des équipements à « risque spécial ».....	62
6.2	Principes de dimensionnement parasismique	63
6.2.1	Documents de référence.....	63
6.2.2	Principes généraux	64
6.2.3	Méthode de conception ductile	65
6.2.4	Systèmes de fondation	69
6.2.5	Interaction sol-structure (ISS).....	70
6.2.6	Utilisation de dispositifs d'isolation sismique	72
6.3	Application à des ouvrages et équipements spécifiques	73
6.3.1	Equipements.....	73
6.3.2	Structures en acier	73
6.3.3	Tours, mâts et cheminées	74
6.3.4	Bâtiments	75
6.3.5	Structures béton armé	76
6.3.6	Éléments non-structuraux.....	77
6.3.7	Ponts.....	78
7.	Étude des ouvrages ou équipements existants.....	81
7.1	Démarche pour le traitement d'un ouvrage ou équipement existant.....	81
7.1.1	Approche et stratégies	81
7.1.2	Logigramme synthétique.....	82
7.1.3	Description de la méthodologie	83
7.2	Travail préliminaire (Étape 0)	86
7.2.1	Collecte des données sur l'équipement	86
7.2.2	Collecte des données sur la structure support.....	87
7.2.3	Collecte des données sur les fondations	88
7.2.4	Collecte des données de sol	89
7.2.5	Collecte des données de retour d'expérience.....	91
7.2.6	Préparation de la visite.....	92
7.3	Visite sur site et classement des équipements (Etape 1).....	92
7.3.1	Composition de l'équipe de reconnaissance.....	92
7.3.2	Objectifs de la visite	92
7.3.3	Points particuliers lors de la visite.....	94
7.4	Diagnostic par vérification simplifiée (Etape A2)	95
7.4.1	Utilisation du retour d'expérience	96

7.4.2	Respect des dispositions constructives	96
7.4.3	Outils de diagnostic	97
7.4.4	Analyse des notes de dimensionnement au séisme	97
7.5	Diagnostic par calcul simplifié (Étape B2)	97
7.6	Analyse approfondie (Étape B3)	98
7.6.1	Collecte d'informations complémentaires	98
7.6.2	Méthodes d'évaluation calculatoires	99
7.6.3	Méthodes d'évaluation par essai	101
7.7	Mesures correctives (Étape C2)	101
7.7.1	Traitement parasismique de l'équipement ou la structure	102
7.7.2	Stratégies de protection	103

ANNEXES

Annexe A :	Textes réglementaires	107
Annexe B :	Calcul des effets du séisme / Exemples de scénarii séisme par type d'équipement et barrières associées	109
Annexe C :	Glossaire	119
Annexe D :	Annexes au chapitre 7	125

1. Introduction et méthodologie générale

1.1 Introduction

S'inscrivant dans le cadre général de la révision de la réglementation sur le risque sismique en France, l'arrêté du 15 février 2018 modifiant la section II de l'arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, a modifié la réglementation sismique s'appliquant à certaines installations classées (classe dite "à risque spécial" au titre des articles R563-6 et R563-7 du code de l'environnement).

La liste des textes réglementaires est fournie en annexe A et les principaux articles de ces textes exposés au chapitre 2.

La présente version du guide DT106 révision 1 prend en compte les évolutions apportées par l'arrêté du 15 février 2018 (noté arrêté du 4 octobre 2010 modifié dans le présent guide).

Le champ d'application du risque spécial est le suivant :

- L'arrêté s'applique aux installations SEVESO haut et bas¹ (selon les spécificités mentionnées dans l'arrêté) ;
- l'arrêté se base sur des critères d'effets létaux hors du site et ne se limite pas aux seuls équipements "aggravant notablement les conséquences premières du séisme" (cf. arrêté du 10 mai 1993 abrogé).

Le calcul des équipements² pour leur tenue au séisme a également évolué suite à la publication des Eurocodes, en particulier de l'Eurocode 8 qui traite du dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme.

Compte tenu de la complexité de la démarche à engager, le Ministère a mandaté un groupe d'industriels et de professionnels pour la production de guides de méthodologie. Ces guides ont pour but d'aider la démarche des industriels pour l'application de ce texte. Au présent guide de méthodologie générale, s'ajoutent des guides relatifs à des installations spécifiques.

Le guide de méthodologie générale est chargé :

- d'explicitier le périmètre de l'arrêté ;
- de donner une méthode de sélection des équipements concernés ;
- de donner des règles de détermination du mouvement sismique ;
- d'aider à définir les exigences de comportement ;
- de guider l'utilisateur dans l'étude de démonstration de tenue aux sollicitations sismiques.

¹ Au sens du code de l'environnement : installation SEVESO seuil haut article L515-36, installation SEVESO seuil bas article L515-32 (hors L515-36))

² Dans cette introduction le terme équipement est pris au sens large et regroupe en fait les équipements à risque spécial, les barrières de prévention et de protection, et les ouvrages agresseurs potentiels (voir le chapitre 3, pour la définition de ce vocabulaire).

Les guides relatifs aux installations spécifiques établis grâce à la collaboration de spécialistes en génie parasismique et d'industriels, fournissent la démarche à adopter pour la mise en application de l'arrêté pour les équipements suivants :

- réservoirs de stockage atmosphérique ;
- dispositifs de repli d'une installation sur détection sismique ;
- tuyauteries - robinetteries ;
- équipements process ;
- structures supports.

Ces guides sont tous disponibles sur la page France Chimie relative à la réglementation sismique « risque spécial »

1.2 Méthodologie générale

Champ couvert par le guide de méthodologie générale :

Méthodologie générale pour obtenir la conformité aux exigences réglementaires d'« études séisme » imposées par l'article 12 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié (section II) relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (noté de façon simplifiée arrêté du 4 octobre 2010 modifié dans la suite du texte).

Les études sismiques sont requises dans les cas suivants :

Installations seuil haut :

- Installations existantes situées en zone de sismicité 3, 4, 5, ou en zone de sismicité 2
- avec une classe de sol D ou E ;
- Installations nouvelles ;

Installations seuil bas :

- Installations existantes situées en zone de sismicité 4 ou 5;
- Installations nouvelles situées en zone de sismicité 3, 4, 5, ou en zone de sismicité 2 avec une classe de sol D ou E.

Points non couverts par le présent guide :

Le présent guide limite son champ d'application aux « études séisme » relevant de l'article 12 et ne traite pas des :

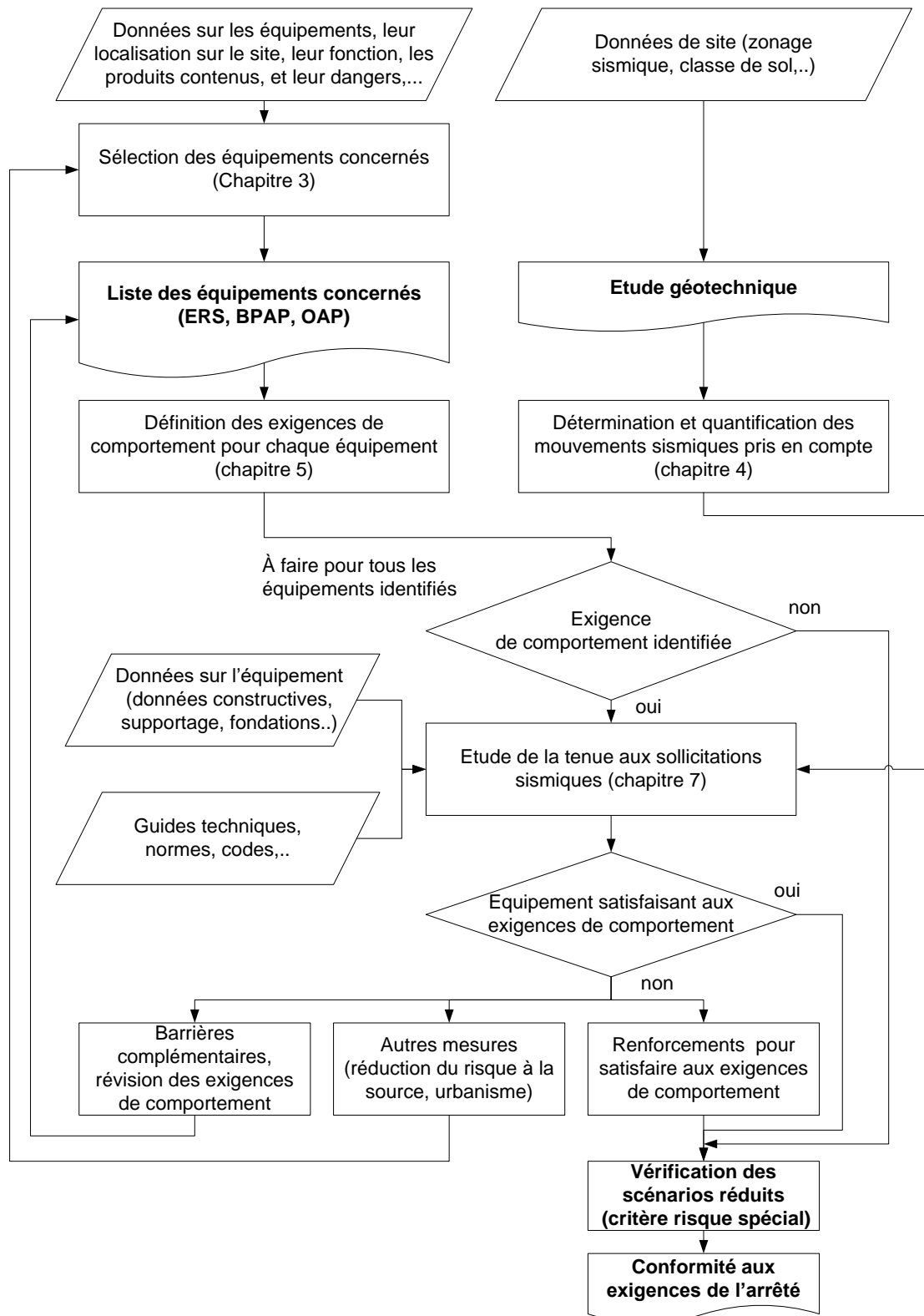
- plans de visite requis par l'article 11.
- études de zonage sismique locales que l'exploitant peut conduire s'il le souhaite en application de l'article 14-2.

Point important de vocabulaire :

L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié introduit un nouveau terme d'« Equipement critique au séisme ».

Ce terme est identique à celui d'« Equipement à Risque Spécial » ou ERS décliné dans l'ensemble des guides techniques « risque spécial ».

Le vocabulaire ERS est conservé pour assurer une modification la plus restreinte possible de l'ensemble des guides techniques « risque spécial ».



Les principales étapes décrites dans ce logigramme sont :

- La définition du périmètre des équipements concernés ("périmètre risque spécial") ;
- La détermination des sollicitations sismiques à prendre en compte ;
- La détermination du niveau d'exigence de comportement souhaitée ;
- La vérification que pour l'équipement concerné, les exigences de comportement souhaitées sont compatibles avec les sollicitations sismiques.

Tous les équipements concernés sont destinés, à terme :

- soit à satisfaire le niveau d'exigence de comportement sous l'effet des sollicitations sismiques déterminées ;
- soit à ne plus générer, en cas de séisme, de phénomène dangereux satisfaisant aux critères du risque spécial, par mise en place de barrières limitant les conséquences des phénomènes dangereux (notion de scénarii ou phénomènes dangereux "réduits") ou par réduction du risque à la source.

Par ailleurs, il est possible de sortir du périmètre risque spécial suite à d'autres mesures (mesures d'urbanisme notamment).

1.2.1 Définition du périmètre "risque spécial"

- Cette étape correspond au chapitre 3 du guide.

Ce chapitre a pour objectif d'établir le périmètre d'application de l'article 12 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées.

On s'intéresse en particulier à l'interprétation de la réglementation vis-à-vis des points suivants :

- choix des phénomènes dangereux à prendre en compte ;
- précisions sur les zones touchées à prendre en compte ;
- identification des équipements concernés et plus exactement des équipements à risque spécial (ERS), des barrières de prévention, d'atténuation d'effets ou de protection (BPAP) et des ouvrages agresseurs potentiels (OAP).

La donnée de sortie de cette étape est une liste d'équipements (ou ouvrages) dont les exigences de comportement devront être définies puis vérifiées aux sollicitations sismiques.

1.2.2 Détermination des sollicitations sismiques à prendre en compte

- Cette étape correspond au chapitre 4 du guide.

Le chapitre vise à guider l'utilisateur dans la détermination des paramètres nécessaires pour :

- établir le spectre de réponse ;
- déterminer des paramètres pouvant être nécessaires à l'étude de l'équipement : déplacements et vitesses de sol, et magnitude du séisme (pour les études de liquéfaction) ;
- quantifier les déplacements relatifs d'appui (structure multi supportée) de l'équipement étudié ;
- établir les règles de cumul de l'action sismique avec les autres actions unitaires.

La donnée de sortie de cette étape est la caractérisation des sollicitations sismiques à prendre pour la vérification des équipements concernés.

1.2.3 Détermination du niveau d'exigences de comportement souhaité

- Cette étape correspond au chapitre 5 du guide.

Ce chapitre a pour but de guider le choix de l'utilisateur dans la définition du niveau d'exigence de comportement associé aux équipements concernés.

Ces exigences sont typiquement : l'opérabilité, l'intégrité (confinement), la stabilité, le supportage, l'absence d'interaction, ou des exigences spécifiques.

La donnée de sortie de cette étape est, pour chaque équipement concerné, une ou plusieurs exigences de comportement.

A noter que pour certains équipements protégés par des barrières, il est possible qu'il n'y ait aucune exigence de comportement. Aucune étude de tenue aux sollicitations sismiques n'est donc à faire pour l'équipement.

1.2.4 Vérification de la compatibilité entre exigences de comportement souhaitées et sollicitations sismiques

- Cette étape correspond au chapitre 7 du guide.

Ce chapitre a pour but de guider l'utilisateur dans l'étude de "tenue au séisme" ou plus précisément dans l'étude de la compatibilité entre le niveau d'exigence déterminé et les sollicitations sismiques.

Il décrit la façon de recueillir les données d'entrée nécessaires à l'étude, puis explicite les méthodes de diagnostic sismique.

L'étude de la tenue de l'équipement, ouvrage ou barrière, se fera selon les guides spécifiques disponibles ou directement en application des normes concernées (cas des bâtiments ou des cheminées). La démonstration de la tenue de l'équipement pourra être effectuée par essais, par calculs analytiques ou numériques ou par analogie.

La donnée de sortie de cette étape est un jugement sur le caractère satisfaisant ou non du niveau d'exigence de comportement vis-à-vis des sollicitations sismiques.

1.2.5 Exploitation du résultat et démarche itérative

Il est important de rappeler que plusieurs options sont possibles et que tous les équipements concernés ne sont pas destinés à être renforcés.

Si l'équipement, pour le niveau d'exigence qui lui est attribué, ne satisfait pas aux exigences de comportement associées au séisme déterminé, plusieurs options sont possibles :

- a) l'équipement fait l'objet de renforcements ou est partiellement remplacé pour satisfaire aux exigences de comportement associées au séisme ;
- b) des barrières supplémentaires limitant les effets des scénarii sismiques associés à l'équipement sont mises en place de façon à ce que les scénarii réduits conduisent à l'exclusion dudit équipement de la catégorie du risque spécial ;
- c) une réduction du risque à la source est effectuée de façon à limiter les effets des scénarii sismiques ;
- d) des mesures d'urbanisme ou des servitudes sont établies de façon à ce que les zones touchées ne soient plus considérées comme "à occupation humaine permanente" au sens de l'arrêté ;
- e) des achats de terrain sont effectués de façon à avoir la maîtrise foncière des zones impactées et à repousser les limites du site.

Le choix entre ces options appartient à l'exploitant :

- Les options a) et b) sont considérées comme une protection parasismique. L'équipement reste à risque spécial même après traitement parasismique. C'est une propriété intrinsèque de l'équipement, de son contenu et des conditions d'exploitation.
- Les options c), d) et e) permettent une sortie du périmètre risque spécial.

Il convient de vérifier après choix d'une de ces options que les phénomènes dangereux associés aux scénarii réduits n'ont plus d'effets remplissant les critères du risque spécial.

La donnée de sortie de toutes ces étapes est l'étude séisme demandée par l'arrêté.

1.2.6 Mise en œuvre effective

Une fois les actions déterminées dans l'étude séisme, un calendrier de réalisation doit être établi et transmis aux autorités compétentes. Après validation ou modification par l'administration, l'exploitant devra respecter les échéances pour la mise en œuvre des mesures (voir paragraphe 1.3.1).

1.2.7 Cas des équipements neufs

La démarche s'applique tant aux équipements existants qu'aux équipements neufs. Pour les équipements neufs, la démarche doit être appliquée au niveau de l'avant-projet de façon à adopter la stratégie la plus appropriée. La tenue aux sollicitations du séisme peut également être intégrée au niveau de la conception des équipements neufs.

- Le chapitre 6 donne des informations sur la prise en compte des sollicitations sismiques pour les équipements neufs.

1.3 Délais d'application de l'arrêté pour l'étude séisme

1.3.1 Principes généraux

L'article 13 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié fixe les délais de remise de l'étude séisme pour les installations classées :

- **Installation nouvelle**
- Pour les installations seuil haut quelle que soit la zone (zone 1 à 5), pour les installations seuil bas : zone 2 classe de sol D ou E, zone 3, zone 4, zone 5) :
 - étude produite au dépôt du dossier de demande d'autorisation d'exploiter ;
 - mesures de protection parasismiques en place à la mise en service ;
- **Installation existante :**

Les délais de remise des études sont les suivants :

Zone de sismicité	Installation Seuil bas	Installation Seuil haut
Zone de sismicité 2	Non requis	31 décembre 2021 (pour sols de classe D et E) Non requis pour sols de classe A, B ou C.
Zone de sismicité 3	Non requis	31 décembre 2020
Zone de sismicité 4	31 décembre 2022	31 décembre 2020
Zone de sismicité 5	31 décembre 2018	31 décembre 2018

A noter que pour les installations existantes seuil haut en zone de sismicité 2, la classe de sol est à déterminer au plus tard le 31 décembre 2019.

1.3.2 Distinction neuf / existant

Les niveaux d'accélération sismique à considérer sont différents pour les installations nouvelles et pour les installations existantes. Ce niveau de séisme forfaitaire inférieur pour une installation existante peut être relié à une probabilité annuelle de dépassement plus élevée (voir chapitre 4).

Une définition claire des notions d'installations nouvelles et existantes est donc nécessaire pour la bonne application de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

1.3.2.1 Définitions

L'extrait de l'article 9 cité au chapitre 2 identifie les installations ainsi :

- *Installation nouvelle* : installation disposant d'une première autorisation à partir du 1er janvier 2013, ou partie d'installation ayant fait l'objet après le 1er janvier 2013 d'une modification substantielle impliquant des constructions nouvelles ;
- *Installation existante* : installation non nouvelle.

1.3.2.2 Extension ou modification d'une installation SEVESO

Le principe général est le suivant :

- 1) Premier cas : les modifications ne sont pas substantielles
Il n'est alors pas attendu de la part de l'exploitant qu'il mette en œuvre des dispositions allant au-delà de celles prévues pour une installation existante (période de retour 3000 ans).
- 2) Deuxième cas : les modifications sont substantielles mais ne génèrent pas de surrisque en cas de séisme
Il n'est alors pas attendu de la part de l'exploitant qu'il mette en œuvre des dispositions allant au-delà de celles prévues pour une installation existante (période de retour 3000 ans).
- 3) Troisième cas : les modifications sont substantielles et peuvent conduire, en cas de séisme, à générer un surrisque par rapport à celui existant sur l'installation avant ces modifications

L'exploitant met en œuvre les dispositions prévues pour les installations nouvelles ((période de retour 5000 ans).

1.3.3 Cas particulier d'une installation devenant "Seveso"

Plusieurs événements, dépendants ou indépendants de la volonté de l'exploitant, peuvent changer le classement réglementaire d'une installation et la classer "SEVESO" :

- a) Construction d'une nouvelle unité, modification, extension entraînant le classement SEVESO de l'installation soit parce que la nouvelle installation est classée directement SEVESO dans la nomenclature des installations classées, soit par application de la règle de cumul.
- b) Changement dans la nomenclature des installations classées ou dans les règles de classement SEVESO (règle de cumul notamment) ;
- c) Changement dans le classement réglementaire d'un produit, entraînant le classement sous une nouvelle rubrique de la nomenclature avec atteinte des critères de classement "SEVESO".

Dans le cas a) si l'installation (ou ensemble d'installations concourant à la règle de cumul) devient SEVESO, l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié s'applique immédiatement à l'installation (ou ensemble d'installations concourant à la règle de cumul).

Dans le cas a) l'installation est considérée comme existante, sauf ce qui est décrit dans le dossier comme réellement nouveau).

Dans les cas b) et c), où les modifications réglementaires sont indépendantes de la volonté de l'exploitant, l'application de l'arrêté à l'établissement sans délai particulier pourra, poser un problème de conformité à l'exploitant, celui-ci n'ayant pas le temps matériel d'effectuer les études et éventuelles de mise en conformité demandées.

Le délai applicable aux installations existantes devenant classées SEVESO pour cause de modification du cadre réglementaire (cas b) et c)) est de deux années pour remettre l'étude technique (ce délai est identique au délai réglementaire de remise de l'étude de dangers requis par la directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3).

Nota : à l'inverse, si suite à une modification des quantités stockées ou de nomenclature, l'installation sort du classement SEVESO, l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié cesse de s'appliquer à l'installation.

2. Références réglementaires et normatives

2.1 Textes réglementaires

Le texte réglementaire de référence est l'**arrêté du 4 octobre 2010 modifié** relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation – **Section II** « Dispositions relatives aux règles parasismiques applicables à certaines installations ».

2.1.1 Extraits de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié

L'article définissant le périmètre d'application de l'étude séisme est l'article 12 :

« Art. 12. – Le présent article s'applique :

« – aux installations existantes seuil haut situées en zone de sismicité 3, 4, 5, ou en zone de sismicité 2 avec une classe de sol D ou E ;

« – aux installations nouvelles seuil haut ;

« – aux installations existantes seuil bas situées en zone de sismicité 4 ou 5 ;

« – aux installations nouvelles seuil bas situées en zone de sismicité 3, 4, 5, ou en zone de sismicité 2 avec une classe de sol D ou E.

« Toutefois, il ne s'applique pas à ces installations lorsqu'une étude locale prévue à l'article 14-2 a conduit à des accélérations inférieures à celles correspondant pour une classe de sol donnée, aux zones les plus faibles indiquées aux alinéas précédents. Pour ces installations, le préfet prend acte de l'étude locale prévue à l'article 14-2 remise par l'exploitant. ».

« L'exploitant élabore une étude séisme permettant de :

« – justifier qu'il n'y a plus d'équipements critiques au séisme, en appliquant les accélérations de calcul de l'article 14-1-I-a) pour les installations nouvelles, et de l'article 14-1-I-b) pour les installations existantes, après prise en compte le cas échéant de l'article 14-2, et après prise en compte le cas échéant des ouvrages agresseurs potentiels ainsi que des barrières de protection restant opérationnelles et efficaces à ces accélérations ; »

L'article 9 précise la définition d'installation Seveso seuil haut et seuil bas :

« – Installation seuil haut : une installation répondant aux dispositions de l'article L. 515-36 du code de l'environnement.

« – Installation seuil bas : une installation répondant aux dispositions de l'article L. 515-32 du code de l'environnement et ne répondant pas aux dispositions de l'article L. 515-36 du code de l'environnement.

L'article 9 définit la notion d'équipement critique au séisme.

Par souci de simplicité l'ancien vocabulaire correspondant à la notion d'ERS (Equipement à Risque Spécial) est conservé dans le présent guide pour limiter les modifications à apporter à l'ensemble des guides techniques associés aux études sismiques :

« – Equipement critique au séisme : équipement dont la défaillance en cas de séisme conduit à des phénomènes dangereux susceptibles de générer des zones de dangers graves (au sens de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005) en dehors des zones sans occupation humaine permanente hors des limites de propriété du site. »

L'article 9 définit également les zones sans occupation humaine permanente :

« – Zones sans occupation humaine permanente : zones ne comptant aucun établissement recevant du public, aucun lieu d'habitation, aucun local de travail permanent, ni aucune voie de circulation routière d'un trafic supérieur à 5000 véhicules par jour et pour lesquelles des constructions nouvelles sont interdites. »

L'article 9 permet de distinguer la nature nouvelle ou existante d'une installation en fonction de sa date d'autorisation :

« – Installation nouvelle : installation disposant d'une première autorisation à partir du 1er janvier 2013, ou partie d'installation ayant fait l'objet après le 1er janvier 2013 d'une modification substantielle impliquant des constructions nouvelles.

« – Installation existante : autres installations.

L'article 13 établit les délais de remise des études sismiques en fonction de la nature nouvelle ou existante des installations :

« Art. 13. – Pour les installations nouvelles, l'étude mentionnée à l'article 12 est produite au plus tard lors du dépôt de la demande d'autorisation environnementale et les moyens techniques nécessaires à la protection parasismique des équipements issus de cette étude sont mis en œuvre à la mise en service de l'installation. « Pour les installations existantes, l'étude mentionnée à l'article 12 est produite au plus tard à la date suivante :

ZONE DE SISMICITÉ	INSTALLATION SEUIL BAS	INSTALLATION SEUIL HAUT
Zone de sismicité 2	/	31 décembre 2021
Zone de sismicité 3	/	31 décembre 2020
Zone de sismicité 4	31 décembre 2022	31 décembre 2020
Zone de sismicité 5	31 décembre 2018	31 décembre 2018

« Pour les installations existantes seuil haut situées en zone de sismicité 2, la classe de sol sera déterminée au plus tard le 31 décembre 2019. »

« Au plus tard trois ans après la remise de l'étude mentionnée à l'article 12, le préfet prend acte par arrêté de l'échéancier de mise en œuvre des moyens techniques nécessaires à la protection parasismique des installations. » Cet échéancier ne doit pas dépasser neuf ans à compter de la date de l'arrêté. Dans le cas où l'exploitant s'engage à arrêter définitivement l'installation dans ces mêmes délais, le préfet en prend acte en lieu et place de l'échéancier de mise en œuvre des moyens techniques.

2.1.2 Extraits de l'arrêté du 24 janvier 2011

L'article 3 de l'arrêté du 24 janvier 2011 définit la date d'abrogation de l'application de l'arrêté précédemment en vigueur :

Art. 3 – L'arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées est abrogé à compter du 1^{er} janvier 2013.

2.1.3 Identification des réglementations de référence

L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié s'appuie sur plusieurs réglementations, dont les suivantes, auxquelles il sera fait référence dans ce chapitre :

- Arrêté du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement

- **Arrêté du 29 septembre 2005** relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

2.2 Cadre normatif

L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié ne précise pas explicitement le cadre normatif applicable.

Le présent guide s'appuie sur le référentiel des Eurocodes et en particulier de l'Eurocode 8, norme relative au calcul des structures pour leur résistance au séisme.

En fonction du type d'équipement considéré, des normes spécifiques pourront être applicables. Celles-ci sont détaillées dans les guides d'application spécifiques.

2.2.1 Définition de la sollicitation sismique

La sollicitation sismique réglementaire donnée dans l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié est définie par des spectres de sol dont la construction est basée sur les définitions de l'Eurocode 8 – Partie 1, NF-EN 1998-1.

Les paramètres suivants sont directement tirés de ce texte réglementaire :

- Définition des classes de sol A à E selon la vitesse des ondes S dans les 30 premières couches de sol, $v_{s,30}$;
- Définition du spectre de réponse correspondant.

On note que l'arrêté ne rappelle pas la définition des classes de sol mais il fournit explicitement les niveaux d'accélération et les paramètres de définition des spectres en accord avec la classification des sols de la norme NF-EN 1998-1.

Les définitions et valeurs des paramètres et l'établissement des spectres de sol seront détaillés dans le chapitre suivant.

2.2.2 Cumul des actions et vérifications

Les règles de cumul des actions sont données dans la norme NF EN 1990 – Eurocode 0 : Base de calcul des structures. Le calcul des actions autres que sismiques devra être fait en conformité avec les normes NF EN 1991 – Eurocode 1 : Actions sur les structures.

Les vérifications de tenue sismique des équipements au séisme réglementaire doivent être conformes aux spécifications des normes Eurocode 8 et aux annexes nationales correspondantes.

Les calculs et vérifications doivent s'appuyer sur les normes suivantes en fonction du type d'équipement considéré :

- NF-EN 1998-1 : Eurocode 8 – *Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments* pour les vérifications générales d'équipements de type bâtiment ;
- NF-EN 1998-2 : Eurocode 8 – *Partie 2 : ponts* ;
- NF-EN 1998-4 : Eurocode 8 – *Partie 4 : silos, réservoirs et canalisations* ;
- NF-EN 1998-5 : Eurocode 8 – *Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques* pour les vérifications des fondations de l'ensemble des équipements
- NF-EN 1998-6 : Eurocode 8 – *Partie 6 : tours, mâts et cheminées* ;

Les autres normes Eurocode, qui complètent l'Eurocode 8 , pourront également être applicables en fonction du type de construction considérée :

- NF-EN 1992 : Eurocode 2 : Calcul des structures en béton ;
- NF-EN 1993 : Eurocode 3 : Calcul des structures en acier ;
- NF-EN 1994 : Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton ;
- NF-EN 1995 : Eurocode 5 : Calcul des structures en bois ;
- NF-EN 1996 : Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie ;
- NF-EN 1997 : Eurocode 7 : Calcul géotechnique ;
- NF-EN 1999 : Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

Dans le cas des réservoirs, les normes suivantes peuvent être utilisées pour les vérifications :

- Normes API (American Petroleum Institute)
- CODRES - Recommandations pour la Maintenance des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux
- CODAP – Code de construction pour les Appareils à Pression

L'ensemble des normes applicables par type d'équipement est donné en Annexe.

2.2.3 Dispositions constructives et mesures parasismiques

En plus des vérifications usuelles de résistance des éléments structuraux en conformité avec les normes, la conception parasismique demande l'application de dispositions constructives assurant le bon comportement de la structure sous séisme. Certains éléments non structuraux (cloisons lourdes, façades, couvertures, plafonds suspendus...) peuvent aussi devoir respecter des dispositions spécifiques afin d'assurer leur bon comportement sous séisme.

Ces mesures sont spécifiées dans les normes NF EN 1998 spécifiques à chaque type d'ouvrage.

Le « Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie » de l'AFPS, réédité en 2011 présente en détail les dispositions spécifiées dans les normes NF EN 1998 ainsi que des recommandations supplémentaires de bonne pratique. Le cahier technique n°36 de l'AFPS consacré au « comportement des éléments non-structuraux sous séisme » complète ces recommandations pour ces derniers.

3. Périmètre des études sismiques (article 12)

Ce chapitre a pour objectif d'établir le périmètre d'application de l'arrêté de l'article 12 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées.

Il aborde en particulier l'interprétation de la réglementation vis-à-vis des points suivants :

- identification des installations et équipements concernés ;
- choix des phénomènes à prendre en compte.

3.1 Éclaircissements et notions de base

3.1.1 *Installations visées*

L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié ne s'applique qu'aux installations « **SEVESO seuil haut** » ou « **SEVESO seuil bas** » (telles que définies par l'article L515-36 pour les installations « SEVESO seuil haut » et pour les installations SEVESO seuil bas par l'article L515-32 du code de l'environnement (hors L515-36) (voir également le code de l'environnement R511-11 qui précise le cas du dépassement direct et de la prise en compte de la règle de cumul).

Sont ainsi soumises :

- Les installations répondant à la règle de dépassement direct SEVESO seuil bas ou seuil haut
- Les installations conduisant à ce que la règle de cumul SEVESO seuil haut ou bas, sur au moins l'une des sommes S_a , S_b , ou S_c soit supérieure ou égale à 1, y compris lorsque l'établissement relève d'un statut SEVESO par dépassement direct.

L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié ne s'applique donc pas aux autres installations présentes au sein d'un établissement SEVESO seuil haut ou seuil bas (sauf cas spécifique pour la revue des OAP et BPAP).

3.1.2 *Équipements visés*

3.1.2.1 Généralités

Cet arrêté ministériel s'applique aux équipements au sein d'installations classées pouvant induire des phénomènes dangereux hors site en cas de séisme. Il ne vise donc pas systématiquement toutes les installations et tous les équipements d'un site.

Rien ne définit réglementairement, dans le cadre des Installations Classées, ce qu'est un équipement. Dans le cadre de cet arrêté doit être considéré comme équipement au sein d'installations classées l'ensemble des matériels, accessoires associés à l'exercice de l'activité visée par la nomenclature concernée. Le cas échéant, cela regroupera : les machines de fabrication ou de transfert de fluide, les appareils de procédé, les réservoirs de stockage, les tuyauteries, accessoires de tuyauteries, réseaux, etc...

Dans ce cadre il est défini :

- **Équipement à Risque Spécial (ERS)** : équipement dont la défaillance en cas de séisme conduits à des phénomènes dangereux susceptibles de générer des zones de dangers graves en dehors des zones sans occupation permanente hors des limites de propriété du site. A noter que seuls les effets directs sont pris en compte (**Ce type d'équipement est appelé dans l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié « Equipement critique au séisme »**).

Mais il faut également définir, dans le cadre de la protection parasismique de ces équipements à risque spécial :

- **Ouvrage Agresseur Potentiel (OAP)** : ouvrage ou équipement pouvant être source d'agressions mécaniques externes (d'énergie cinétique suffisante) d'un ERS ou d'une BPAP (ex : chute d'une cheminée induisant l'endommagement d'un réservoir). L'OAP ne fait pas obligatoirement partie d'une installation classée.
- **Important** : Seuls les ouvrages/équipements susceptibles de conduire à une agression mécanique d'énergie cinétique suffisante sur un ERS sont considérés comme OAP. Les équipements susceptibles de conduire à un effet Domino du type effet thermique et/ou surpression (effets étudiés au sein des études de dangers selon les définitions de l'arrêté du 29/09/2005) ne sont pas à prendre en compte en tant que OAP.
- **Barrière de Prévention, d'Atténuation d'effets ou de Protection (BPAP)** : ouvrage ou équipement dont la perte de fonctionnalité induirait, de façon indirecte, un phénomène dangereux conduisant à des effets létaux sur des zones à occupation humaine permanente (ex : utilité indispensable, dégâts dans la salle de commande ou blessures des opérateurs d'un ERS empêchant la mise en œuvre des procédures de sécurité, perte des moyens d'intervention ou d'extinction). La BPAP ne fait pas obligatoirement partie d'une installation classée.

Sont exclus du cadre de l'arrêté, en tant qu'équipement à risque spécial, les équipements ou ouvrages qui ne sont pas situés dans une installation classée, ou en dehors des limites d'une installation classée.

On peut citer à titre d'exemple :

- traitement d'eaux résiduaires (sauf si le traitement constitue une installation classée) ;
- réseaux d'égout et d'utilités (cf. paragraphe 3.2.5) ;
- pipelines, canalisations de transport (réglementées par un arrêté ministériel spécifique, voir ci-dessous) ;
- équipements des ateliers, stockages, installations non couverts par une nomenclature ICPE ateliers de maintenance ;
- bureaux administratifs, cantine.

Les équipements qui ne sont pas classés ERS, OAP ou BPAP sont alors du ressort du risque normal et soumis aux textes applicables aux équipements ou ouvrages à risque normal lorsqu'ils existent (arrêté du 22 octobre 2010 pour les bâtiments, arrêté du 26 octobre 2011 pour les ponts).

Les ERS, OAP et BPAP sont traités avec les mêmes exigences de niveau de séisme. Cependant, les exigences de comportement pour ces équipements seront en général plus contraignantes pour les ERS et les BPAP que pour les OAP dont le maintien de la fonctionnalité n'est pas nécessaire. La notion d'exigence de comportement de l'ouvrage dépend du scénario envisagé. Elle est détaillée au chapitre 5.

3.1.2.2 Cas des canalisations de transport (pipelines, gazoducs ...)

Les canalisations de transport à risque spécial sont visées par un arrêté ministériel spécifique (arrêté du 5 mars 2014) et sont donc exclus du périmètre de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

Le ministère a clarifié sa vision relative aux frontières d'application des différents textes de loi via la circulaire BSEI n° 07-133 et DPPR/SEI2/CB-07-0212 du 14 mai 2007, relative à la superposition réglementaire et interfaces relatives aux canalisations de transport et aux tuyauteries d'installations classées, reprise par la circulaire du 10 mai 2010. La limite est généralement fixée au premier organe

d'isolement placé dans l'installation classée (sauf installations spécifiques à la canalisation tel que gare racleur, filtre, comptage etc...).

3.1.2.3 Cas des bâtiments

On précise qu'un bâtiment peut être considéré comme équipement, c'est par exemple le cas d'un entrepôt de produit chimique.

Les bâtiments situés au sein d'installations classées qui seraient des équipements à « risque spécial » (tels que définis dans la section 3.1.2.1) du présent paragraphe, sont visés par l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

Dans les autres cas, l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal » (ou un arrêté spécifique) s'applique.

Note : Pour les nouveaux bâtiments qui seraient également classés en catégorie d'importance IV selon l'arrêté du 22 octobre 2010, la continuité de fonctionnement doit être assurée pour les sollicitations sismiques appropriées.

3.1.2.4 Cas des récipients mobiles et véhicules de transport de produits

Les récipients mobiles (fûts, GRV, bidons, et autres petits emballages) et les véhicules de transport de produits (camions-citernes, wagons, barges, navires...) ne sont pas considérés comme des équipements et donc ne relèvent pas de l'arrêté. Leur intégrité ou stabilité au séisme n'est donc pas exigée pour respecter l'arrêté du 4 octobre 2010. Ces récipients mobiles et véhicules de transport doivent respecter la réglementation sur le transport de matières dangereuses.

Note : il n'en reste pas moins qu'en dehors du contexte de l'étude séisme, l'étude de dangers de l'installation devra examiner la pertinence du positionnement des zones de stockages par rapport aux effets domino (effet thermique et/ou de surpression) susceptibles d'être générés sur les installations fixes en cas de séisme (de manière tout au moins qualitative).

En revanche, le contenu d'un récipient mobile ou d'un véhicule de transport de produit contenu dans ou raccordé à une installation classée doit éventuellement être pris en compte dans les scénarii associés à l'installation.

Exemple : un entrepôt de produits toxiques peut être classé à risque spécial si, en cas d'effondrement, le contenu des récipients génère des effets létaux à l'extérieur du site. Aucune tenue spécifique des récipients mobiles n'est demandée, mais leur contenu participe au scénario qui juge du classement risque spécial. L'entrepôt et ses aménagements servant à la fonction d'entreposage (rayonnages...) sont alors considérés comme des équipements.

Par contre si le bâtiment et ses aménagements servant à la fonction d'entreposage (rayonnages...) sont résistants au séisme, aucun scénario mettant en jeu les récipients mobiles contenus ne sera pris en compte.

Il serait également possible de le considérer comme un OAP agresseur potentiel des contenants qu'il abrite alors considérés, dans leur ensemble, comme un ERS.

3.1.3 Effets considérés

Les « zones de dangers graves pour la vie humaine » sont définies dans l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005. Ces zones sont délimitées par les premiers seuils des effets létaux pour les effets de nature :

- toxique ;

- thermique (nuage inflammable, rayonnement continu ou transitoire) ;
- surpression.

Les valeurs de référence relatives aux seuils de ces effets sont définies dans l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005.

Il convient notamment de retenir les seuils des effets létaux suivants :

Type d'effet	Seuil des premiers effets létaux
Surpression	140 mbar
Toxique	Seuils des effets létaux 1 % (en concentration ou en dose)
Thermique continu	Flux incident 5 kW/m ²
Thermique transitoire	Dose reçue : 1000 [(kW/m ²) ^{4/3}] s
Flashfire	Distance à la LII (limite inférieure d'inflammabilité) (critère ne figurant pas dans l'arrêté du 29 septembre 2005, mais apporté par la circulaire du 10 mai 2010)

Les autres effets ne sont pas à prendre en compte et notamment pas :

- la projection de fragments générés par l'éclatement ou l'explosion de réservoir ;
- les effets mécaniques liés à la chute d'objet ou effondrement d'une structure voisine (sauf agression d'un équipement à risque spécial) ;
- l'effondrement de bâtiment, sur des personnes, qui est éventuellement traité dans le cadre du risque normal (sauf si ce bâtiment abrite des fonctions nécessaires à la protection parasismique d'équipements à risque spécial ou s'il est lui-même à risque spécial) ;
- les effets sur l'environnement (pollution du sol, des eaux de surface, de l'air), ne générant pas d'effet au sens de l'arrêté du 29 septembre 2005

Dans le cadre de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, la notion de gravité du danger n'intervient pas. Il y a lieu de raisonner uniquement en termes de niveau d'intensité des effets (toxique, thermique et surpression) afin de déterminer les zones de dangers graves pour la vie humaine.

3.1.4 Zones touchées

3.1.4.1 Notion de site

Le texte ne considère que les zones de dangers graves pour la vie humaine hors du site.

La notion de site doit être comprise de la même manière que pour les études de dangers. Notamment en cas d'établissements voisins (ou de plateforme multi exploitants), la limite de site est constituée par le périmètre de la plateforme industrielle et non la limite de clôture de chaque exploitant. Les effets hors site concernent les populations hors du périmètre de la plate-forme. Les populations des établissements voisins sur la même plate-forme d'exploitation ne sont pas considérées hors site.

Peuvent être appliqués, pour cette notion de site, les principes de la fiche 1 B (chapitre 1.1.1) de la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

L'examen du respect des critères définis au sein de la fiche 1 B se fait au regard de la dernière version de l'étude de dangers.

3.1.4.2 Notion d'occupation humaine permanente

Aucune disposition n'est exigée par l'arrêté si les zones de dangers graves sont des « zones sans occupation humaine permanente », telles que définies à l'article 9 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié (cité au chapitre 2)

Afin d'être qualifiées « sans occupation humaine permanente » les zones doivent satisfaire l'ensemble des critères suivants :

- être sans habitation (collective, individuelle, même résidence secondaire), ni ERP (hôtel, restaurant, camping, station-service), ni local de travail permanent (bureaux, ateliers, entrepôts) ;
- ne compter aucune voie de circulation routière d'un trafic supérieur à 5 000 véhicules par jour. Ces voies sont recensées au niveau du département car classées "voies bruyantes". Ce seuil s'applique indépendamment du classement de la voie (route nationale, départementale, voie communale) ;
- les constructions nouvelles d'infrastructures citées dans les deux points précédents doivent être interdites par un plan local d'urbanisme (PLU), une servitude, ou un PPRT (pour les sites SEVESO seuil haut).

Une attention particulière doit être portée aux modifications en matière d'urbanisme :

- changements de PLU (Plan Local d'Urbanisme) ;
- aux sites repassant Seveso seuil bas avec disparition du PPRT.

Cela peut réintégrer des équipements dans le périmètre du risque spécial.

Il est rappelé dans le cadre de la définition de zone sans occupation humaine permanente, que :

- une zone de travail extérieure n'est pas un local de travail ;
- des baraques de chantiers ne sont pas des locaux de travail permanent ;
- les voies ferrées, les voies navigables, les eaux portuaires et les pistes d'aviation ne sont pas considérées comme des zones à occupation permanente.

3.1.4.3 Cas des terrains dont l'exploitant s'est assuré la maîtrise foncière

Les terrains dont l'exploitant s'est assuré la maîtrise foncière, peuvent être considérés comme faisant partie du site et donc non pris en compte pour juger du critère risque spécial, dans la mesure où ils sont sans habitation, la maîtrise foncière assurant *de facto* l'interdiction de construction.

3.1.5 Évènement sismique considéré

L'arrêté n'introduit la notion de niveau de séisme que pour l'étude de la tenue des équipements (ERS, OAP et BPAP) identifiés dans les scénarii sismiques et l'établissement des mesures parasismiques à mettre éventuellement en œuvre.

Le niveau de séisme est fixé soit de façon forfaitaire par la définition de spectres de sol dépendant de la zone sismique, de la classe de sol et de la nature nouvelle ou existante de l'installation, soit par une étude de zonage sismique locale au site d'implantation de l'installation. Seuls les mouvements vibratoires de l'action sismique, et les phénomènes induits associés dans le périmètre du site, sont considérés par l'arrêté.

Les déformations permanentes du sol liées à une rupture de faille en surface sont exclues dans le cadre de l'arrêté.

3.2 Application de l'arrêté pour la définition du périmètre

3.2.1 Les deux approches possibles

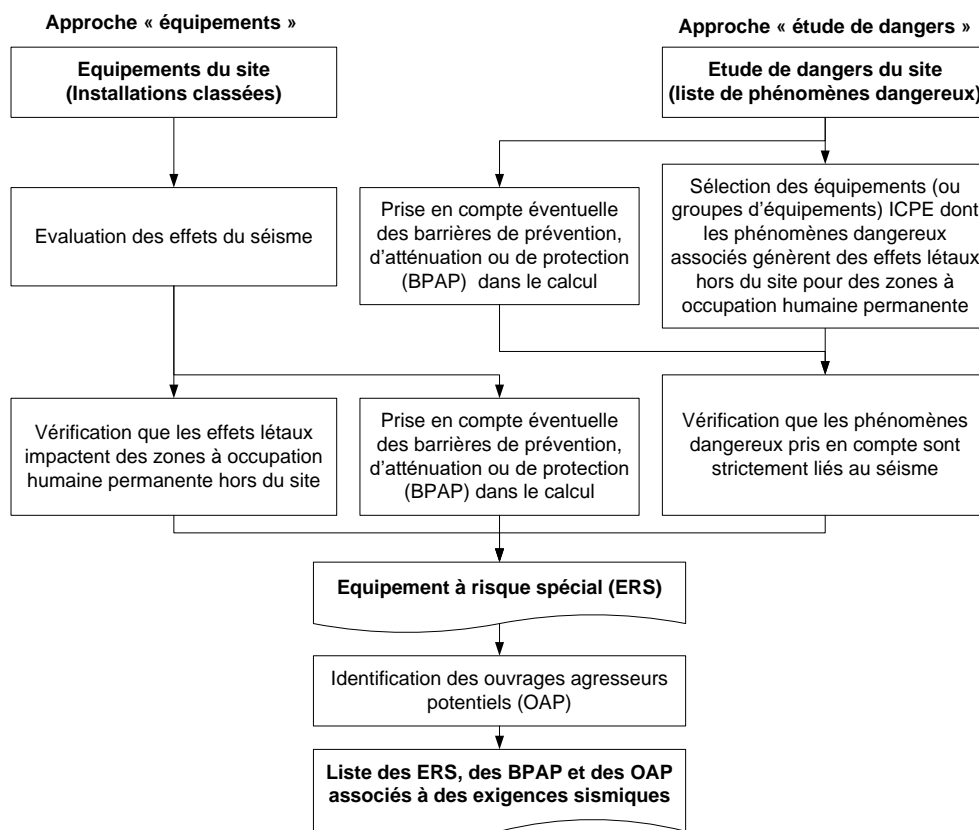
Le point clef est l'identification des équipements à risque spécial (ERS). Deux approches sont possibles et seront développées dans ce chapitre :

- Approche "Équipements" : partir des équipements, étudier les conséquences directes ou indirectes (via un OAP) d'un séisme sur ces équipements en tenant compte éventuellement de la présence de barrières adéquates et vérifier s'ils relèvent du risque spécial (voir critères au 3.1). Cette approche est développée en détail au chapitre 3.2.3.
- Approche "Étude de dangers" : partir de l'étude de dangers du site, sélectionner les phénomènes dangereux remplissant les critères du risque spécial (voir critères 3.1), identifier les équipements ou groupes d'équipements associés à ces phénomènes dangereux, vérifier que les événements initiateurs sont potentiellement liés au séisme. Cette approche est développée en détail au chapitre 3.2.4.

La suite des deux approches est la même : identification des ouvrages agresseurs potentiels, et des barrières de prévention, d'atténuation des effets ou de protection.

Le logigramme de principe ci-dessous explicite les deux méthodes ; des logigrammes détaillés spécifiques à chacune des méthodes sont donnés dans la suite du document.

Le périmètre « installation classée » s'entend comme défini au chapitre 3.1 du présent guide DT106 qui constitue le premier filtre à appliquer.



3.2.2 Établissement des scénarii liés au séisme

Les deux approches ne considèrent que les conséquences des actions sismiques.

3.2.2.1 Type de scénario

Les scénarii à retenir sont généralement liés à une perte de confinement sous les effets des actions sismiques. De cette perte de confinement découlent des phénomènes dangereux de type feux, explosions, fuites toxiques...

L'annexe B indique les scénarii et phénomènes dangereux à retenir pour différents types d'équipement.

3.2.2.2 Niveau de séisme

Dans un premier temps, les scénarii possibles liés au séisme ne tiennent pas compte du niveau de séisme et l'on envisagera des pertes de confinement et phénomènes dangereux associés pour tous les équipements ou groupes d'équipements étudiés de façon à sélectionner les équipements à risque spécial.

C'est lors de l'étude de la tenue aux sollicitations au séisme que sera introduit le niveau de séisme.

De ces mesures parasismiques résulteront des phénomènes dangereux "réduits" car il est possible que les mesures parasismiques limitent les phénomènes dangereux mais ne les suppriment pas.

3.2.2.3 Conséquences de l'approche déterministe

Comme indiqué précédemment, l'étude séisme exigée par l'article 12 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié repose sur une approche déterministe du risque sismique. Il n'y a donc pas de filtre de probabilité.

Étant donnée l'absence de notions probabilistes, il n'y a pas de notion de niveau de confiance des barrières mises en place. Ces barrières (par exemple vanne d'isolement se fermant automatiquement en cas de séisme) sont évaluées de façon déterministe sur des critères qui sont fixés dans les guides techniques spécifiques.

Si une barrière répond aux critères des guides techniques, sa fiabilité est prise égale à 1 pour l'étude séisme (elle fonctionne). A contrario si la barrière n'est pas dimensionnée au séisme elle ne doit pas être prise en compte dans la modélisation des effets (elle est considérée comme inopérante. **Aucun scénario prenant en compte la défaillance de la barrière ne sera pris en compte dans les scénarii réduits).**

De même, un équipement dont l'étude a démontré la tenue pour le niveau de séisme de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié ne générera plus de phénomène dangereux réduit en cas de séisme.

3.2.2.4 Concomitances d'événements et d'actions sismiques

Le seul événement initiateur à envisager est le séisme. L'absence d'évaluation de la probabilité implique de ne pas envisager :

- la prise en compte des événements secondaires potentiellement initiés par un séisme, et hors du champ d'application de l'arrêté :
 - tsunami ;
 - rupture de barrage.
- la concomitance d'événements accidentels tels que :
 - séisme et conditions météorologiques exceptionnelles. séisme et foudre ;
 - séisme et niveau exceptionnel de nappe ;

- séisme et déviation du procédé, sauf si la dérive du procédé induite par un séisme conduit à la perte de confinement (par exemple manque d'utilité conduisant à un emballement de réaction et à la perte de confinement).

Ces règles sont en cohérence avec la norme NF EN 1990 selon laquelle il convient de ne cumuler aucune action accidentelle avec le séisme.

Important :

- Il faut considérer les conséquences de la survenue d'un séisme **dans les conditions normales d'exploitation**. Une perte du contrôle commande liée au séisme induisant par exemple une montée en température d'une capacité ne saurait être considérée comme un événement concomitant avec la rupture de l'équipement lié au même séisme compte-tenu de la différence de cinétique de ces événements. La rupture à température maximale n'est donc pas à prendre en compte.
- En revanche si la survenue d'un séisme induit la perte d'une utilité indispensable à la maîtrise d'un procédé sensible (par exemple un refroidissement de réaction) et conduit à une perte de confinement alors la dérive du procédé doit être considérée comme une conséquence du séisme. Cette utilité indispensable est potentiellement considérée comme BPAP.

En d'autres termes seule la destruction ou la dégradation d'une fonction par le séisme dont l'évolution post séisme conduit à une perte de confinement est à étudier

Des précisions complémentaires sur ce sujet sont apportées à l'annexe B.

3.2.2.5 Agressions externes

Les agresseurs potentiels hors du site ou liés à des effets induits hors site ne sont pas à considérer.

Précision : L'arrêté du 4 octobre 2010 modifié s'applique aux installations SEVESO et aux équipements qui les composent. Certes les OAP et BPAP peuvent ne pas faire partie de l'installation SEVESO mais on se limite à l'emprise foncière de l'exploitant SEVESO.

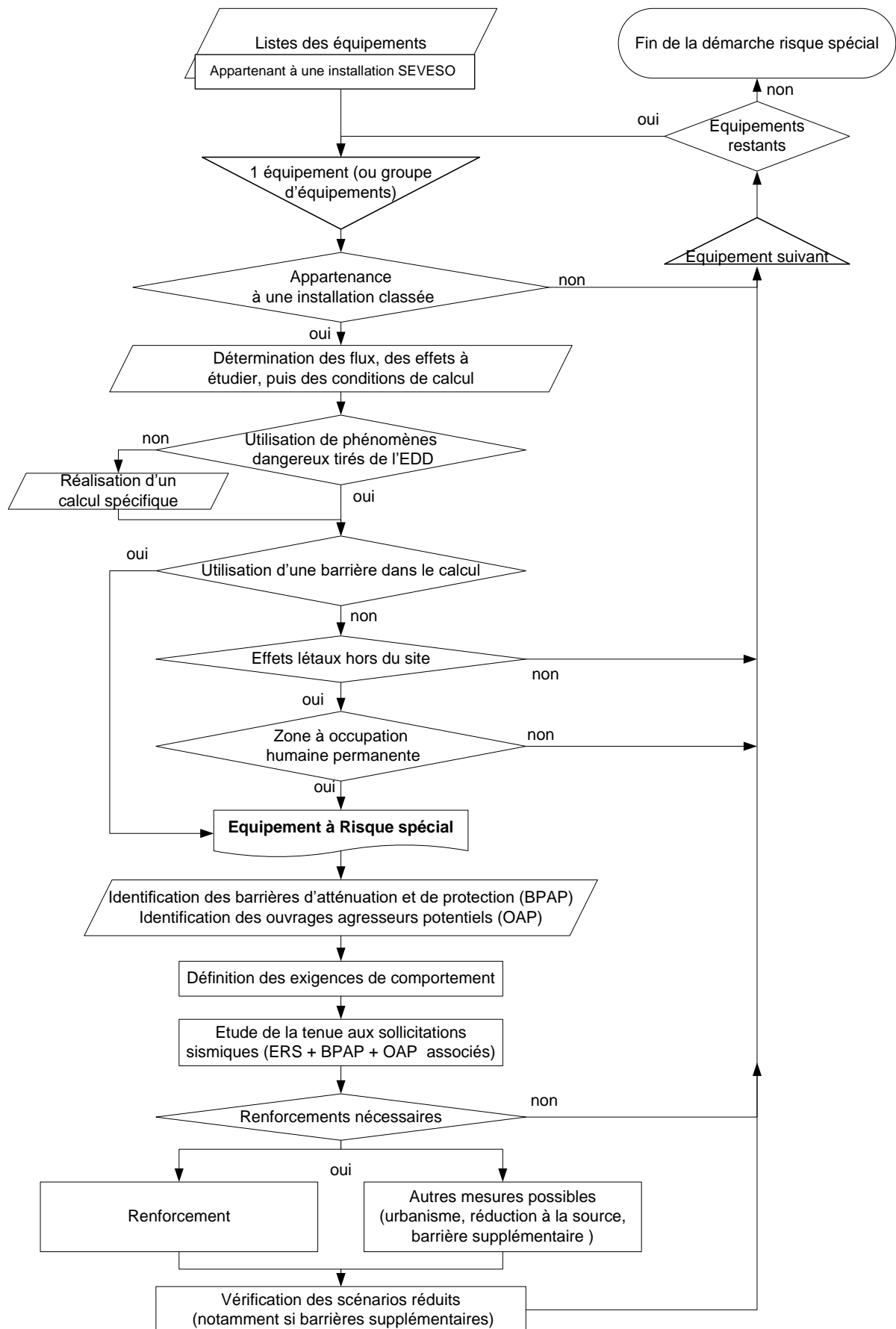
Par conséquent l'OAP d'un industriel voisin n'est pas à prendre en compte (sauf dans le cas d'une approche « plateforme » avec le voisin industriel pour la prise en compte de la gravité cf. fiche gravité circulaire du 10 mai 2010), de même qu'un équipement présent sur la voie publique (exemple : poteau électrique, bâtiment, etc...).

Les agresseurs potentiels liés à des effets induits sur le site sont pris en compte (cas d'une tuyauterie adossée à un talus : la stabilité du talus est à vérifier).

3.2.2.6 Cumul des effets issus de plusieurs équipements

L'arrêté demande de raisonner équipement par équipement (au sens d'une unité fonctionnelle) pour évaluer les effets létaux, donc le cumul des effets induits par plusieurs équipements n'est pas à prendre en compte.

3.2.3 Approche "Équipements"



3.2.3.1 Liste des équipements concernés

La démarche consiste à partir de la liste des équipements qui doit être exhaustive. Il est éventuellement possible de grouper des équipements qui ne seraient pas isolables (cas d'une colonne à distiller, de son bouilleur et de son condenseur) et de considérer l'ensemble obtenu comme un équipement ; les effets sont alors calculés en conséquence.

Les équipements à prendre en compte sont ceux faisant partie d'une installation SEVESO seuil haut ou bas.

On veillera à définir parfaitement l'équipement ou le groupe d'équipements et, en particulier, les limites de celui-ci.

Pour les lignes et canalisations (au sens tuyauterie d'usine), il pourra être opportun de considérer des tronçons dans la mesure où les limites de ces tronçons permettent un réel isolement en cas de séisme :

- soit pour des raisons géométriques insensibles au séisme ;
- soit grâce à l'existence de barrières susceptibles d'isoler le tronçon, dans la mesure où la pertinence de celles-ci en cas de séisme est avérée (donc à intégrer dans les barrières de prévention, d'atténuation et de protection).

3.2.3.2 Étude des conséquences en cas de séisme

Chaque équipement de l'installation (appareil, ligne ou canalisation, bâtiment, autre construction) devra faire l'objet d'une analyse :

- des effets (toxiques, thermiques et de surpression) qu'il peut générer en cas de séisme, et ce dans le but de déterminer s'il s'agit d'un ERS (cf. § 3.1.2.),
- des équipements environnants susceptibles de l'agresser en cas de séisme dans le but de déterminer les éventuels OAP environnants (cf. § 3.1.2.).

La section 0 et l'annexe B fournissent plus de détails concernant la sélection des scénarii liés au séisme.

Faute d'étude spécifique, on pourra éventuellement utiliser des phénomènes dangereux majorants associés au même équipement tirés de l'étude de dangers.

Précision : pour l'étude séisme, on s'intéresse au potentiel de danger de l'équipement, c'est-à-dire à sa ruine causée par le séisme alors que l'équipement se trouve dans ses conditions de fonctionnement normal (pression, température, niveau de remplissage, ...).

Aussi, il faut veiller à ce que certains scénarios non pris en compte dans l'étude de danger et susceptibles de générer des effets hors des limites du site, notamment en cas d'agression par des OAP (par exemple une augmentation de la taille de brèche, voire la ruine catastrophique d'un équipement) soient bien étudiés dans le cadre de l'étude séisme.

La présence de barrières pertinentes en cas de séisme pourra être directement prise en compte selon les critères qui sont fixés dans les guides techniques spécifiques. Si une barrière répond aux critères des guides techniques, elle pourra être prise en compte dans le calcul des conséquences du scénario.

L'équipement considéré sera alors, par défaut, considéré comme à risque spécial (saut de l'étape 3.2.3.3).

Exemples pour un réservoir d'essence dans sa cuvette : seuls des scénarii limités à la cuvette (feux, évaporation) sont généralement étudiés, surtout pour des réservoirs de grande taille. Le bac sera considéré comme ERS et la cuvette comme BPAP. Mais différents choix d'exigence de comportement sont possibles. Les renforcements parasismiques pourront porter soit sur le réservoir, soit sur la cuvette, soit sur une combinaison des deux.

A contrario s'il est possible de calculer les effets d'une perte de confinement d'un réservoir sans sa cuvette, le problème ne se pose pas et il y a lieu de procéder à la vérification du critère risque spécial.

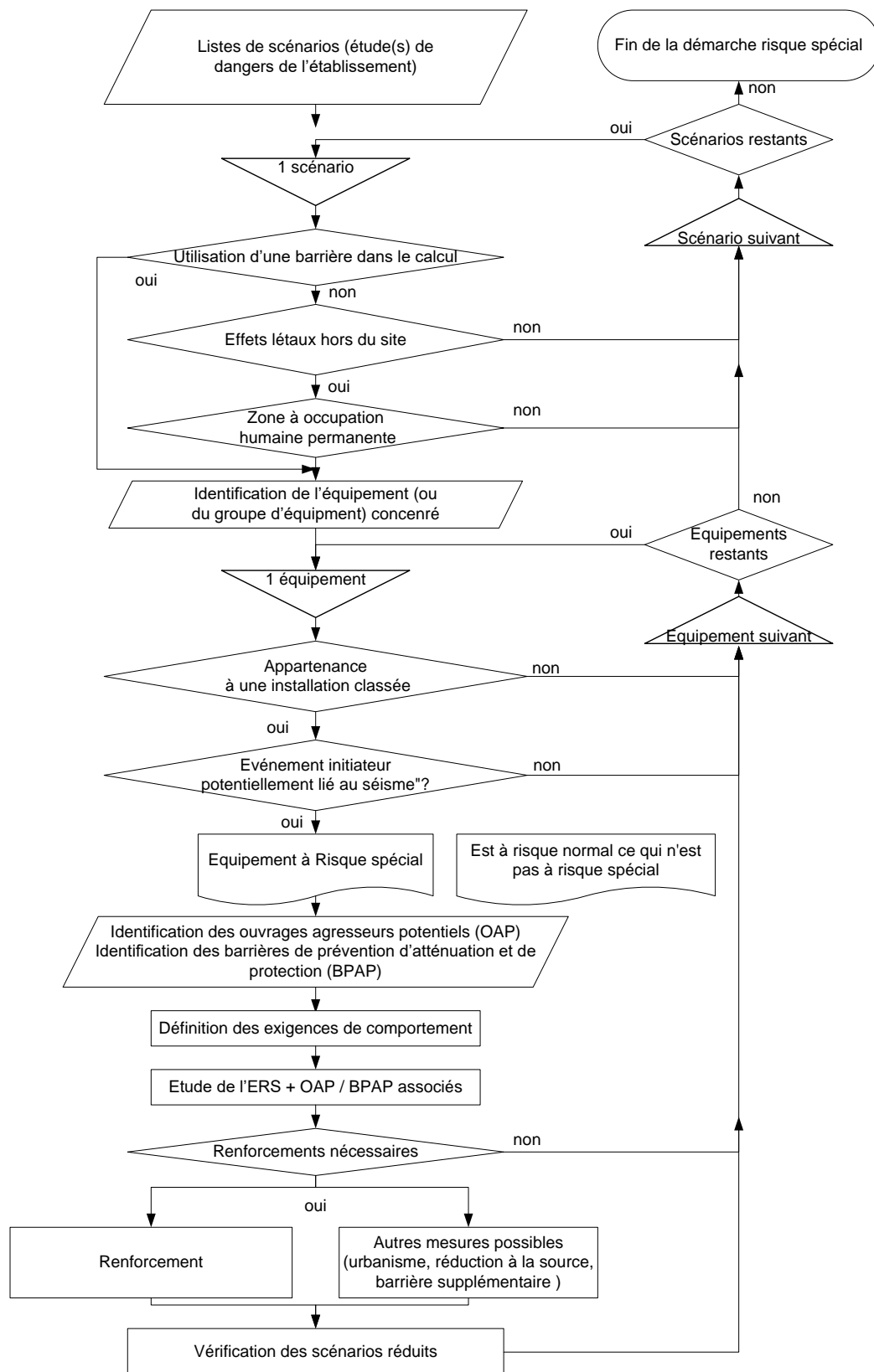
3.2.3.3 Vérification du critère du risque spécial

Le filtre suivant consiste à ne retenir que les équipements dont les scénarii sismiques relèvent du risque spécial (premiers effets létaux hors du site sauf zone sans occupation humaine) dont le détail des critères est exposé au chapitre 3.1.

Si le ou les conséquences des phénomènes dangereux issus des scénarii sismiques étudiés ne satisfont pas aux critères "risque spécial" alors l'équipement relève du risque normal.

3.2.4 Approche "Études de dangers"

Le logigramme ci-dessous résume la démarche



La démarche pratique consiste à partir non pas des équipements, mais de l'étude de dangers qui doit bien entendu être exhaustive et d'appliquer ensuite différents filtres qui conduiront à la liste des équipements à risque spécial.

3.2.4.1 Sélection des scénarii dont les phénomènes dangereux satisfont aux critères du risque spécial

Le premier filtre consiste à sélectionner uniquement les scénarii dont les phénomènes dangereux relèvent du risque spécial (premiers effets létaux hors du site sauf zone sans occupation humaine permanente) dont le détail des critères est exposé au chapitre 3.1.

Il se peut qu'aucun phénomène dangereux issu du scénario ne satisfasse aux critères "risque spécial". Dans ce cas aucun équipement ne sera visé.

3.2.4.2 Cas particuliers des scénarii calculés avec barrières

Certains scénarii sont calculés en intégrant une barrière dont le niveau de confiance est de 100 % (la défaillance de la barrière ne peut être envisagée car les effets de sa défaillance ne sauraient être quantifiés). Il s'agit le plus souvent de barrières passives de type constructif, tels que les parois des cuvettes.

Ces scénarii doivent être spécifiquement identifiés puisque la tenue aux sollicitations sismiques de la barrière prise en compte devra être vérifiée.

L'équipement considéré sera alors, par défaut, considéré comme à risque spécial même si les premiers effets létaux ne s'étendent pas hors du site (critère risque spécial). Pour être classé risque spécial, il doit toutefois passer le filtre "scénario séisme" exposé au 3.2.4.4).

A noter que l'on peut toujours faire un calcul spécifique sans les barrières pour reclasser l'équipement en risque normal si les effets létaux ne sortent pas du site.

3.2.4.3 Identification de l'équipement ou du groupe d'équipements concernés

Pour chaque scénario dont les phénomènes dangereux satisfont aux critères "risque spécial", ou les cas particuliers du 3.2.4.2), il faut identifier l'équipement ou le groupe d'équipements concernés. En effet, un même scénario peut concerner plusieurs équipements notamment lorsqu'il n'y a pas d'isolement entre les différents équipements (exemple : capacité et ses tuyauteries associées, colonne à distiller avec son rebouilleur, son condenseur et ballon de reflux, ...).

Les équipements à prendre en compte sont ceux faisant partie d'une installation SEVESO seuil haut ou bas.

3.2.4.4 Sélection des scénarii liés au séisme

Le filtre consiste à ne retenir parmi les scénarii que ceux liés au séisme. La connaissance des équipements concernés est un préalable car les effets d'un séisme varient selon l'équipement considéré. L'annexe B donne des indications pour différents types d'équipements.

Tous les scénarii de l'étude de dangers ne sont pas à considérer. En effet, l'étude de dangers de l'installation présente un grand nombre de scénarii. L'utilisation exhaustive de ceux-ci pour sélectionner les éléments qui entrent dans le périmètre de l'étude de tenue au séisme n'est pas justifiée. En effet, seuls les scénarii liés au séisme et dans les conditions existantes lors de la survenue d'un séisme sont à prendre en compte.

Plus précisément, les scénarii se développent en nœuds papillon autour d'un Événement Redouté Central (ERC) et éventuellement d'un ou de plusieurs événements redoutés secondaires. Cependant :

- Tous les ERC d'une étude de dangers ne sont pas générés par un séisme.
- L'ERC se produit très souvent avec des paramètres physiques (température, pression, débits...) plus pénalisants que la marche normale (cas de déviation du procédé). Dans

ces conditions, les conséquences calculées pour les premiers effets létaux sont majorées par rapport à ce qu'elles seraient en cas de séisme.

- Un ERC génère plusieurs phénomènes dangereux. Les barrières figurant dans les arbres d'évènements associées sont traitées de façon probabiliste (probabilité de défaillance) dans l'étude de danger. Dans le cas du séisme, ces défaillances de barrière ne surviendront pas en cas de barrières dimensionnées au séisme.

Dans ces conditions, la reprise exhaustive des phénomènes dangereux n'est pas justifiée. Le choix de phénomènes dangereux aux conséquences les plus importantes peut permettre une approche rapide et simplifiée mais très majorante donc très pénalisante.

Les scénarii suivants ne doivent notamment pas être retenus :

- les scénarii liés aux erreurs humaines ou à de l'inattention ;
- les événements liés à la corrosion dans la mesure où ils peuvent être dissociés des conséquences d'un séisme ;
- les agressions liées aux travaux ;
- les agressions extérieures (chute d'avion, accident de transport,...) ;
- certains scénarii liés à des dérives de paramètres de procédé (voir 3.2.2.4 du présent guide).

Il y a lieu d'ajouter à cette liste les scénarii non retenus en application de divers textes (arrêté du 26 mai 2014, circulaire du 10 mai 2010), et tout autant ne pas cumuler ces événements avec un séisme :

- événements climatiques d'intensité supérieure aux événements historiquement connus ou prévisibles pouvant affecter l'installation, selon les règles en vigueur ;
- rupture de barrage de classe A ou B au sens de l'article R. 214-112 du code de l'environnement ou d'une digue de classe A, B ou C au sens de l'article R. 214-113 de ce même code ;
- actes de malveillance.

Dans la pratique, les scénarii sont liés à plusieurs types de causes. L'annexe B donne des indications des scénarii à retenir pour différents types d'équipements.

Précision : comme mentionné au 3.2.3.2 pour l'étude séisme, on s'intéresse au potentiel de danger de l'équipement, c'est-à-dire à sa ruine causée par le séisme alors que l'équipement se trouve dans ses conditions de fonctionnement normal (pression, température, niveau de remplissage, ...).

Aussi, il faut veiller à ce que certains scénarios non pris en compte dans l'étude de danger et susceptibles de générer des effets hors des limites du site, notamment en cas d'agression par des OAP (par exemple une augmentation de la taille de brèche, voire la ruine catastrophique d'un équipement) soient bien étudiés dans le cadre de l'étude séisme.

Enfin, on vérifiera que, si le scénario fait appel à des barrières au niveau du calcul de ses conséquences, celles-ci sont bien pertinentes en cas de séisme, c'est-à-dire qu'elles répondent aux critères des guides techniques, et qu'elles sont incluses dans la liste des barrières à vérifier.

3.2.5 Suite de la démarche (commune aux deux approches)

3.2.5.1 Ouvrages Agresseurs Potentiels (OAP)

Une fois la liste des équipements à risque spécial obtenue il faut identifier les éventuels ouvrages agresseurs potentiels (OAP).

Il n'y a pas de méthode particulière permettant cette identification principalement basée sur une visite de terrain et/ou une étude sur plan (voir le chapitre 7)

Des éléments d'appréciation sont données à l'annexe B.

3.2.5.2 Barrières de Prévention, d'Atténuation des effets ou de Protection (BPAP)

Une liste de barrières typiques est donnée en annexe B3 pour différents équipements.

Leur efficacité est subordonnée au respect de guides spécifiques ou résulte d'une réflexion et de dispositions ad hoc de l'industriel pour ces cas éventuellement non couverts par ces guides.

La présence de barrières pertinentes en cas de séisme pourra être directement prise en compte dans le calcul des conséquences du scénario. Ces barrières doivent être identifiées pour étudier leur tenue dans l'étape suivante.

Les utilités indispensables dont l'absence peut entraîner des phénomènes dangereux relevant du risque spécial doivent également être identifiées.

4. Mouvement sismique

L'action sismique réglementaire définie dans l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié est représentée sous forme de spectres de réponse en accélération, $S_e(T)$, pour les directions horizontale et verticale. Seuls les mouvements vibratoires de la sollicitation sismique sont considérés.

Les spectres sont définis soit par une forme spectrale standard, forfaitaire, qui dépend de la zone sismique et de la classe de sol, soit par une étude de zonage sismique locale (voir paragraphe 4.2). Les accélérations d'ancrage de ces spectres sont censées correspondre pour les installations nouvelles à une probabilité annuelle de dépassement inférieure à 2×10^{-4} , soit une période de retour au moins égale à 5000 ans; pour les installations existantes, les accélérations d'ancrage des spectres correspondent à une probabilité annuelle de dépassement de 3.3×10^{-4} , soit une période de retour au moins égale à 3000 ans.

L'Article 14 de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié offre deux alternatives pour la définition de l'action sismique à retenir :

- soit par utilisation du zonage réglementaire et de la nature du sol ;
- soit par une étude de zonage sismique locale.

Dans la suite de ce chapitre on détaille la première approche correspondant à l'utilisation du zonage actuel défini dans le décret 2010–1255. Pour la définition de l'action par une étude de zonage sismique locale, on se référera au guide technique de l'AFPS correspondant (Guide pour la conception des cahiers des charges relatifs aux études d'aléa sismique en cohérence avec l'arrêté du 15/02/2018), étant entendu que l'étude de zonage sismique locale est réputée fournir tous les paramètres de définition du mouvement sismique détaillés dans la suite de ce chapitre.

Ce chapitre vise à guider l'utilisateur dans la détermination des paramètres nécessaires à l'établissement du spectre de réponse forfaitaire propre à l'équipement étudié. Il fournit également les formules permettant de déterminer des paramètres complémentaires liés à l'action sismique décrite par le spectre de réponse réglementaire, pouvant être nécessaires à l'étude de l'équipement : déplacements et vitesses de sol, et magnitude du séisme (pour les études de liquéfaction). Enfin il établit les règles de cumul de l'action sismique avec les autres actions.

4.1 Classification

La définition de l'aléa sismique réglementaire nécessite de connaître :

- la zone de sismicité dans laquelle se situe le site ;
- la classe de sol sur lequel est construit l'équipement ou l'ouvrage.

4.1.1 *Zone de sismicité*

Les zones de sismicité sont définies dans le décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique. On distingue les 5 zones suivantes :

- Zone 1, de très faible sismicité ;
- Zone 2, de faible sismicité ;
- Zone 3, de sismicité modérée ;
- Zone 4, de sismicité moyenne ;
- Zone 5, de forte sismicité.

La répartition des communes entre ces zones est effectuée par le décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français.

La carte de zonage sismique de la France issue de ce décret est présentée ci-après :

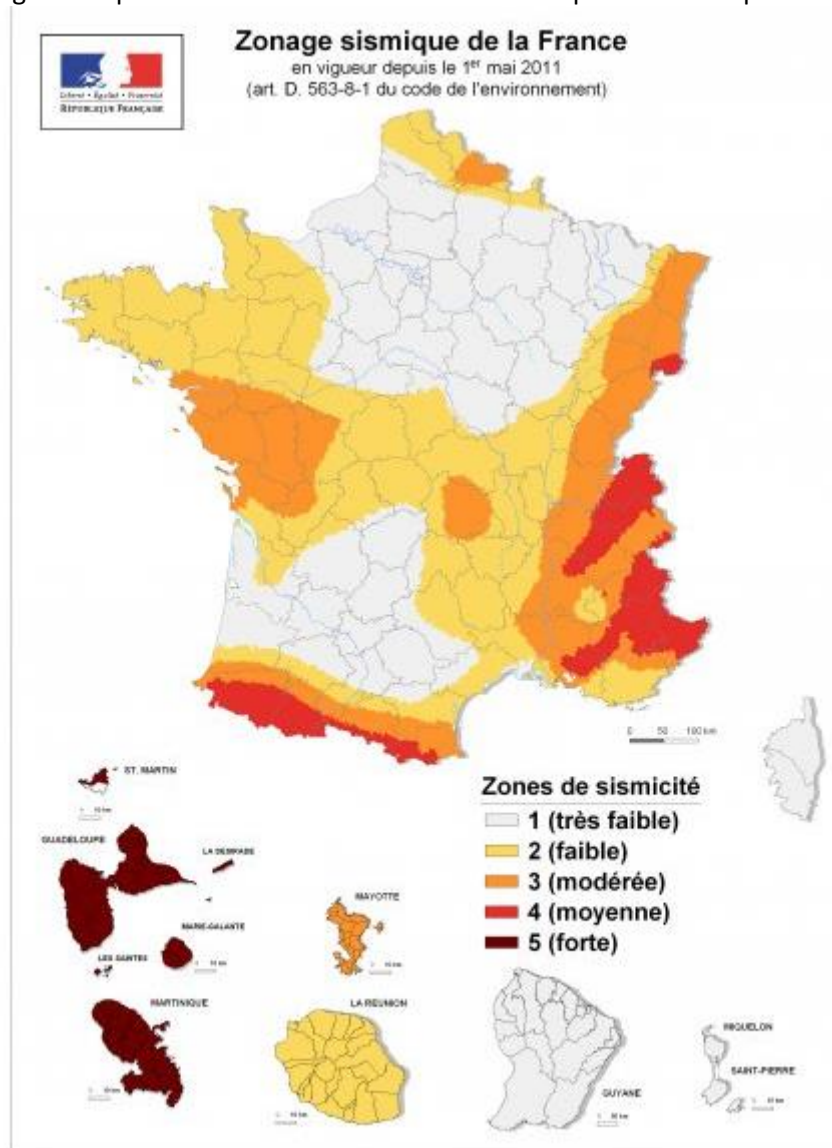


Figure 4.1 – Délimitation des zones de sismicité pour le territoire français

Un fichier Excel contenant l'ensemble des communes françaises et la zone de sismicité réglementaire correspondante est accessible sur le site officiel du Plan Séisme, programme national de prévention du risque sismique : <http://www.planseisme.fr/Zonage-sismique-de-la-France.html>

4.1.2 Classe de sol

La sollicitation sismique dépend de la nature du sol. Dans la réglementation, cet effet est pris en compte par la définition de classes de sol, définies dans la norme NF EN 1998-1.

La norme NF EN 1998-1 définit :

- cinq classes standard (A, B, C, D et E) pour lesquelles l'action sismique réglementaire de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié est applicable ;
- deux classes spéciales (S_1 et S_2) pour lesquelles la sollicitation sismique réglementaire ne peut être appliquée (cf. paragraphe 4.2.6).

Le tableau suivant, issu de la norme NF EN 1998-1 établit la classe de sol à partir du profil stratigraphique et des paramètres de sol :

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (coups/30cm)	c_u (kPa)
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	>800	-	-
B	Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360-800	>50	>250
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180-360	15-50	70-250
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes.	<180	<15	<70
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de v_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $v_s > 800$ m/s.			
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($PI > 40$) et une teneur en eau importante.	<100 (valeur indicative)	-	10-20
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1 .			

Tableau 4.1 : Définition des classes de sol

La classification d'un site est effectuée selon la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement, $v_{s,30}$, établie à partir des propriétés des couches de sol des 30 m supérieurs selon l'expression suivante :

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

Où h_i (m) et v_i (m/s) désignent l'épaisseur et la célérité des ondes de cisaillement (à un niveau de distorsion inférieur ou égal à 10^{-5}) de la i -ème formation ou couche, sur un total de N couches de sol existantes sur les 30 m supérieurs.

A défaut de la connaissance de $v_{s,30}$, pour les sols de classe B, C ou D, les paramètres suivants peuvent être utilisés pour caractériser le type de sol :

- la valeur des essais de pénétration N_{SPT} pour les sols sableux ;
- la cohésion c_u pour les sols argileux.

4.2 Définition de l'action sismique

4.2.1 Spectres réglementaires

L'action sismique réglementaire définie dans l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié est tri directionnelle. Les composantes horizontales et la composante verticale sont décrites par des spectres de réponse en accélération.

Il convient donc de tenir compte de l'action de la composante verticale du séisme pour les 5 zones de sismicité, quelle que soit la valeur de l'accélération verticale.

4.2.1.1 Spectre de réponse élastique horizontale

L'action sismique horizontale est représentée par un spectre de réponse horizontale de la forme suivante :

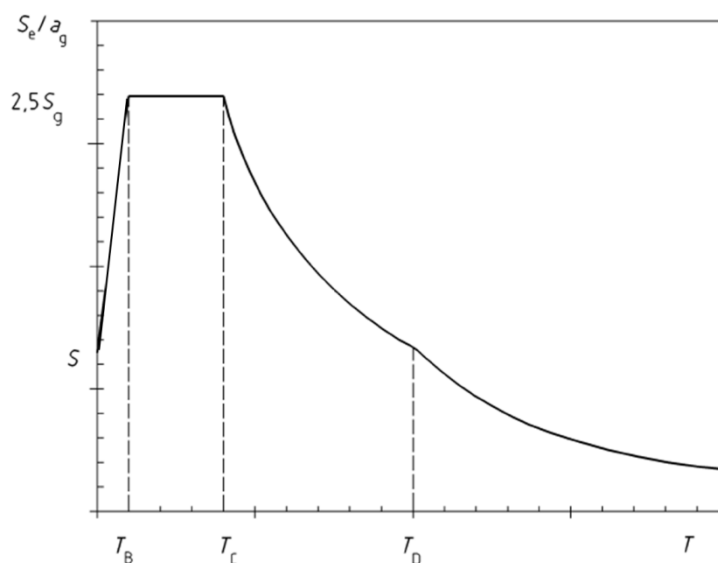


Figure 4.2 – Forme du spectre de réponse élastique pour la direction horizontale

Le spectre de réponse élastique pour les composantes horizontales de l'action sismique, est défini par les expressions suivantes issues de la norme NF EN 1998-1 :

Domaine des périodes courtes : $0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (2.5\eta - 1) \right]$

Domaine de pseudo-accélération constante : $T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta$

Domaine des pseudo-vitesses constantes : $T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]$

Domaine de déplacement spectral constant : $T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$

Les paramètres de définition du spectre sont les suivants :

- **η coefficient de correction** de l'amortissement ξ si un amortissement différent de 5% est utilisé :

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)}$$

- **a_g accélération horizontale de calcul**, dépendant de la zone de sismicité, fixée par les Articles 14-1 I a) (installations nouvelles) et 14.1 I b) (installations existantes) de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Zone de sismicité	Installations nouvelles	Installations existantes
Zone 1	0.88	0.74
Zone 2	1.54	1.3
Zone 3	2.42	2.04
Zone 4	3.52	2.96
Zone 5	6.60	5.55

Tableau 4.2 : accélérations horizontales de calcul a_g (m/s²)

- **S paramètre de sol**, dépendant de la zone de sismicité et de la classe de sol, fixé par l'Article 14.1 II de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Classe de sol	Zones de sismicité 1 à 3	Zones de sismicité 4 et 5
A	1	1
B	1.35	1.2
C	1.5	1.15
D	1.6	1.35
E	1.8	1.4

Tableau 4.3 : paramètre de sol S

- **T_B , T_C et T_D périodes définissant les branches du spectre**, dépendant de la zone de sismicité et de la classe de sol, fixées par l'Article 14.1 III de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Classe de sol	Zones de sismicité 1 à 3			Zones de sismicité 4 et 5		
	T_B	T_C	T_D	T_B	T_C	T_D
A	0.03	0.2	2.5	0.15	0.4	2
B	0.05	0.25	2.5	0.15	0.5	2
C	0.06	0.4	2	0.2	0.6	2
D	0.1	0.6	1.5	0.2	0.8	2
E	0.08	0.45	1.25	0.15	0.5	2

Tableau 4.4 : périodes de définition du spectre horizontal (s)

4.2.1.2 Spectre de réponse élastique verticale

Le spectre de réponse élastique pour la composante verticale de l'action sismique est défini par les expressions suivantes issues de la norme NF EN 1998-1 :

Domaine des périodes courtes : $0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \left[1 + \frac{T}{T_B} (3.0\eta - 1) \right]$

Domaine de pseudo-accélération constante : $T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = 3.0a_{vg}\eta$

Domaine des pseudo-vitesses constantes : $T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = 3.0a_{vg}\eta \left[\frac{T_C}{T} \right]$

Domaine de déplacement spectral constant : $T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = 3.0a_{vg}\eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$

Les paramètres de définition du spectre sont les suivants :

- **η coefficient de correction** de l'amortissement ξ si un amortissement différent de 5% est utilisé :

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)}$$

- **a_{vg} accélération verticale de calcul**, dépendant de la zone de sismicité, fixée par les Articles 14.1 I a) (installations nouvelles) et 14.1 I b) (installations existantes) de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Zone de sismicité	Installations nouvelles	Installations existantes
Zone 1	0.79	0.67
Zone 2	1.39	1.17
Zone 3	2.18	1.84
Zone 4	2.82	2.37
Zone 5	5.28	4.44

Tableau 4.5 : accélération verticale de calcul a_{vg} (m/s²)

- **T_B , T_C et T_D** périodes définissant les branches du spectre, dépendant seulement de la zone de sismicité, fixées par l'Article 14.1 III de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Zone de sismicité	T_B	T_C	T_D
Zones 1 à 3	0.03	0.20	2.5
Zones 4 et 5	0.15	0.40	2

Tableau 4.6 : périodes de définition du spectre vertical (s)

Il existe deux différences principales entre les spectres de réponse horizontale et verticale :

- Le facteur d'amplification entre l'accélération du sol et la pseudo-accélération au plateau est de 3 dans la direction verticale au lieu de 2.5 pour le spectre horizontal ;
- Le spectre vertical est **indépendant de la classe de sol**.

4.2.2 Déplacements de sol

La valeur de calcul du déplacement du sol d_g correspondant à une accélération du sol de calcul a_g est établie à partir de la norme NF EN 1998-1 par la formule suivante :

$$d_g = 0.025 a_g S T_c T_D$$

S , T_c et T_D sont les paramètres dépendant de la classe de sol et de la zone de sismicité définis dans le cadre de la définition des spectres (4.2.1). L'origine de la formule précédente est explicitée au paragraphe 4.5.

4.2.3 Vitesses particulières

La vitesse particulière de calcul du sol v_g correspondant à une accélération du sol de calcul a_g est obtenue par la formule :

$$v_g = \frac{a_g S T_c}{2\pi}$$

S et T_c sont les paramètres dépendant de la classe de sol et de la zone de sismicité définis dans le cadre de la définition des spectres (4.2.1). L'origine de la formule précédente est explicitée au paragraphe 4.5.

4.2.4 Magnitudes

La caractérisation de l'action sismique en termes de magnitude de moment M_w est nécessaire pour l'étude de risque de liquéfaction du sol.

Les valeurs des accélérations de calage des spectres réglementaires sont issues d'une étude d'aléa sismique probabiliste réalisée par GEOTER en 2000. L'accélération maximale pour chaque zone est associée à une période de retour d'au moins 5000 ans.

Une désagrégation de l'aléa sismique permet de déterminer la contribution de chaque source sismique à l'accélération de la zone considérée. Ainsi, à chaque zone de sismicité, est attribuée la magnitude dont la contribution est la plus importante.

Les études d'aléa sismique ont conduit aux valeurs de magnitudes suivantes correspondant aux accélérations réglementaires de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

Zone de sismicité	Magnitude M_w
1	5.0
2	5.5
3	6.0
4	6.5
5	6.5 (source locale) 7.7 (source de subduction)

Tableau 4.7 – Magnitude par zone de sismicité

Compte-tenu de la faible magnitude de la zone 1 et sur la base du retour d'expérience qui indique que la liquéfaction n'est pas observée pour des magnitudes inférieures à 5.5, il est admis d'exclure ce risque sans étude spécifique pour les sites en zone 1, de très faible sismicité.

L'étude du risque de liquéfaction peut s'appuyer sur l'Annexe B de la norme NF EN 1998-5. Cette annexe normative, dans le cadre de l'utilisation d'essais SPT, fournit des diagrammes empiriques, utilisés pour l'analyse simplifiée de la liquéfaction. Les diagrammes représentent des corrélations expérimentales entre les mesures réalisées in situ et les contraintes de cisaillement cycliques pour

lesquelles il a été constaté qu'elles ont causé la liquéfaction lors de séismes antérieurs. Il y a lieu de noter que l'annexe s'appuie sur des magnitudes de séisme en termes d'ondes de surface M_s . Il convient donc de convertir la magnitude de moment M_w en magnitude M_s . On pourra utiliser les corrélations suivantes :

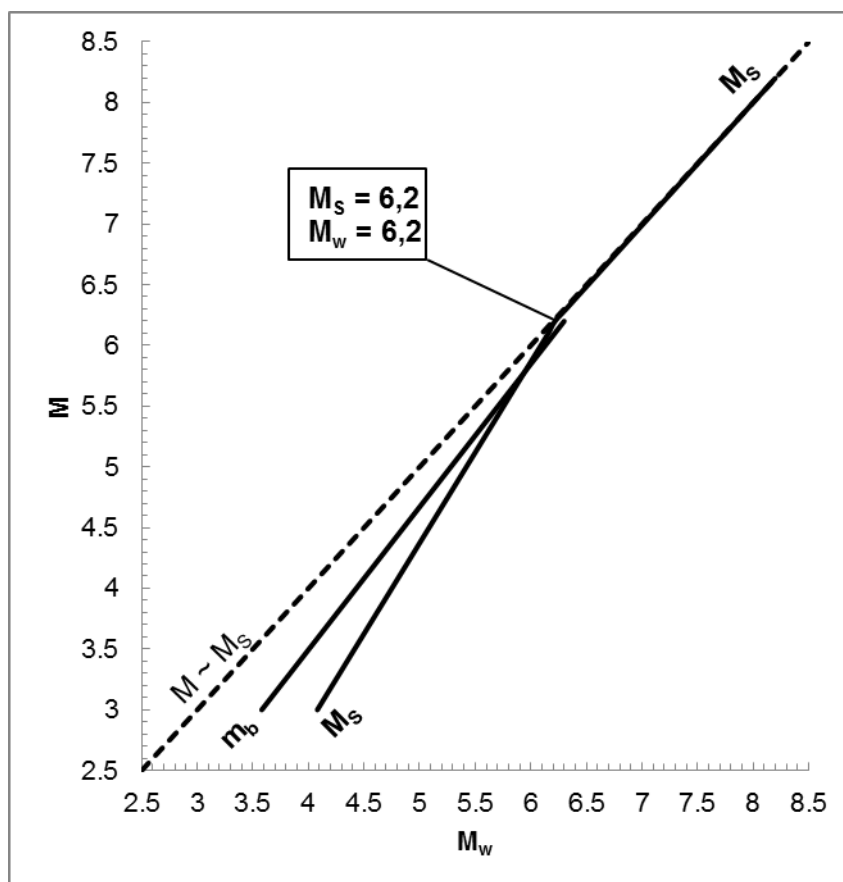


Figure 4.3 – Corrélations entre les magnitudes M_s et m_b avec la magnitude de moment M_w , établies par Scordilis (2006) sur une base de données mondiale de plus de 20,000 séismes

D'autres méthodes de détermination du risque de liquéfaction sont autorisées par la NF EN 1998-5 ; elles sont basées sur l'utilisation de données expérimentales mesurées in situ telles la résistance de pointe à l'essai de pénétration statique (CPT) ou la célérité des ondes de cisaillement. Toutefois, ces méthodes ne sont pas détaillées dans la norme et doivent s'appuyer sur l'état de l'art de la littérature technique.

4.2.5 Guide à la sélection d'accélérogrammes

L'étude sismique d'un ouvrage peut s'effectuer par des méthodes transitoires pour lesquelles la sollicitation sismique est représentée par des accélérogrammes, c'est-à-dire des accélérations du sol fonction du temps, compatibles avec l'action sismique définie par les spectres réglementaires de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

4.2.5.1 Représentation de l'action sismique

Le mouvement sismique tridimensionnel doit consister en trois accélérogrammes agissant simultanément dans les trois directions de l'espace, deux directions horizontales et une direction verticale. Le même accélérogramme ne peut pas être utilisé simultanément pour les deux directions horizontales.

Pour chaque direction, il convient d'utiliser plusieurs accélérogrammes pour définir l'action sismique. On parle de jeu ou de suite d'accélérogrammes.

En fonction de la nature de l'application et des informations disponibles, la description du mouvement sismique peut être fondée sur l'utilisation d'accélérogrammes artificiels ou d'accélérogrammes enregistrés ou simulés.

4.2.5.2 Règles générales de sélection

Indépendamment de leur nature, il convient que la suite d'accélérogrammes respecte les règles suivantes :

- il convient que la moyenne des valeurs de l'accélération spectrale à période nulle (calculée à partir des accélérogrammes) ne soit pas inférieure à la valeur de $a_g S$ pour le site de l'installation ;
- le spectre de réponse moyen des accélérogrammes est calculé, à un nombre suffisant de fréquences, en tant que moyenne des accélérations spectrales. A cette fin, une discrétisation en fréquence du type $10^{0.03N}$ Hz, N entier variant de -33 à 50, est admise.
- dans le domaine des périodes comprises entre $0.2T_1$ et $2T_1$, où T_1 est la période fondamentale de la structure dans la direction suivant laquelle l'accélérogramme va être appliqué, il convient qu'aucune valeur du spectre de réponse élastique moyen avec 5 % d'amortissement, calculé à partir de tous les accélérogrammes, ne soit inférieure à 90 % de la valeur correspondante du spectre de réponse élastique à 5 % d'amortissement ;
- le nombre d'accélérogrammes à utiliser est adapté à la méthodologie des calculs effectués et à la méthode de traitement de la variabilité des résultats retenue. Dans le cadre d'une analyse linéaire, l'utilisation d'un jeu de 3 accélérogrammes par direction de séisme suffit. Pour des modèles non-linéaires, la variabilité des résultats peut être importante et il convient alors d'utiliser un minimum de 5 accélérogrammes par jeu ;
- il convient de s'assurer de l'indépendance statistique des accélérogrammes d'un même jeu. Le coefficient d'intercorrélation des signaux doit être inférieur à 0.2. Par ailleurs, il est interdit de constituer un jeu d'accélérogrammes par décalage de l'origine d'un des signaux ;
- il convient de sélectionner des accélérogrammes dont les paramètres suivants sont en cohérence avec ceux associés au site étudié :
 - type de mécanisme à la source sismique ;
 - propriétés du sol ;
 - couple magnitude - distance à la source sismique (M_w -d)

Pour les zones de sismicité 1 à 4, on ne considère que des séismes associés à des sources relativement proches. Pour la zone 5 (Antilles), il faut considérer deux types de source : sources proches et source de subduction.

On retiendra des séismes associés à une fourchette de magnitude ± 0.5 autour des valeurs retenues pour l'étude de liquéfaction.

Les couples de valeurs distance - magnitude recommandés pour le choix d'accélérogrammes selon la zone de sismicité sont donnés dans le tableau suivant :

Zone de sismicité	Distance à la faille	Magnitude M_w
1	5-35 km	4.5 – 5.5
2	5-35 km	5.0 – 6.0
3	5-35 km	5.5 – 6.5
4	5-35 km	6.0 – 7.0
5	Source proche : 5-35 km Source de subduction : 50-80 km	Source proche : 6.0-7.0 Source de subduction : 7.2-8.2

Tableau 4.8 – Fourchette distance-magnitude par zone de sismicité pour la sélection d'accélérogrammes

Afin d'adopter une approche sécuritaire, il convient d'exclure l'utilisation de couples (M,d) minorants correspondant à une magnitude minorante et une distance à la source majorante (M_{min}, d_{max}).

4.2.5.3 Accélérogrammes artificiels

Les accélérogrammes artificiels doivent être établis de manière à correspondre aux spectres de réponse élastiques réglementaires pour un amortissement de 5 %. La durée des accélérogrammes doit être compatible avec la magnitude et les autres caractéristiques propres à l'événement sismique servant à la définition de a_g .

A défaut de données spécifiques, les valeurs de durée données dans le tableau 4.9 sont recommandées.

Zone de sismicité	Durée de phase forte
1	3 à 6 s
2	5 à 10s
3	8 à 12s
4	10 à 15s
5	Source proche : 10 à 15s Source de subduction : 18 à 25s

Tableau 4.9 : durée de phase forte des accélérogrammes artificiels

4.2.5.4 Accélérogrammes enregistrés ou simulés

Des accélérogrammes enregistrés, ou des accélérogrammes élaborés à partir d'une simulation physique des mécanismes à la source et de propagation des ondes, peuvent être utilisés, à condition que les échantillons utilisés soient reconnus comme représentatifs des caractéristiques des sources sismogènes et des conditions de sol du site, et que leurs valeurs soient calées par rapport à la valeur de a_g pour la zone considérée.

Les accélérogrammes naturels peuvent être choisis notamment dans les bases de données suivantes :

- base de données NGA du Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), accessible à l'adresse suivante http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database ;
- base de données du Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM), accessible à l'adresse suivante : <http://www.emsc-csem.org>.

Pour les études mettant en jeu des comportements non linéaires prononcés, il est préférable d'avoir recours de préférence à des accélérogrammes enregistrés lors de séismes réels, car ils ont un contenu plus réaliste en basses fréquences que les accélérogrammes artificiels et un phasage approprié entre les composantes horizontales et verticales du mouvement.

4.2.5.5 Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats liés à une étude transitoire utilisant des accélérogrammes en données d'entrée est détaillée dans le chapitre 5 – Exigences de comportement et méthodes de justification.

4.2.6 Cas des classes de sol S_1 et S_2

Pour les sites correspondant aux classes de sol S_1 et S_2 , l'action sismique réglementaire de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié n'est pas applicable. Des études particulières sont nécessaires pour la définition de l'action sismique.

Les sols de classe S_1 ont généralement des valeurs de v_s très faibles, un amortissement interne faible et un domaine anormalement étendu de comportement linéaire, et peuvent donc produire des effets anormaux d'amplification du mouvement sismique du site et d'interaction entre le sol et la structure. Il convient d'évaluer les effets de l'épaisseur et de la valeur de v_s de la couche d'argile molle/vase superficielle et du contraste de rigidité avec les couches inférieures sur le spectre de réponse.

Pour les sols de classe S_2 , le risque élevé de défaillance du sol par liquéfaction sous une action sismique rend impossible la définition d'un spectre de réponse générique pour cette classe. Il convient notamment pour une installation existante de conduire des études particulières pour appréhender le mouvement sismique et ses effets sur les structures ou équipements quand cela est pertinent à défaut de traiter le sol pour évacuer le risque de liquéfaction. Pour une installation neuve, il est fortement recommandé de modifier l'implantation ou de définir un traitement de sol approprié pour ne plus relever de la classe S_2 .

4.3 Transfert de spectres

Les spectres de réponse définis dans l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié représentent l'action sismique pour une structure au niveau du sol pour les structures mono supportées. Lorsque l'équipement comporte plusieurs appuis qui peuvent avoir des mouvements relatifs (par exemple, les tuyauteries et les réseaux), un déplacement relatif statique doit être ajouté à l'action sismique inertielle définie par le spectre.

Pour les équipements reposant sur des structures support, l'action sismique de dimensionnement dépend de la réponse du support et les spectres de l'arrêté ne sont pas directement applicables. Il convient d'établir des spectres transférés, qui représentent l'action sismique au niveau de l'équipement.

Les méthodes de calcul de transfert de spectres et des déplacements relatifs à partir des spectres réglementaires sont détaillées dans le guide « Structures support ».

4.4 Règles de cumul des actions

Les actions élémentaires et combinaisons d'actions à considérer dépendent de l'équipement ou ouvrage étudié. Il convient de prendre en compte les actions unitaires sur les structures définies dans la norme NF EN 1991 et de les combiner selon les règles données dans la norme NF EN 1990.

Les paragraphes suivants fournissent une liste des actions unitaires généralement applicables, distinguées selon leur caractère permanent ou variable. Les règles générales de cumul avec l'action sismique sont ensuite exposées.

Il convient de garder en tête que les actions à prendre en compte pour une étude sont propres à la structure étudiée. Dans le cas d'équipements d'installations industrielles, il peut être nécessaire de considérer des actions particulières liées à la spécificité de conception ou de conditions d'exploitation, qui n'apparaissent pas explicitement dans le paragraphe suivant.

4.4.1 Actions permanentes

Les actions unitaires permanentes à considérer dans le cadre de l'étude d'un équipement sont les suivantes :

Actions unitaires permanentes	
$G_{k,0}$	poids propre des ouvrages et matériels permanents
$G_{k,11}$	poussée statique des terres pour les éléments enterrés
$G_{k,WL}$	poussée hydrostatique de la nappe phréatique à niveau permanent pour les éléments enterrés ou pour étude de liquéfaction
$G_{k,P}$	pressions statiques dues à un liquide ou un gaz
$G_{k,T1}$	déformations thermiques permanentes
$G_{k,T2}$	déformations liées au retrait et au fluage du béton
P_k	action de la précontrainte
$G_{k,\text{autre}}$	autre action permanente propre à l'équipement

Tableau 4.8 – Actions unitaires permanentes

4.4.2 Actions variables

Les actions unitaires variables à considérer dans le cadre de l'étude d'un équipement sont les suivantes :

Actions unitaires variables	
$Q_{k,L}$	charges d'exploitation
$Q_{k,WL}$	variation de hauteur de nappe phréatique par rapport à la hauteur permanente
$Q_{k,P}$	variation des pressions statiques du liquide ou du gaz par rapport à la valeur permanente
$Q_{k,M}$	efforts d'amarrage ou actions induites par les machines ou appareils de levage
$Q_{k,\text{autre}}$	autre action variable propre à l'équipement
$Q_{k,T}$	variations thermiques autour de la valeur moyenne
$Q_{k,W}$	action du vent
$Q_{k,S}$	action de la neige

Tableau 4.9 – Actions unitaires variables

4.4.3 Valeur caractéristique d'une action

Il convient de considérer la valeur caractéristique de l'action (F_k), c'est-à-dire la principale valeur représentative d'une action. Dans la mesure où elle peut reposer sur des bases statistiques, la valeur caractéristique est choisie pour correspondre à une probabilité donnée de non-dépassement du côté

défavorable, au cours d'une « durée de référence » tenant compte de la durée d'utilisation de projet de la structure et de la durée de la situation de projet.

Des valeurs indicatives des valeurs caractéristiques pour les différents types de charges sont données dans les normes EN NF 1991.

Pour les réservoirs les valeurs caractéristiques des actions définies dans la norme EN NF 1991-4 sont censées correspondre aux valeurs qui ont une probabilité de 2 % d'être dépassées pendant une période de référence d'une année.

4.4.4 Cumul d'actions avec le séisme

Il convient de ne cumuler aucune action accidentelle avec le séisme. En règle générale, les actions sismiques et les actions accidentelles induites par le séisme ne sont pas cumulées (cf. chapitre 3).

Les normes NF EN 1998 stipulent que l'action sismique doit être cumulée avec les valeurs quasi-permanentes des actions variables. Cette valeur est déterminée de manière que le temps total pendant lequel elle sera dépassée représente une fraction considérable de la durée de référence. Elle s'exprime comme une fraction déterminée de la valeur caractéristique en utilisant un facteur $\psi_{2,i} \leq 1$.

Les actions concomitantes à considérer avec les mouvements sismiques de dimensionnement sont donc :

- Les actions permanentes ($G_{k,j}$ et P_k) ;
- Les actions variables ($Q_{k,i}$) affectées d'un coefficient de combinaison ($\psi_{2,i} \leq 1$), compte tenu de la présence que partielle de ces charges considérées comme quasi permanentes pendant le séisme.

En conséquence, la combinaison générale des actions concomitantes au séisme de dimensionnement $A_{E,k}$ est exprimée symboliquement de la façon suivante :

$$\sum G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \oplus A_{E,k}$$

Il convient de retenir les coefficients de combinaison $\psi_{2,i}$ relatifs aux actions variables suivants, inspirés des normes NF EN 1990 et 1991:

Actions unitaires variables	Coefficient de combinaison $\psi_{2,i}$
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation pour les planchers des bâtiments d'usine : - - Salle de contrôle (Catégorie B) - Locaux techniques - Magasins (Catégorie E) - Caserne de pompiers - Atelier ou estacade -	0.3 0.3 0.8 0.3 0.3
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation pour les toits des bâtiments d'usine	0
$Q_{k,WL}$ variation de hauteur de nappe phréatique	0
Q_k action des matériaux particuliers ensilés (silos)	0.9

Q_k action des liquides stockés (hauteur maximale d'exploitation dans les réservoirs)	0.9
Q_k action des produits contenus (équipements process)	1
Q_k action des produits contenus (tuyauteries)	1
$Q_{k,P}$ variation des pressions statiques du liquide ou du gaz	0
$Q_{k,M}$ efforts d'amarrage ou actions dynamiques induites par les machines ou appareils de levage	0
$Q_{k,autre}$ autre action variable propre à l'équipement	Valeur à fixer en fonction de la probabilité d'occurrence de l'action
$Q_{k,T}$ variations thermiques climatiques	0
$Q_{k,W}$ action du vent	0
$Q_{k,S}$ action de la neige	0 0.2 pour les sites d'altitude >1000m

Tableau 4.10 – Coefficients de simultanéité des actions variables

Pour l'action des produits contenus dans les réservoirs, l'Eurocode recommande l'utilisation d'un coefficient 0.8 appliqué à une hauteur de fluide égale à la hauteur des parois. L'approche proposée dans ce guide est d'appliquer un coefficient de 0.9 appliqué à la hauteur d'exploitation maximale de produit. Cette approche permettra de pouvoir dédouaner certains équipements sous réserve de limiter la hauteur d'exploitation.

Il est rappelé que l'action sismique de calcul A_{Ek} doit être calculée en tenant compte des masses précisées dans la section 4.4.5.

4.4.5 Masses pour l'action sismique de calcul

Afin d'établir la contribution inertielle de l'action sismique de calcul A_{Ek} , il convient de prendre en compte les **masses associées** à toutes les charges gravitaires qui apparaissent dans la combinaison d'actions suivante :

$$\sum G_{k,j} \oplus \sum \psi_{E,i} Q_{k,i}$$

$\psi_{E,i}$ est un coefficient de combinaison pour les actions variables $Q_{k,i}$.

Les coefficients $\psi_{E,i}$ prennent en compte la probabilité que les charges variables $Q_{k,i}$ ne soient pas présentes sur la totalité de la structure pendant le séisme. Ces coefficients peuvent également prendre en compte une participation réduite des masses dans le mouvement de la structure, due à un liaisonnement non rigide entre elles.

Il convient de remarquer que les coefficients $\psi_{E,i}$ ne sont pas nécessairement égaux aux coefficients $\psi_{2,i}$ à affecter aux charges variables dans les combinaisons d'actions sismiques détaillées dans le paragraphe 4.4.4. On note généralement $\psi_{E,i} = \phi \psi_{2,i}$. Les valeurs de $\psi_{E,i}$ pour les différents types de structures sont données dans les guides techniques spécifiques. En l'absence d'information, on prendra $\psi_{E,i} = \psi_{2,i}$.

Pour les bâtiments, on retiendra les valeurs de $\psi_{E,i}$ suivantes issues de la norme NF EN 1998-1 :

Actions unitaires variables		Coefficient $\psi_{E,i}$
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation - Catégorie A : habitation, zones résidentielles - Catégorie B : bureaux	Etages à occupations corrélées	0.24
	Etages à occupations indépendantes	0.15
	Toitures	0.30
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation - Catégorie C : lieux de réunion	Etages à occupations corrélées	0.48
	Etages à occupations indépendantes	0.30
	Toitures	0.60
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation - Catégorie D : commerces		0.60
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation - Catégorie E : stockage		0.80
$Q_{k,L}$ charges d'exploitation - Catégorie F : zone de trafic, véhicules de poids ≤ 30 kN		0.60
$Q_{k,WL}$ variation de hauteur de nappe phréatique		0
$Q_{k,P}$ variation des pressions statiques du liquide ou du gaz		0
$Q_{k,S}$ masse de la neige		0 0.2 pour les sites d'altitude >1000m

4.5 Données complémentaires informatives

4.5.1 Déplacement du sol

La valeur de déplacement du sol est obtenue en faisant l'hypothèse que le déplacement spectral dans le domaine des déplacements spectraux constants vaut 2.5η fois le déplacement du sol d_g .

Le déplacement spectral est calculé à partir de la pseudo-accélération spectrale $S_e(T)$ par :

$$S_{De}(T) = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_e(T)$$

Dans la branche des déplacements spectraux constants ($T_D \leq T \leq 4s$), on a donc :

$$S_{De}(T) = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 2.5\eta a_g S \left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] = 2.5\eta \frac{a_g S T_C T_D}{(2\pi)^2} = S_{De}(T_D)$$

Ainsi, le déplacement du sol est obtenu par :

$$d_g = S_{De}(T_D)/2.5\eta = \frac{a_g S T_C T_D}{(2\pi)^2} = 0.025 a_g S T_C T_D$$

4.5.2 Vitesse particulière

La valeur de vitesse du sol est obtenue en faisant l'hypothèse que la pseudo-vitesse spectrale dans le domaine des pseudo-vitesses spectrales constantes vaut 2.5η fois la vitesse du sol v_g . La pseudo-vitesse spectrale est calculée à partir de la pseudo-accélération spectrale $S_e(T)$ par :

$$S_{Ve}(T) = \left(\frac{T}{2\pi}\right) S_e(T)$$

Dans la branche des pseudo-vitesses spectrales constantes ($T_c \leq T \leq T_D$), on a donc :

$$S_{Ve}(T) = \left(\frac{T}{2\pi}\right) 2.5a_g S\eta \left[\frac{T_c}{T}\right] = 2.5\eta \frac{a_g S T_c}{2\pi} = S_{Ve}(T_c)$$

Ainsi, la vitesse du sol est obtenue par :

$$v_g = S_{Ve}(T_c)/2.5\eta = \frac{a_g S T_c}{2\pi}$$

5. Exigences de comportement et méthodes de justification

Ce chapitre a pour but de définir les exigences de comportement et méthodes de justification à adopter dans le cadre de l'étude de tenue au séisme des équipements visés par l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

5.1 **Définitions générales des exigences de comportement**

La sélection des équipements concernés est effectuée conformément à la procédure développée au chapitre 3.

Pour chaque équipement concerné, l'exigence de comportement en cas de séisme est fonction du rôle de cet équipement, de la nature des produits contenus, du type de scénario ayant donné lieu au classement risque spécial ainsi que de l'environnement de l'installation.

Les différentes exigences de comportement identifiées pour les équipements sont définies dans les paragraphes suivants.

A noter qu'un équipement peut n'avoir aucune exigence de comportement si des barrières de prévention / protection sont mises en œuvre.

5.1.1 Opérabilité / capacité fonctionnelle

Les exigences d'opérabilité et de capacité fonctionnelle correspondent au maintien de l'accomplissement de la fonction associée à l'ouvrage ou l'équipement.

L'opérabilité d'un équipement se traduit par le maintien de certaines fonctions actives comme la capacité d'ouverture ou de fermeture d'un organe d'isolement ou l'accomplissement de la fonction de sécurité associée à l'ouvrage ou l'équipement.

L'exigence de maintien de la capacité fonctionnelle s'applique aux éléments mécaniques statiques traversés par un fluide pour lesquels il ne doit pas y avoir de limitation de débit ou plus généralement de gêne à l'accomplissement de la fonction.

Généralement, ces exigences de comportement concernent principalement les barrières de prévention, d'atténuation d'effets ou de protection (BPAP).

5.1.2 Intégrité du confinement / de la rétention

L'intégrité du confinement d'un équipement traduit généralement le maintien de la fonction passive d'étanchéité, permettant le maintien d'un produit (gaz, liquide, solide) dans un espace défini. Généralement, cette exigence de comportement concerne principalement les équipements à risque spécial (ERS) induisant directement le phénomène dangereux.

Cette exigence peut aussi s'appliquer aux bassins de rétention ou aux parois d'un local, c'est-à-dire à un confinement de second niveau destiné à collecter un produit après une première perte de confinement.

Il convient de préciser le degré d'étanchéité à assurer (débit de fuites acceptable à l'égard du critère risque spécial, etc.).

Cette exigence est moins contraignante que l'exigence d'opérabilité.

5.1.3 Stabilité et supportage

L'exigence de stabilité et supportage se décline en :

- stabilité d'ensemble (non-effondrement ou basculement généralisé),
- stabilité locale (non-effondrement d'un ou plusieurs éléments),
- supportage d'équipement (maintien du supportage, malgré un endommagement).

Elle peut concerner tout type d'équipement

- directement des équipements à risque spécial (stabilité d'une capacité, d'un entrepôt classé risque spécial)
- les structures porteuses d'équipements à risque spécial (supportage d'une capacité, d'une tuyauterie...) ou de barrière d'atténuation ou de protection (BPAP)
- les ouvrages agresseurs potentiel (OAP) (exigence de stabilité)

Cette exigence est moins contraignante que l'exigence d'opérabilité ou de confinement.

5.1.4 Absence d'interaction matérielle préjudiciable

On désigne par le terme d'interaction préjudiciable l'agression d'une structure par une structure voisine de type :

- chocs entre structures pouvant engendrer des efforts et vibrations significatifs dans ces dernières ;
- déplacements différentiels excessifs entre équipements ;

L'exigence d'absence d'interaction se traduit donc par la maîtrise des déplacements de l'équipement afin d'éviter ces phénomènes.

5.1.5 Exigences spécifiques

Certains équipements peuvent avoir des exigences de comportement spécifiques à leur fonctionnalité, leurs conditions d'exploitation, et aux phénomènes dangereux liés à l'équipement.

5.1.6 Combinaison d'exigences / exigences induites

Une exigence de comportement peut en induire d'autres. Le tableau suivant précise ces exigences induites :

Exigence primaire	Exigences induites
Opérabilité	Stabilité + éventuellement absence d'interaction matérielle + éventuellement exigences spécifiques
Intégrité du confinement / de la rétention	Stabilité + éventuellement absence d'interaction matérielle + éventuellement exigences spécifiques
Non-interaction matérielle préjudiciable	Stabilité + éventuellement exigences spécifiques

5.2 Critères de justification des structures et équipements

La démarche de conception ou de vérification d'un équipement demande la définition de critères permettant de démontrer le respect des exigences de comportement.

Ces critères peuvent s'exprimer en termes de :

- limitation des contraintes ou efforts ;
- limitation des déformations réversibles ou irréversibles ;
- limitations des déplacements.

5.2.1 Définition des « états limites »

Les critères de dimensionnement sont souvent associés à la notion d'état limite. Un « état limite » est un état au-delà duquel une structure ou un équipement cesse de remplir les fonctions pour lesquels il a été conçu ou les exigences de comportement qui lui sont attribuées.

Il convient de distinguer :

- Les états limites ultimes (ELU) dont le dépassement pourrait conduire à des désordres significatifs, voire à la ruine de l'élément considéré. Ils correspondent à la limite de l'équilibre statique, de la résistance, de la stabilité de forme, ...
- Les états limites de service (ELS) dont le dépassement pourrait compromettre le bon comportement en service de l'élément de structure considéré. Ces états correspondent en pratique à une valeur limite de compression du béton, à une valeur limite d'ouverture de fissures ou à une valeur limite de déformations acceptables

5.2.2 Critères liés aux exigences de comportement

Les critères sont le plus souvent donnés par les codes particuliers à tel ou tel équipement. Il convient notamment de se référer aux différents guides spécifiques.

Les paragraphes suivants présentent les principes des critères liés aux exigences de comportement définies au paragraphe 5.1.

5.2.2.1 Critères d'opérabilité ou de capacité fonctionnelle

De façon générale, un comportement élastique sera requis pour un ouvrage dont le maintien de l'opérabilité ou de la capacité fonctionnelle post-sismique est nécessaire. Les critères liés à ces exigences correspondent donc généralement à une limitation des contraintes ou des efforts à des valeurs inférieures aux limites élastiques (calcul de type ELS).

5.2.2.2 Critères d'intégrité du confinement / de la rétention

De façon générale, les critères liés à l'exigence de confinement ou de rétention peuvent se traduire par les principes suivants :

- limitation des déformations plastiques à 80% de la déformation correspondant à l'atteinte de la résistance à la rupture applicable à l'équipement métallique et/ou au revêtement métallique de la rétention (calcul ELU);
- limitation de l'ouverture, de l'espacement et de la longueur des fissures traversantes à une valeur permettant de limiter le débit de fuite à une valeur acceptable (calcul ELS).

5.2.2.3 Critère de stabilité et de supportage

Les critères liés à l'exigence de stabilité et de supportage se traduisent par :

- la vérification de la déformation ultime ou de la résistance des éléments structuraux pour les combinaisons de chargement sismique ;

- la vérification de la stabilité des fondations en termes de glissement, renversement et capacité portante du sol.

Ces vérifications sont généralement de type ELU.

Note : La vérification de la stabilité des fondations superficielles, en particulier de leur capacité portante, est détaillée dans l'Annexe F de la norme NF EN 1998-5. Cette annexe est informative et d'autres méthodes de calcul, scientifiquement validées, peuvent lui être substituées. Dans le cadre de l'application de ce guide, il est admis de calculer la force portante sous charge verticale centrée à partir d'essais en place (voir norme NFP 94-261). De plus, dans les zones de sismicité 2 et 3, la non prise en compte des forces inertielles dans le sol est admise. Cette dernière disposition permet de conduire la vérification de la capacité portante suivant l'Eurocode 7 (norme NFP 94-261). Toutefois, cette dernière dérogation n'est pas admise pour les ERS et BPAP.

5.2.2.4 Critère de non-interaction matérielle

Les critères liés à l'exigence de non-interaction matérielle peuvent induire un critère de stabilité ou bien correspondre à la maîtrise des déplacements.

Il s'agit par exemple d'un couple d'éléments séparés par un joint, susceptibles d'entrer en contact ou de s'entrechoquer. Dans ce cas, le déplacement différentiel doit rester inférieur à la largeur du joint.

5.2.3 Dispositions générales constructives et mesures parasismiques

Les types de vérification à effectuer dépendent du niveau d'exigence de comportement. Par exemple, un appel à ductilité par formation de zones plastiques peut être toléré pour un ouvrage dont l'exigence de comportement est le non-effondrement ou l'intégrité de confinement alors qu'un comportement élastique est généralement requis pour un ouvrage dont l'opérabilité post-sismique est nécessaire.

Un comportement ductile des structures est caractérisé par des déformations importantes sans perte significative de résistance, par incursion dans le domaine plastique. La mise en œuvre d'un comportement ductile peut passer par l'application de dispositions constructives spécifiques qui permettent le développement de zones plastiques où se concentrent les déformations ou par la vérification que, dans les zones où une déformation plastique ou inélastique se produit, les déformations sont admissibles sans déchirure ou instabilité élastoplastique et sans concentration. La conception parasismique recommandée par l'Eurocode 8 pour les ouvrages dans lesquels des dommages sont tolérés s'appuie sur la notion de ductilité, en particulier dans les zones de sismicité modérée à forte.

La conception d'une structure à comportement élastique peut s'avérer difficile dans les zones de sismicité modérée à forte. Elle peut demander la mise en œuvre de dispositifs d'isolation sismique, et la mise en œuvre de dispositions constructives particulières relatives à la bonne utilisation de ces appareils.

L'ensemble des dispositions constructives pour une conception ductile des structures ou dans le cas d'utilisation de dispositifs d'isolation est spécifié dans les parties de l'Eurocode 8 spécifiques à chaque type d'ouvrage.

Le « Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie » de l'AFPS, réédité en 2011 présente en détail les dispositions spécifiées dans les normes Eurocode 8 ainsi que des recommandations supplémentaires de bonne pratique pour le cas des structures.

5.2.4 Interfaces/ancrages

La présence d'ancrages adéquats est peut-être l'élément le plus important quant au comportement sismique des équipements.

Le retour d'expérience sur les mouvements sismiques forts montre que les équipements peuvent subir des glissements, renversements ou mouvements excessifs lorsque qu'ils ne sont pas correctement ancrés.

Ces observations concernent les équipements de grande taille ainsi que les équipements lourds. Les ruptures d'ancrage d'équipements répertoriés concernent les ancrages mis en œuvre au coulage (ancrages avec tiges noyées) comme les ancrages mis en œuvre après coulage (ancrages chevillés). Il convient de porter une attention particulière à la vérification de ces éléments. Les méthodes de vérification, prenant en compte la répartition des efforts entre les ancrages, sont détaillées dans le guide spécifique « Structures support » (DT111).

5.3 Méthodes générales de justification

Les approches pour justifier le respect des exigences de comportement diffèrent pour un équipement neuf ou existant :

- le dimensionnement d'une structure ou d'un équipement neuf fait l'objet du chapitre 6 ;
- le diagnostic des structures ou équipements existants est traité dans le chapitre 7.

L'objet du présent paragraphe est de présenter les méthodes générales et les principes associés utilisés pour étudier la réponse sismique d'un équipement et d'évaluer s'il répond aux critères d'exigences fixés.

Globalement, il existe trois types d'approche pour évaluer le comportement sismique d'un élément :

- l'approche calculatoire ;
- le retour d'expérience ;
- les essais.

5.3.1 Principes pour l'approche calculatoire

5.3.1.1 Méthodes de calcul

L'évaluation du comportement sismique de l'équipement ou de la structure peut être effectuée par des calculs passant généralement par un modèle aux éléments finis. Ces calculs peuvent être plus ou moins sophistiqués en fonction des informations disponibles, du niveau de dimensionnement et des marges nécessaires pour pouvoir justifier l'équipement ou la structure.

Les types de calculs pouvant être réalisés sont (dans l'ordre de complexité croissante) :

- (1) Calcul statique équivalent ;
- (2) Calcul statique linéaire avec interaction sol-structure ;
- (3) Calcul dynamique linéaire (modal-spectral) ;
- (4) Calcul dynamique linéaire avec coefficients de comportement q ;
- (5) Calcul transitoire linéaire ;
- (6) Calcul transitoire linéaire avec interaction sol-structure ;
- (7) Calcul statique non-linéaire (push over) ;
- (8) Calcul statique non-linéaire avec interaction sol-structure non-linéaire ;
- (9) Calcul transitoire non-linéaire.

Certaines de ces méthodes sont décrites en annexe de ce document.

5.3.1.2 Modélisation de la structure

La réponse sismique des structures doit être évaluée sur la base d'une analyse dynamique réalisée en utilisant des modèles appropriés de structure, en tenant compte, si nécessaire, des effets d'interaction sol-structure et d'interaction structure-équipement.

Le modèle doit représenter de façon adéquate la répartition de masse et de raideur de l'équipement et de sa structure support. Afin de développer un modèle approprié, une attention particulière doit être accordée aux points suivants :

- Interaction structure-équipement : si la masse d'un équipement est significative devant la masse de la structure porteuse étudiée, il convient de prendre en compte le risque de couplage entre la structure porteuse et l'équipement. En l'absence d'interaction structure-équipement, seule la masse de l'équipement concentrée en son centre de gravité pourra être représentée. Le guide « Structures support » détaille la méthodologie à appliquer pour la prise en compte de l'interaction équipement-structure et précise les critères à considérer pour évaluer les risques de couplage ;
- Configuration structurale et détails de construction (joints, trémies, ancrages et supports) ;
- Représentation appropriée de la taille et la disposition géométrique des fondations, en particulier pour les fondations communes à plusieurs structures dont la réponse est alors couplée (radier de béton, longrines...) ;
- Prise en compte des différences de modélisations pour les cas de charge statiques et dynamiques (rigidité des fondations (impédance), effets hydrodynamiques...) ;
- Eléments non-structuraux, tels que les remplissages de maçonnerie ou les éléments préfabriqués, pouvant modifier la réponse la structure. La rigidité et la résistance de ces éléments, et celles de leurs liaisons à la structure, doivent être examinées et éventuellement prises en compte dans la formulation des modèles ;
- Propriétés des matériaux et dimensions des éléments de structure tels que construits ;
- Caractéristiques géotechniques du sol de fondation et prise en compte éventuelle de l'interaction sol-structure (ISS) ;

Sur la base de ce modèle, le calcul sismique doit permettre :

- de déterminer la réponse sismique de la structure et les efforts internes dans les éléments de structure et de l'équipement ;
- et/ou de calculer les spectres de plancher et les déplacements sismiques pour l'évaluation de la capacité sismique des composants et des systèmes. Si l'équipement est représenté de façon simplifiée dans le modèle dynamique de la structure et si les contraintes dans l'équipement sont déterminées avec un modèle plus détaillé, les accélérations spectrales issues du premier calcul dynamique pourront être appliquées statiquement sur le modèle détaillé de l'équipement.

5.3.1.3 Prise en compte des incertitudes

La variabilité des caractéristiques mécaniques des sols et éléments de structure voire de l'équipement doit être pris en compte dans l'analyse par le biais d'études paramétriques. Dans les cas où ces caractéristiques ont été obtenues à partir d'essais, la plage de variation des paramètres tiendra compte des mesures. Le nombre de configurations à analyser doit être raisonnablement limité, tel que décrit dans les paragraphes suivants.

Pour tenir compte de la variabilité de la structure, les spectres de plancher correspondant à la valeur moyenne des caractéristiques de sol (G_{moy}) pourront être élargis de +/-15%.

Si les propriétés du sol ont une influence importante sur la réponse sismique de la structure, il convient de tenir compte des incertitudes de ces paramètres en considérant au moins les 3 cas suivants, définis par leur valeur de module de cisaillement dynamique G à partir de la valeur moyenne G_{moy} estimée ou mesurée :

- Valeur minimale : $G_{\text{min}} = 2/3 G_{\text{moy}}$
- Valeur caractéristique : G_{moy}
- Valeur maximale : $G_{\text{max}} = 3/2 G_{\text{moy}}$

Les fourchettes proposées couvrent les incertitudes de modélisation pourvu que les méthodes de calculs mises en œuvre suivent les recommandations du guide.

5.3.1.4 Amortissement

En l'absence de données spécifiques, il convient d'utiliser les amortissements critiques suivants pour l'évaluation du comportement sismique des structures ou équipements :

AMORTISSEMENT CRITIQUE ξ

ELEMENT	
Structures	
Structures en béton armé	7%
Structures en béton précontraint	5%
Structures métalliques rivetées ou soudées	2%
Structures métalliques boulonnées	4%
Mur de maçonnerie armée ou confinée	7%
Mur de maçonnerie non-armée	5%
Structures métalliques avec éléments préfabriqués	7%
Systèmes et équipements	5%
<i>Sauf pour :</i>	
Modes de ballonnement des réservoirs	0.5%
Racks de câbles	10%
Conduits d'aération	7%
Pompes verticales	3%
Racks d'instruments	3%

La valeur d'amortissement ci-dessus se rapporte à l'amortissement matériel de la structure. Cet amortissement est plus faible que l'amortissement radiatif lié à l'interaction sol-structure qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 20 à 30%. Il convient d'être vigilant quant au cumul des amortissements matériels et radiatifs.

L'Eurocode 8 préconise l'une des deux options suivantes :

- Soit on effectue un calcul linéaire élastique tirant totalement profit de l'amortissement radiatif du sol mais en limitant le coefficient de comportement à 1.5 ;
- Soit on effectue un calcul anélastique avec un coefficient de comportement $q > 1.5$ mais on limite l'amortissement total à 5%.

Dans le cas de calculs temporels non-linéaires, il convient de ne pas utiliser les valeurs d'amortissement critiques données dans le tableau ci-dessus pour les éléments dans lesquels les non-linéarités matérielles sont prises en compte. Si un amortissement est nécessaire à la convergence du calcul, il devra être limité à 1 ou 2 %.

5.3.1.5 Interaction sol-structure

Des modèles simples (type brochette) représentatifs peuvent être utilisés pour estimer l'influence de l'interaction sol-structure (ISS).

Dans le cas général où les propriétés du sol n'ont pas une influence considérable sur la réponse sismique de la structure, le calcul comprenant les effets d'ISS peut être effectué en utilisant une valeur caractéristique des propriétés de sol. La valeur caractéristique d'un paramètre géotechnique doit être une estimation prudente de la valeur qui influence l'occurrence de l'état limite (cf. NF-EN 1997-1).

Si les effets d'ISS sont importants, c'est-à-dire que le mode principal de déformation du système provient de l'ISS, il convient de calculer les efforts dans la structure sans tenir compte des non-linéarités ou d'un amortissement accru dans la structure, puisque les déplacements seront principalement dictés par le mode d'ISS. Il est rappelé qu'il est dans ce cas-là recommandé de tenir compte des incertitudes des propriétés de sol par une étude paramétrée (cf. 5.3.1.3).

Il est admis que les effets globaux d'ISS peuvent être négligés si la vitesse de l'onde de cisaillement dans le sol de fondation v_s est supérieure à 1000 m/s, ce qui correspond à un sol raide de la classe de sol A définie au 4.1.2.

5.3.2 Justification par retour d'expérience

5.3.2.1 Cadre pour l'utilisation du retour d'expérience

L'évaluation de la tenue au séisme d'équipements peut s'effectuer par l'utilisation de l'expérience acquise de la réponse sismique d'un équipement comparable ayant subi un mouvement sismique ou ayant fait l'objet d'une étude séisme, dit équipement de référence.

La justification d'un équipement par retour d'expérience exige que les conditions suivantes soient remplies :

- L'excitation sismique réelle à laquelle a été soumis l'équipement de référence ou qui a été utilisée pour l'étude séisme doit être enveloppe de l'action sismique réglementaire pour l'équipement étudié ;
- L'équipement étudié et l'équipement de référence doivent avoir des caractéristiques physiques similaires : géométrie, matériau, masse, niveau de qualification... ;
- Si les systèmes de supportage et d'ancrage sont différents, une vérification de ces éléments devra être effectuée par des études complémentaires ;
- Dans le cas d'équipements actifs, il est en général également nécessaire de montrer que l'équipement de référence a conservé sa fonctionnalité pendant ou après ce séisme, tel que requis par les exigences de comportement pour l'équipement objet du diagnostic.

5.3.2.2 Base de données américaine SQUG

Aux Etats-Unis, le Seismic Qualifications Utility Group (SQUG) a développé conjointement avec la NRC une procédure d'évaluation sismique basée sur le retour d'expérience des séismes passés et d'essais (à savoir la « Generic Implementation Procedure » (GIP)). La GIP utilise des méthodes empiriques sismiques afin de vérifier la tenue au séisme des équipements critiques pour la sûreté dans les centrales nucléaires en exploitation.

Cette procédure est principalement basée sur la performance d'équipements mécaniques et électriques en place, qui ont été soumis à de véritables mouvements sismiques forts ainsi que sur le comportement des composants de l'équipement au cours d'essais de simulations d'actions sismiques.

5.3.2.3 *Bases de données en France*

A ce jour, il n'existe pas en France de base de données telle que celle de la SQUG.

La construction d'une telle base de données est un travail très conséquent qui prendra des années mais qui doit être initié.

Pour cela, on pourra développer deux types de base de données :

- Une base de données établie à partir du REX post-sismique ;
- Une base de données issue d'études sismiques par mise en commun des études sismiques d'équipement par les exploitants.

Il est cependant possible, dès maintenant, d'utiliser les données publiques existantes autour des approches de type SQUG. En particulier, des fiches de visite peuvent être établies pour certaines familles d'équipements qui indiquent les points à vérifier lors des visites sur site et qui permettent de dédouaner certains équipements, soit directement lors de la visite, soit après des vérifications complémentaires post-visite.

5.3.3 Essais

Il est possible de qualifier un équipement par des essais montrant qu'il satisfait dans les conditions de son utilisation aux exigences associées à des vibrations simulant un mouvement sismique au moins égal à celui correspondant au spectre réglementaire transféré.

Les accélérogrammes à utiliser pour ces essais devront être sélectionnés selon les exigences décrites au chapitre 4. En l'absence de moyens d'essais sismiques adéquats, des essais de balayage sinus ou bruit blanc pourront être effectués.

En cas d'équipement reposant sur une structure support, il convient bien entendu de considérer le spectre transféré et non le spectre de sol comme action sismique de référence. Dans ce cas, les signaux doivent tenir compte des incertitudes des caractéristiques de la structure porteuse.

Les ancrages et la tenue de la structure support devront faire l'objet de vérifications particulières.

6. Conception des ouvrages ou équipements neufs

Ce chapitre présente les principes généraux guidant l'exploitant pour la conception d'une installation nouvelle ou d'un équipement neuf à « risque spécial » (ainsi que des BPAP et OAP associés) en tenant compte des sollicitations sismiques dans le cadre de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

6.1 Stratégie de conception d'une installation

6.1.1 *Principes généraux guidant l'implantation des équipements*

6.1.1.1 *Comportement sismique d'un équipement*

Les efforts et déplacements sismiques induits dans une structure aérienne par une sollicitation sismique dépendent de la fréquence principale et de l'amortissement du système formé par la structure et le sol. Les efforts de dimensionnement sont représentés par des spectres de sol donnant l'accélération en fonction de la période (cf. Chapitre 4). Compte-tenu de la forme des spectres, plus une structure est souple, moins les efforts sont grands mais plus les déplacements sont importants.

L'action sismique ressentie par un équipement dépend fortement de la structure qui le supporte. Le **mouvement sismique** du sol est typiquement **amplifié par la structure-support**, avec un degré d'amplification qui augmente généralement avec la hauteur. L'accélération subie par un équipement est généralement calculée à partir de spectres transférés, traduisant la modification du mouvement sismique du sol, représenté par les spectres de sol réglementaires, par la structure-support. Le guide spécifique « Structures support » précise la méthodologie pour établir les spectres transférés. Ces spectres permettent d'établir les efforts et les déplacements subis par l'équipement et la structure lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation sismique.

Le mouvement sismique peut induire des **déplacements différentiels** importants qui doivent être pris en compte pour la conception. Ces déplacements différentiels peuvent avoir lieu :

- entre plusieurs points d'un équipement multi-support (tuyauteries par exemple) ;
- entre deux unités voisines dynamiquement indépendantes mais reliées mécaniquement (four cheminée relié à une cheminée par une tuyauterie par exemple).

6.1.1.2 *Recommandations générales*

Compte-tenu du comportement sismique des équipements, les recommandations générales suivantes peuvent être prises en compte par l'exploitant lors de conception de son installation afin de minimiser les risques liés aux sollicitations sismiques :

- Privilégier une **implantation au niveau du sol**, en particulier pour les équipements lourds ;
- Privilégier de façon générale les **structures légères** ;
- Prévoir des **distances ou des joints entre équipements** pour éviter les interactions.

6.1.2 *Distinction « risque spécial » / « risque normal »*

Lors de la conception de son installation, l'exploitant se référera au chapitre 3 du présent guide pour l'identification des équipements ou ouvrages rentrant dans le périmètre de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, dits « critiques au séisme » (c'est-à-dire à risque spécial).

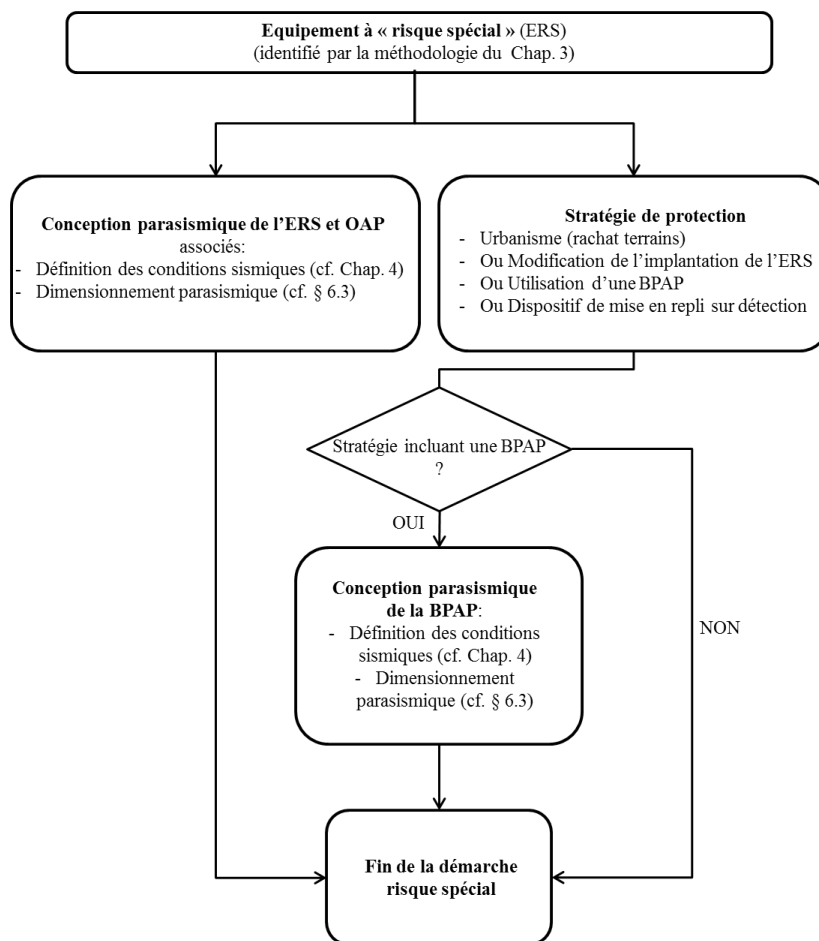
Tous les équipements ne rentrant pas dans cette catégorie sont réglementés par l'arrêté des équipements à « risque normal ». Ce chapitre ne traite que le « risque spécial ».

6.1.3 Traitement des équipements à « risque spécial »

Pour un équipement identifié à « risque spécial », il existe plusieurs stratégies pour satisfaire aux exigences de l'arrêté :

- Effectuer un **dimensionnement parasismique** assurant le respect des exigences liées à l'ERS et à ses OAP éventuels associés par rapport à la sollicitation sismique réglementaire ;
- Mettre en place une **stratégie de protection** (indépendante du niveau du risque sismique) limitant les effets induits par l'équipement afin de satisfaire aux exigences de l'arrêté sans passer par un dimensionnement parasismique :
 - **Modification de l'implantation** de l'équipement vers une zone réduisant les impacts létaux hors du site ;
 - Acquisition de la **maîtrise foncière** des terrains concernés par les impacts létaux induits par l'équipement en cas de séisme ;
 - **Mise en sécurité de l'installation sur sollicitation sismique** par instrumentation ou opération humaine (BPAP) ;
 - Mise en place de **barrières physiques pertinentes** (BPAP).

Le logigramme suivant illustre la démarche à suivre :



6.2 Principes de dimensionnement parasismique

Lorsqu'il conçoit un équipement ou une structure neuve rentrant dans le périmètre de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, l'industriel doit appliquer les principes de bonne conception parasismique et les règles précisées dans les normes NF EN 1998 (Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes) ou autre norme applicable.

Ce paragraphe n'a pas vocation à réécrire les normes parasismiques. Il fournit la référence des normes, guides et autres documents auxquels l'utilisateur pourra se référer pour obtenir le détail des règles de conception et dispositions constructives. Il présente également dans les grandes lignes les principes de bonne conception parasismique, puis leurs applications pour les différents types d'ouvrages et d'équipements sont présentées dans le paragraphe suivant.

6.2.1 *Documents de référence*

6.2.1.1 *Normes*

On rappelle les parties de la norme NF EN 1998 relatives à la conception parasismique des ouvrages et équipements neufs :

- **NF EN 1998-1 : Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments**
- NF EN 1998-1/NA : Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-1
- NF EN 1998-1/A1 – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments – Amendement A1– 03 Mai 2013

- NF EN 1998-2 : Partie 2 : Ponts
- NF EN 1998-2/NA : Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-2

- NF EN 1998-4 : Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations
- NF EN 1998-4/NA : Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-4

- NF EN 1998-5 : Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques
- NF EN 1998-5/NA : Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-5

- NF EN 1998-6 : Partie 6 : Tours, mâts et cheminées
- NF EN 1998-6/NA : Annexe Nationale de la norme NF EN 1998-6

- BNCM/CNC2M-N0035 : Recommandations pour le dimensionnement parasismique des structures en acier et mixtes non ou faiblement dissipatives - 31/01/2013

Ce dernier document n'est pas à proprement parler une norme mais est explicitement mentionné comme document de référence dans la NF EN 1998-1/NA de décembre 2013.

6.2.1.2 *Guides et documents informatifs*

- **« Guide pour la conception parasismique des bâtiments en acier ou en béton selon l'Eurocode 8 »** - The Institution of Structural Engineers (ISE) - Association Française du génie Parasismique (AFPS) – Octobre 2010

- **« Designers' Guide to EN 1998-1 and EN1998-5 »** - M. Fardis, E. Carvalho, A. Elnashai, E. Faccioli, P. Pinto, A. Plumier – Thomas Telford, 2005

- **« Designers' Guide to Eurocode 8: Design of Bridges for Earthquake Resistance - EN 1998-2 »** - B. Kolias, M. Fardis, A. Pecker – Thomas Telford, 2012
- **« Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8 »** – M.N. Fardis, E.C. Carvalho, P. Fajfar, A. Pecker. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- **« Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie conforme aux Eurocodes »** – Association Française du génie Parasismique (AFPS) – Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Edition 2011
- **« Ponts en zone sismique –Conception et Dimensionnement suivant l'Eurocode 8 »** – Version Référence SKU1844295507 CEREMA, 01/09/2015
- **« Dispositifs parasismiques pour les ponts » – Guide Technique en Projet** – AFPS/SETRA, Aout 2011
- **« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »** – Association Française du génie Parasismique (AFPS) – Cahier Technique N°38, 2017
- Le guide « Dimensionnement parasismique des éléments non structuraux du cadre bâti », édité par le MEDDE en septembre 2014
- « Comportement des éléments non structuraux sous séisme. Retour d'expérience, Dispositions applicables » AFPS Cahier technique 36 - Septembre 2015
- **« Echelle Macrosismique Européenne 1998 »** – G. Grünthal, A. Levret – Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche ; Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, 2001

Les guides donnés qui relèvent du risque normal doivent être appliqués avec l'aléa du risque spécial de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

6.2.2 Principes généraux

Les règles de conception parasismique reposent sur les principes suivants, permettant de limiter les efforts de dimensionnement et de les transmettre jusqu'au sol de façon adéquate tout en prenant en compte les déplacements différentiels :

- **Choix du site** : Dans la mesure du possible, choisir un site de façon à minimiser les risques potentiels de rupture, d'instabilité des pentes, de liquéfaction, et de forte susceptibilité à la densification (tassement) en cas de séisme. La norme NF EN 1998-5 fournit des prescriptions relatives au choix du site ;
- **Régularité** : Donner aux structures, dans la mesure du possible, des formes régulières en plan et en élévation. Si nécessaire, ceci peut être réalisé en divisant la structure, par des joints, en unités indépendantes du point de vue dynamique. Cependant, la présence de joints implique des déplacements différentiels entre les unités ;
- **Souplesse** : Privilégier une structure « souple » de grande période, de façon à se situer au-delà du plateau du spectre. La plus grande souplesse réduit les efforts mais s'accompagne de déplacements différentiels plus importants. Dans certains cas, la souplesse peut être mise en œuvre par l'utilisation de dispositifs d'isolation sismique

concentrant les déplacements sismiques. Généralement, ces dispositifs ont également un effet bénéfique d'amortissement du système

- **Ductilité** : Conférer un comportement ductile à l'ouvrage, qui permet à la structure de se déformer de façon inélastique sans perte significative de résistance, et de dissiper ainsi considérablement l'énergie sismique. Ce type de conception passe par la mise en place de dispositions constructives particulières, notamment au niveau des jonctions et assemblages, et permet alors la réduction des efforts de dimensionnement par l'utilisation d'un coefficient de comportement ;
- **Ancrage** : Porter une attention particulière au dimensionnement des ancrages des équipements de masse importante. Dans le cas d'un équipement reposant sur une structure support, il convient de tenir compte de l'amplification du mouvement sismique par l'utilisation d'un spectre transféré par exemple. Les méthodes de dimensionnement des ancrages sont détaillées dans le guide spécifique « Structures support » ;
- **Choix adapté du système de fondation** : Privilégier un système de fondation homogène pour une même structure, afin de transmettre au terrain les actions dues à la superstructure aussi uniformément que possible et de limiter les effets de déplacements différentiels dus à la variabilité spatiale du mouvement sismique par adjonction de longrines. Ce principe n'est pas valable pour les ponts et pour des unités indépendantes du point de vue dynamique ;
- **Effet de l'interaction sol-structure** : Utiliser l'effet bénéfique de l'interaction sol-structure qui permet généralement de réduire la fréquence du système et d'augmenter son amortissement en tenant compte de l'amortissement radiatif du sol.

6.2.3 Méthode de conception ductile

6.2.3.1 Zones dissipatives et dispositions constructives

La mise en application du comportement ductile doit se faire par une conception adéquate de zones ou d'éléments choisis à cette fin.

Dans la mesure où la résistance sismique d'une structure dépend largement du comportement de ses zones ou éléments dissipatifs, les dispositions constructives de la structure dans son ensemble et de ces zones ou éléments en particulier doivent être telles que la capacité à transmettre les efforts et à dissiper l'énergie dans des conditions de sollicitations sismiques soit maintenue. Dans ce but, il convient que la conception des liaisons entre éléments structuraux, ainsi que des zones où un comportement non linéaire est prévu, fasse l'objet d'une attention particulière lors de la conception et du dimensionnement.

Pour mémoire, les exigences relatives aux matériaux et aux dispositions constructives de ces zones ou éléments ductiles et dissipatifs portent sur :

- Pour les structures béton :
 - La classe de résistance du béton,
 - La nuance et la classe de ductilité de l'acier des armatures de béton armé,
 - Le pourcentage, l'espacement, le recouvrement et l'ancrage des armatures longitudinales, et, le pourcentage, le diamètre, l'espacement et la forme des armatures transversales les tenant,

- Pour les structures métalliques :
 - La classe de la section transversale pour les éléments dissipatifs comprimés ou fléchis,
 - La limite d'élasticité, la limite d'élasticité réelle maximale, la limite à rupture et la ténacité de l'acier de construction métallique,
 - La ténacité du métal d'apport pour les soudures,
 - L'utilisation de boulons précontraints à serrage contrôlé obligatoire dans les assemblages boulonnés des zones dissipatives de classe 8.8 ou 10.9 en catégorie B pour la classe de ductilité DCM et en catégorie C pour la classe de ductilité DCH suivant le Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie conforme aux Eurocodes.

- Pour la maçonnerie :
 - Les dimensions, positions, liaisons et ancrages des chainages,
 - Les sections d'armatures longitudinales des chainages,
 - La classe de béton pour la maçonnerie chaînée,
 - La position et la section d'armatures pour la maçonnerie armée.

Le « Guide des dispositions constructives parasismiques de l'AFPS pour les ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie conformes aux Eurocodes » présente les dispositions constructives pour un dimensionnement conforme à la norme NF EN-1998.

6.2.3.2 Localisation des zones dissipatives

Il est recommandé que les zones dissipatives choisies par le concepteur soient facilement accessibles, inspectables et éventuellement réparables après séisme. Dans un bâtiment par exemple, il convient de ne pas obstruer l'accès à ces zones par des éléments non-amovibles.

6.2.3.3 Classes de ductilité

La norme NF EN 1998 répartit les structures en trois classes de ductilité en fonction des dispositions constructives mises en place :

- limitée (DCL) : structure faiblement dissipative ;
- moyenne (DCM) : structure moyennement dissipative ;
- haute (DCH) : structure hautement dissipative.

Les trois niveaux de ductilité permettent, dans leur domaine d'applicabilité, de s'assurer que la structure résiste au même séisme de calcul réglementaire.

Pour chaque type d'ouvrage, les classes de ductilité sont associées à des valeurs de coefficient de comportement permettant de réduire les efforts de dimensionnement élastique en tenant compte du comportement non-linéaire de la structure (cf. 6.2.3.5).

La conception d'une structure de classe DCL ne demande pas de dispositions constructives particulières, sauf à partir de la zone 3 (cf. tableau ci-dessous). Les calculs peuvent être effectués par une méthode de dimensionnement usuelle, en réduisant les efforts sismiques élastiques par un coefficient s $q=1,5$ pour les structures béton (Article 5.3.3 de la NF EN 1998-1) et $q=1,5$ ou $2,00$ sur justifications appropriées pour les structures métalliques (Article 6.1.2 et Tableau 6.1 de la NF EN 1998-1 et chapitre 4 du document CNC2M-N0035) qui n'est pas un coefficient de comportement

classique mais rend compte des sur-résistances des matériaux. Dans le cadre de l'arrêté « risque spécial », la classe DCL concerne principalement les structures support. Le champ d'applicabilité de la classe DCL est défini :

- Pour les structures béton : dans la clause 5.3.1 (1) de la NF EN 1998-1 ;
- Pour les structures métalliques : dans le document BNCM/CNC2M-N0035.

Il est résumé ci-dessous :

Champ d'application de la classe DCL pour l'application de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié $q = 1,5$		
	<i>Structures béton</i>	<i>Structures métalliques</i>
Zone 1	Applicable	Applicable
Zone 2	Applicable	Applicable
Zone 3	Applicable sous conditions [cf. clause 5.3.1 (1) de la NF EN 1998-1]	Applicable sous conditions (cf. clause 3 (2) de la CNC2M-N0035)
Zone 4	Non-applicable	Applicable sous conditions (cf. clause 3 (2) de la CNC2M-N0035)
Zone 5	Non-applicable	Applicable sous conditions (cf. clause 3 (2) de la CNC2M-N0035)

Pour mémoire, pour les structures métalliques en classe de ductilité DCL, il est possible de retenir un coefficient de comportement $q=1,0$ en adoptant un spectre de réponse élastique défini au 4.2.1.1 pour la direction horizontale et au 4.2.1.2 pour la direction verticale. Ces spectres sont définis pour les valeurs du coefficient d'amortissement défini au Tableau 3 du Chapitre 5 du BNCM/CN2CM-N0035.

Pour les champs d'applicabilité des classes de ductilité relatifs aux équipements, on se réfèrera aux guides spécifiques.

Pour la conception d'une structure de classe DCM ou DCH, la mise en œuvre du niveau de ductilité approprié passe par le respect des dispositions particulières pour les éléments structuraux. La conception d'une structure de classe DCM et DCH doit être effectuée par un dimensionnement en capacité (cf. 6.2.3.4). Les valeurs de coefficient de comportement q applicables dans ces cas sont généralement supérieures à 1.5. Elles dépendent de la classe de ductilité et du type de structure.

Le tableau suivant synthétise les exigences et hypothèses générales relatives aux classes de ductilité :

Classe de ductilité	Méthode de dimensionnement	Dispositions constructives parasismiques	Valeur maximale de coefficient de comportement
DCL	Analyse élastique globale	Non-obligatoires	$q=1.5 / 2^*$
DCM	Dimensionnement en capacité	Obligatoires	$q>1.5$
DCH	Dimensionnement en capacité	Obligatoires	$q>1.5$

* $q=2$ uniquement pour les structures métalliques en zone de sismicité 1 à 4 sous réserve de justifications appropriées
(cf. clause 6.1.2 (1) de la NF EN 1998-1 et document n°CNC2M-N0035)

« Pour mémoire, la conception des ponts s'inscrit dans une logique légèrement différente : on y distingue ainsi uniquement la conception ductile et la conception en ductilité limitée ; chacune de ces conceptions étant assujettie à des dispositions constructives spécifiques plus ou moins sévères, et chacune pouvant être utilisée quelle que soit la zone de sismicité ou le type de matériaux. »

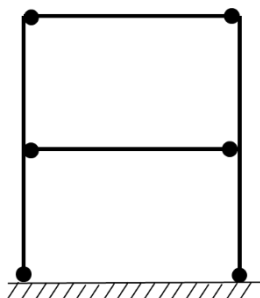
6.2.3.4 Méthode de dimensionnement en capacité

La méthode de dimensionnement en capacité permet un comportement dissipatif et ductile d'ensemble, en hiérarchisant les résistances des différents composants structuraux et les modes de défaillance. Ceci permet d'assurer un mécanisme plastique adéquat et d'éviter les modes de rupture fragile ou la formation prématurée de mécanismes instables.

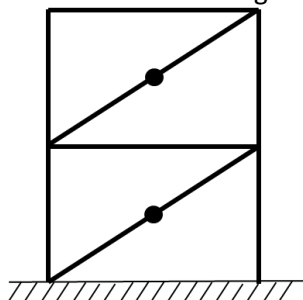
Ce type de dimensionnement s'impose pour la conception de structures de classe de ductilité moyenne (DCM) ou haute (DCH).

Exemples de dimensionnement en capacité :

- Pour un bâtiment ou une structure support contreventé par un système de poteaux et de poutres, la plastification à la jonction poteaux-poutres doit apparaître d'abord dans les poutres, et la formation d'un mécanisme pouvant entraîner l'effondrement doit être empêchée.



- Pour un bâtiment ou une structure support en charpente métallique contreventée par un système triangulé, la plastification des triangulations doit apparaître avant la plastification des autres éléments et assemblages du système triangulé.



- Pour un équipement souple pour lequel la déformation inélastique se concentre dans les boulons d'ancrages, il est nécessaire de concevoir les boulons avec une partie libre pouvant s'allonger plastiquement et de dimensionner l'ancrage dans le génie civil ainsi que les liaisons des boulons et de l'équipement avec une surcapacité et une conception des éléments de supportage comme, par exemple, l'ajout de chaises, permettant l'allongement du boulon sans rupture fragile de l'ancrage ou de l'équipement. Des exemples de détails pour des appareils à pression sont indiqués dans Process Equipment Design, Brownell and Young, J Wiley and Sons editors, 1966. Des détails sur la conception d'ancrages ductiles peuvent être trouvés dans Powell, S.J. and Bryant, A.H. Ductile anchor bolts for tall chimneys, Journal of Structural Division, ASCE, Vol 109, N°9, 1983.

Une situation comparable se produit pour un équipement souple où la déformation inélastique se concentre dans la structure support comme, par exemple, un réservoir sphérique sur poteaux contreventés. Les liaisons des contreventements avec les poteaux et celles des poteaux avec la sphère doivent être dimensionnées avec une surcapacité.

Les valeurs de surcapacité et la conception des éléments de supportage sont mentionnées dans la NF EN 1993 (structures métalliques) ou la NF EN 1998-1, paragraphe 6 ou la NF EN 1998-4 paragraphe 3.5.2.3.

Il est rappelé que pour un équipement rigide, il n'est pas possible de mobiliser raisonnablement la ductilité ; il faut dans ce cas imposer une surcapacité aux ancrages et liaisons et ne pas considérer de coefficient de comportement.

6.2.3.5 *Coefficient de comportement*

Dans le cas d'une conception ductile, il est toléré de réduire les efforts sismiques de dimensionnement en les divisant par un coefficient de comportement $q \geq 1.5$, qui dépend de la classe de ductilité, représentant la capacité de la structure à admettre les déformations plastiques. Ce coefficient tient compte des sur-résistances sur les matériaux (classes DCL/DCM/DCH) et de la capacité de dissipation d'énergie de la structure (classes DCM/DCH).

Les valeurs maximales du coefficient de comportement q , incluant également l'influence d'amortissements visqueux différents de 5 %, sont indiquées, pour divers matériaux et systèmes structuraux, selon divers niveaux de ductilité, dans les parties concernées de la NF EN 1998 ainsi que dans les guides d'application spécifiques.

Les valeurs du coefficient de comportement q peuvent être différentes dans les deux directions horizontales, bien que la classe de ductilité doive être la même dans toutes les directions.

Le coefficient de comportement dépend également de l'exigence imposée à la structure.

6.2.4 *Systèmes de fondation*

Les principes et règles de conception parasismique des systèmes de fondation sont détaillés dans la norme NF EN 1998-5. Les paragraphes suivants en donnent les grandes lignes.

6.2.4.1 *Choix du système de fondation*

Il convient de choisir judicieusement en fonction du type de sol et de la structure considérée le système de fondation adapté :

- Fondations superficielles ou enterrées : semelles, radier ou caissons ;
- Fondations profondes : pieux et puits.

Le système de fondation choisi doit être dimensionné en tenant compte des actions sismiques. Il convient de s'assurer de l'homogénéité en termes de raideur du système de fondation afin de ne pas générer de déplacements différentiels importants. Il faut donc être vigilant lorsque des fondations de type mixte sont utilisées (par exemple l'emploi de pieux avec des fondations superficielles).

Lors du choix et du dimensionnement du type de fondation, les points suivants doivent être pris en considération :

- La fondation doit être suffisamment rigide pour transmettre au sol, de manière uniforme, sans déformations permanentes substantielles, les actions localisées reçues de la superstructure ;
- Les effets des déplacements différentiels horizontaux entre deux fondations d'un même bâtiment doivent être pris en compte dès lors que les liaisons prévues par la clause 5.4.1.2 (2) de la norme NF EN 1998-5 ne sont pas envisagées. Dans le cas des bâtiments, l'exigence de liaison entre appuis est jugée satisfaite si les fondations sont disposées dans le même plan horizontal et si des longrines ou un dallage adéquat sont prévus en

tête des semelles ou des pieux. Ces mesures ne sont toutefois pas nécessaires pour les sols de classe A, et pour les sols de classe B en cas de faible sismicité.

6.2.4.2 Règles de conception

Les propriétés des sols améliorés sur site, voire substitués, doivent être prises en compte si l'amélioration ou la substitution du sol original est rendue nécessaire par sa susceptibilité à la liquéfaction ou sa sensibilité à la densification.

La conception au séisme du système de fondation consiste à vérifier :

- la résistance structurelle de la fondation ;
- le non-glissement ;
- la stabilité au renversement ;
- la capacité portante du sol.

Pour le dimensionnement des fondations de type pieux et puits, il convient de tenir compte, en plus des forces d'inertie provenant de la superstructure, des forces d'origine cinématiques résultant de la déformation du sol environnant au passage des ondes sismiques dans certaines conditions (cf. paragraphe 5.4.2 de la norme NF EN 1998-5 et Cahier Technique AFPS CT38).

6.2.5 Interaction sol-structure (ISS)

6.2.5.1 Influence de l'ISS sur le comportement sismique

Par suite de l'interaction dynamique sol-structure, la réponse sismique d'une structure sur appuis flexibles, c'est-à-dire d'une structure fondée sur un terrain déformable, diffère sous plusieurs aspects de celle de la même structure fondée sur un terrain rigide (base fixe), soumise à une sollicitation identique en champ libre, pour les raisons suivantes :

- le mouvement des fondations de la structure sur support flexible est différent du mouvement en champ libre et peut comprendre une composante de rotation importante de la structure à base fixe autour d'un axe horizontal ;
- la période fondamentale de vibration de la structure sur support flexible est plus longue que celle de la structure à base fixe ;
- les périodes naturelles, les modes propres et les facteurs de participation modale de la structure sur support flexible sont différents de ceux de la structure à base fixe ;
- l'amortissement global de la structure sur support flexible inclut d'une part l'amortissement radiatif, d'autre part l'amortissement interne engendré à l'interface sol-fondation, en plus de l'amortissement associé à la superstructure.

6.2.5.2 Prise en compte de l'ISS dans la conception

Pour la majorité des structures usuelles de bâtiments, les effets de l'interaction sol-structure ont tendance à être bénéfiques, puisqu'ils réduisent les moments fléchissants et les efforts tranchants dans les différents éléments de la superstructure, mais il existe certains cas où ces effets peuvent être néfastes.

De façon générale, il convient de prendre en compte la déformabilité du sol de fondation dans le modèle dans les cas suivants :

- A) à chaque fois qu'elle peut avoir une influence défavorable globale sur la réponse de la structure ;
- B) si elle a une influence bénéfique que l'on souhaite exploiter pour réduire les efforts de dimensionnement.

La norme NF EN 1998-5 impose la prise en compte des effets de l'interaction dynamique sol-structure dans les cas suivants :

- structures pour lesquelles les effets $P-\delta$ (2e ordre) jouent un rôle significatif ;
- structures avec fondations massives ou profondes comme les piles de ponts, les caissons offshore et les silos ;
- structures hautes et élancées, comme les tours et les cheminées, traitées dans l'EN 1998-6:2004 ;
- structures supportées par des sols très mous, tels que des sols de classe S1, avec une vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement $v_{s,max}$ inférieure à 100 m/s.

6.2.5.3 Modélisation de l'ISS

Les méthodes de modélisation de l'interaction sol-structure doivent tenir compte :

- du degré d'encastrement dans le sol ;
- de la profondeur d'un substratum rocheux éventuel ;
- de la stratification du sol ;
- de la variabilité des modules de sol dans chaque couche ;
- de la dépendance des propriétés du sol en fonction de la déformation (module de cisaillement et amortissement).

L'hypothèse de stratification horizontale peut être considérée comme applicable en l'absence de pendage marqué des diverses strates.

6.2.5.4 Cumul de l'ISS et du coefficient de comportement

Il convient d'être vigilant quant au cumul des effets de l'amortissement radiatif pris en compte par l'interaction sol-structure et de l'amortissement matériel modélisé par le coefficient de comportement q .

Ainsi, lorsqu'une analyse avec interaction sol-structure est effectuée, on procèdera selon l'une des méthodes suivantes :

	Spectre	Coefficient de comportement
Méthode 1 :	>5% en fonction de l'amortissement radiatif	$q \leq 1.5$
Méthode 2 :	5%	$q > 1.5$

6.2.5.5 Données géotechniques requises

Les données de sol nécessaires pour l'étude sisme avec prise en compte de l'interaction sol-structure sont les propriétés dynamiques des couches de sol jusqu'au substratum rocheux :

- Vitesse des ondes de cisaillement v_s ;
- ou module de cisaillement dynamique G_{dyn} .

L'amortissement et le module de cisaillement de chaque couche de sol dépendant de la déformation, il convient que leurs valeurs soient cohérentes avec le niveau de déformation de cisaillement devant se produire au cours de l'action sismique considérée.

Généralement, les études géotechniques réalisées pour établir la classe de sol au droit de l'ouvrage (cf. chapitre 4) suffisent pour déterminer les caractéristiques dynamiques des couches de sol pour l'interaction sol-structure.

On pourra se référer au tableau de l'Annexe A de la norme NF EN 1997-2 pour avoir une liste des résultats d'essais des normes d'essais géotechniques ainsi qu'au paragraphe 7.2.4 du présent guide.

6.2.6 Utilisation de dispositifs d'isolation sismique

Les règles de dimensionnement avec système d'isolation sismique font l'objet d'un paragraphe spécifique de la norme NF EN 1998-1 pour les bâtiments et de la norme NF EN 1998-2 pour les ponts.

6.2.6.1 Rôle et application des dispositifs

L'utilisation de dispositifs d'isolation sismique sous la masse principale d'un système permet de réduire les efforts sismiques dans la structure de contreventement grâce aux effets suivants, combinés ou non :

- Augmentation de la période fondamentale de la structure sismiquement isolée, en modifiant la forme du mode fondamental. Le système d'isolation agit alors comme un filtre qui concentre les déformations sismiques ;
- Augmentation de l'amortissement.

Le système d'isolation peut être constitué de ressorts et/ou d'amortisseurs linéaires ou non linéaires.

Ces dispositifs sont généralement assez coûteux et lourds à mettre en place. Ils sont donc préférentiellement utilisés pour des structures ou équipements situés dans des zones de sismicité modérée à forte.

On peut également envisager la mise en place de ces dispositifs pour conserver des conceptions standardisées d'installations ou de composants.

6.2.6.2 Règles générales de conception

La conception d'un système avec isolation sismique doit permettre à la superstructure de rester élastique lors de la sollicitation sismique, la plus grande partie des déformations étant absorbée par l'isolateur.

Sous certaines conditions, la norme NF EN 1998-1 permet d'utiliser la méthode d'analyse linéaire simplifiée, supposant que la superstructure est un solide rigide en translation au-dessus du système d'isolation.

Sauf indication contraire, la valeur du coefficient de comportement doit donc être prise égale à $q = 1$ pour les éléments de la superstructure, puisqu'aucune dissipation d'énergie n'y a lieu. Dans les bâtiments, il est possible d'utiliser sans justification un coefficient de comportement au plus égal à 1.5; cette valeur de 1.5 n'est pas associée à une dissipation d'énergie mais rend compte des sur-résistances mobilisables dans la structure.

En fonction du type de dispositif considéré, il convient d'évaluer la résistance des unités d'isolation à l'état limite ultime en termes de :

- forces, en prenant en compte les forces verticales et horizontales maximales possibles dans la situation sismique de calcul, y compris les effets de renversement ;

- déplacement relatif horizontal total et rotation relative totale entre les faces inférieure et supérieure de l'unité. Il convient que le déplacement horizontal total et la rotation relative totale incluent le déplacement et la rotation dus à l'action sismique de calcul et aux effets de retrait, de fluage, de température et de post-tension (si la superstructure est précontrainte).

Pour la zone de sismicité 5, si la structure est située à une distance inférieure à 15 km de la faille potentiellement active la plus proche, avec une magnitude $M_s \geq 6.5$, il convient de corriger les basses fréquences du spectre pour prendre en compte les effets de directivité liés à la source tel qu'exigé par la norme NF EN 1998-1 (clause 10.6 (3)). On attire l'attention sur le fait qu'en l'état actuel de la réglementation, l'Administration n'accepte pas qu'une telle correction conduise à un spectre inférieur aux spectres définis au chapitre 4 du présent guide.

6.3 Application à des ouvrages et équipements spécifiques

Les exemples présentés ci-après concernent des ERS (réservoirs, tuyauteries, ...) ou partie d'ERS (structures métalliques ou en béton armé, ...) ou des OPA (cheminées, ...).

6.3.1 Equipements

Les principes et règles de conception parasismique concernant les équipements et structures suivants sont traités dans les guides spécifiques associés :

- « Réservoirs de stockage atmosphérique »
- « Tuyauteries et robinetteries »
- « Équipements de procédés »
- « Structures support ».

6.3.2 Structures en acier

Les règles de conception parasismique pour les structures en acier sont données dans la section 6 de la norme NF EN 1998-1.

6.3.2.1 Ductilité et coefficient de comportement

Dans les zones de sismicité modérée (zone 3) à forte (zone 5), la norme Eurocode 8 recommande de dimensionner les structures métalliques selon un comportement de structure dissipatif, mis en œuvre par une conception ductile de classe moyenne (DCM) ou haute (DCH).

Dans ce cadre, il est alors toléré de réduire les efforts sismiques de dimensionnement en appliquant un coefficient de comportement q . La limite supérieure de la valeur de q dépend de la classe de ductilité et du type de structure. Pour des ossatures métalliques de type portique, dans lesquelles la résistance aux forces horizontales est assurée principalement par flexion, il est possible d'utiliser un coefficient de comportement q allant jusqu'à 4 pour une classe DCM et 6,5 pour une classe DCH.

Pour le champ d'applicabilité de la DCL aux structures métalliques, on pourra se référer au document n° CNC2M-N0035 du 31/03/2013, édicté par le BNCM : « Recommandations pour le dimensionnement parasismique des structures en acier et mixtes non ou faiblement dissipatives ».

Selon la classe de ductilité, des exigences particulières relatives à un ou plusieurs aspects suivants doivent être respectées :

- La classe de la section transversale des profilés
- La limite d'élasticité, la limite d'élasticité réelle maximale, la limite à rupture et la ténacité de l'acier,
- La ténacité du métal d'apport des soudures,

- La classe de qualité de la boulonnerie à haute résistance.

6.3.2.2 Position des zones dissipatives

L'Eurocode 8 permet la formation de zones dissipatives en parties courantes des barres ou dans les assemblages. Cependant, suite aux endommagements importants des assemblages de portiques métalliques constatés lors du séisme de Northridge, les exigences d'exécution des assemblages à proximité des zones dissipatives ont été revues à la hausse. La Federal Emergency Management Agency (FEMA) a établi des dispositions constructives dans ce sens.

Pour un bâtiment ou une structure support contreventé par un système de poteaux et de poutres, la plastification à la jonction poteaux-poutres doit apparaître d'abord dans les poutres, et la formation d'un mécanisme pouvant entraîner l'effondrement doit être empêchée.

Pour un bâtiment ou une structure support contreventé par un système triangulé, la plastification des triangulations doit apparaître avant la plastification des autres éléments et assemblages du système triangulé.

Lorsque les zones dissipatives sont situées dans les éléments structuraux, les parties non dissipatives et les assemblages doivent avoir une sur-résistance suffisante pour garantir l'apparition et le maintien de la plastification cyclique dans les zones dissipatives (dimensionnement en capacité).

6.3.3 Tours, mâts et cheminées

Les principes et règles de conception parasismique des tours, mâts et cheminées sont détaillés dans la norme NF EN 1998-6. Les paragraphes suivants en donnent les grandes lignes.

6.3.3.1 Prise en compte de la composante en rotation de l'action sismique

Il convient, outre les composantes de translation du mouvement sismique de tenir compte de la composante de rotation du mouvement du sol pour les structures de grande hauteur dans les zones de forte sismicité. L'Annexe A de la NF EN 1998-6 donne une méthode possible pour définir les composantes de rotation du mouvement du sol et fournit des recommandations visant à tenir compte de ces dernières dans l'analyse.

Lorsque les composantes de rotation du mouvement du sol sont prises en compte, il y a lieu de considérer qu'elles agissent simultanément avec les composantes de translation.

6.3.3.2 Mouvements de longues périodes

Les tours, mâts et cheminées sont souvent sensibles au contenu en périodes longues du mouvement du sol. Les sols souples ou comportant certaines particularités topographiques peuvent conduire à des amplifications inhabituellement élevées des composantes du mouvement du sol associées à ces périodes longues. Il convient de prendre en compte cette amplification de façon appropriée.

6.3.3.3 Modélisation

Il convient que le modèle de la structure tienne compte :

- de la raideur de la fondation vis-à-vis de la rotation et de la translation (ISS) ;
- de la raideur des câbles et des haubans ;
- des déplacements relatifs entre les supports des équipements ou des machineries (par exemple, l'interaction entre une couche isolante et le tube extérieur d'une cheminée) ;
- des interactions dues à la tuyauterie, les liaisons au milieu extérieur, les actions hydrodynamiques.

6.3.3.4 Ductilité et coefficient de comportement

Il convient que la valeur du coefficient de comportement utilisée dans le calcul soit en relation avec la capacité de ductilité et de dissipation d'énergie de la structure.

Pour les structures en zone de sismicité 1 ou 2, un dimensionnement de la structure pour un comportement non dissipatif dans la situation sismique de calcul permet de satisfaire aux exigences fondamentales, en ne tenant pas compte de la dissipation d'énergie hystérétique et en négligeant les dispositions de la NF EN 1998-6. Dans ce cas, il convient que le coefficient de comportement ne soit pas supérieur à 1.5, valeur qui tient compte des sur-résistances.

Si l'on dimensionne la structure pour un comportement dissipatif en appliquant les règles spéciales données dans la NF EN 1998-6 pour les différents types de structures, un coefficient de comportement supérieur à 1.5 peut alors être utilisé. Les valeurs de coefficient de comportement applicables et critères associées sont précisées dans des paragraphes spécifiques de la NF EN 1998-6 pour les structures suivantes :

- cheminées en béton armé ;
- cheminées métalliques ;
- pylônes en acier ;
- mâts haubanés.

Les cheminées en maçonnerie et pylônes de lignes électriques sont traités dans des annexes informatives.

6.3.4 Bâtiments

Les principes et règles de conception parasismiques des bâtiments sont détaillés dans la norme NF EN 1998-1 et son annexe nationale. Les paragraphes suivants en donnent les grandes lignes.

6.3.4.1 Principes généraux

Les principes qui guident la conception des bâtiments vis-à-vis de l'aléa sismique sont :

- la simplicité de la structure ;
- l'uniformité, la symétrie et l'hyperstaticité ;
- la résistance et la rigidité dans les deux directions ;
- la résistance et la rigidité vis-à-vis de la torsion ;
- l'action des diaphragmes au niveau des planchers ;
- des fondations appropriées.

Ces principes sont explicités dans la section 4.2.1 de la norme NF EN 1998-1.

6.3.4.2 Influence de la régularité du bâtiment

En vue du dimensionnement sismique, les structures de bâtiment sont classées en structures régulières et structures irrégulières.

Cette distinction a des implications sur les aspects suivants du dimensionnement sismique :

- le modèle de structure peut être un modèle simplifié plan, ou bien un modèle spatial ;
- la méthode d'analyse peut être soit une analyse spectrale simplifiée (méthode des forces latérales), soit une analyse modale ;
- la valeur du coefficient de comportement q , qui doit être minorée pour les bâtiments irréguliers en élévation

Les critères de régularité en plan et en élévation font l'objet du paragraphe 4.2.3 de la norme NF EN 1998-1.

6.3.4.3 Critères de conception

L'exigence de non-effondrement dans la situation sismique de calcul est considérée comme satisfaite si les conditions suivantes sont respectées :

- la résistance (NF EN 1998-1 § 4.4.2.2) ;
- la ductilité locale et globale (NF EN 1998-1 § 4.4.2.3) ;
- l'équilibre (NF EN 1998-1 § 4.4.2.4) ;
- la stabilité des fondations (NF EN 1998-1 § 4.4.2.6) ;
- largeur des joints sismiques (NF EN 1998-1 § 4.4.2.7).

La NF EN 1998-1 § 2.1 préconise pour les bâtiments la vérification d'une exigence de limitation des dommages pour un aléa sismique correspondant à une fraction de celui associé à l'exigence de non effondrement. Dans le cadre de l'application de l'arrêté, cette exigence n'a pas à être vérifiée ; en revanche, chaque élément partie du bâtiment, y compris les éléments non structuraux (cloisons par exemple), qui pourrait agir comme OAP sur l'équipement à risque spécial doit être vérifié, avec les critères associés aux OAP, pour le niveau d'aléa sismique de l'arrêté.

Des exigences liées au fonctionnement de l'ouvrage ou de l'installation peuvent imposer pour la structure et les éléments qu'elle contient des conditions de dimensionnement plus sévères que celles décrites ci-dessus.

6.3.5 Structures béton armé

Les règles de conception parasismique pour les structures de béton armé sont données dans la section 5 de la norme NF EN 1998-1 et son annexe nationale.

6.3.5.1 Type de structures

Les structures en béton doivent être classées dans un des types de structure suivants selon leur comportement sous l'effet des actions sismiques horizontales :

- système à ossature ;
- système à contreventement mixte (équivalent à un système à ossature ou à un système de murs) ;
- système de murs (couplés ou non) ;
- système de murs de grandes dimensions en béton peu armé ;
- système en pendule inversé ;
- système à noyau.

6.3.5.2 Ductilité et coefficient de comportement

La conception et le dimensionnement avec une classe de ductilité limitée (DCL) pour les structures béton ne sont applicables que dans les cas de faible sismicité (zone 1 et 2) et sous réserve du respect d'exigences particulières concernant la structure de contreventement en zone de sismicité modérée (zone 3) (cf. Article 5.3.1(1) de la NF EN 1998-1).

Dans les zones de sismicité modérée (zone 3) à forte (zone 5), la norme Eurocode 8 recommande de dimensionner les structures en béton selon un comportement de structure dissipatif, mis en œuvre par une conception ductile de classe moyenne (DCM) ou haute (DCH).

Les coefficients de comportement à prendre en compte pour un dimensionnement ductile dépendent du type de structure et de la classe de ductilité. Ils sont précisés dans le tableau 5.1 de la norme NF EN 1998-1. Les valeurs varient entre 1,5 et 4,5 pour les structures DCM et entre 2 et 6,75 pour les structures DCH.

6.3.5.3 Dispositions constructives

La mise en œuvre d'un comportement ductile passe par l'application de dispositions constructives permettant le développement des rotules plastiques dans les zones critiques. Elles sont par conséquent particulièrement contraignantes dans les zones de rotules plastiques potentielles.

Pour des ouvrages de béton, le rôle des dispositions constructives sismiques est multiple :

- Pour les poteaux, maintenir un noyau de béton confiné intègre permettant d'empêcher l'effondrement,
- Pour les poutres et les poteaux :
 - augmenter la résistance et la ductilité du noyau de béton confiné par la pression de confinement exercée par les armatures transversales,
 - Empêcher le flambement des armatures longitudinales par les armatures transversales les tenant pour maintenir le noyau de béton confiné.

Ces dispositions constructives sismiques spécifiées dans la norme NF EN 1998-1 mènent à l'établissement de règles supplémentaires par rapport aux dispositions constructives non-sismiques de la norme NF EN 1992-1-1. Pour mémoire, les dispositions sismiques portent sur :

- La classe de résistance du béton,
- La nuance et la classe de ductilité de l'acier des armatures de béton armé,
- Le pourcentage, l'espacement, le recouvrement et l'ancrage des armatures longitudinales, et, le pourcentage, le diamètre, l'espacement et la forme des armatures transversales les tenant.

Le « Guide des dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie conformes aux Eurocodes » de l'AFPS présente ces dispositions constructives.

6.3.6 Éléments non-structuraux

6.3.6.1 Éléments concernés

Certains éléments non-structuraux doivent être vérifiés pour la situation sismique de calcul ou faire l'objet de dispositions constructives permettant d'assurer leur tenue ainsi que celle de leurs ancrages.

Les éléments non-structuraux (ou petits équipements) concernés sont ceux qui peuvent, en cas de rupture, provoquer des blessures du personnel ou l'obstruction des voies d'intervention (BPAP inefficace), ou l'endommagement de l'ERS :

- cheminées de bâtiments ;
- murs rideaux, cloisons ;
- armoires et étagères ;
- luminaires ;
- chemins de câbles ;
- bouteilles de gaz et extincteurs ;
- faux-plafond ;
- etc...

6.3.6.2 Dispositions constructives

De simples dispositions constructives permettent d'assurer la tenue au séisme de certains de ces éléments :

- Armoires métalliques élancées (armoires électriques, casiers de vestiaires...) : Fixation des équipements de type au sol et au mur par l'intermédiaire de cornières ou platines ancrées au support Génie-Civil par des chevilles ;
- Etagères : Fixation aux murs par des chevilles et mise en place de barrières évitant la chute des éléments stockés ;
- Luminaires : Contreventement par des suspentes inclinées servant de haubans, fixées par des chevilles au plafond ;
- Chemins de câbles, gaines de ventilation et tuyauterie : Mise en place d'une structure de support avec bracons fixée par des chevilles au plafond ou au mur et au plafond ;
- Bouteilles de gaz et extincteurs : Pose verticale et bride par des sangles fixées au mur par des chevilles ;
- Objets de bureautique : Mise en place de butées ou fixation par des sangles ;
- Chariots : mise en place d'une zone de garage comportant un dispositif de blocage.
- Mécanismes d'ouverture de portes : il est impératif que les portes munies d'ouvertures automatiques devant être utilisées dans le cadre d'une intervention soient munies également d'une ouverture manuelle.

Le guide « Dimensionnement parasismique des éléments non structuraux du cadre bâti », édité par le MEDDE en septembre 2014 et le Cahier Techniques 36 de l'AFPS, publié en septembre 2015, fixent les objectifs de performance à satisfaire pour les éléments du clos bâti.

6.3.6.3 Règles de dimensionnement

Le dimensionnement des éléments non structuraux dont la raideur et la masse sont susceptibles d'influencer le comportement de l'ouvrage doit être effectué en les intégrant au modèle de calcul. Lorsqu'il n'y a pas d'interaction dynamique (modification de la réponse du bâtiment par la présence de l'élément) entre l'ouvrage et l'élément non structural, le calcul avec spectres transférés ou la formule simplifiée du paragraphe 4.3.5.2 de NF EN 1998-1 est possible.

L'application d'un coefficient de comportement $q=2$ est autorisée pour le dimensionnement de certains éléments non-structuraux (cf. tableau 4.4 de la NF EN 1998-1).

6.3.7 **Ponts**

Un pont situé au sein d'un site ou permettant l'accès à ce site peut constituer un OAP ou une partie de BPAP (pour l'acheminement des secours).

Les principes et règles de conception parasismique des ponts sont détaillés dans la norme NF EN 1998-2. Les paragraphes suivants en donnent les grandes lignes.

Les dispositions constructives sont précisées en détail dans la section 9 de la norme NF EN 1998-2 ainsi que dans le guide des dispositions constructives de l'AFPS.

6.3.7.1 Principes généraux

La conception usuelle d'un pont en zone non-sismique consiste à laisser libres les mouvements relatifs du tablier et des piles dans le sens longitudinal, en ne laissant qu'un point d'appui fixe au voisinage de la pile centrale de l'ouvrage, afin de limiter les contraintes dans le tablier.

Ce type de conception n'est pas adapté à un ouvrage en zone sismique. En effet, lorsqu'un pont est soumis à un séisme, l'accélération sismique du sol est transmise au tablier par les piles. La masse du tablier soumise à l'accélération génère des efforts inertiels importants. Ces efforts sismiques ne peuvent être transmis qu'au niveau des appuis fixes. Une pile unique n'est généralement pas suffisante pour reprendre les efforts sismiques de l'ensemble du tablier, il faut donc utiliser plus d'appuis fixes répartis régulièrement le long de l'ouvrage. On peut également utiliser des systèmes permettant de tolérer les déplacements dus aux charges lentes comme les charges thermiques mais bloquant les déplacements pour les mouvements rapides. En général, les ponts ayant un tablier continu se comportent mieux dans les conditions sismiques que les ponts ayant de nombreux joints de dilatation.

Dans les zones de sismicité modérée ou forte, il convient de concevoir les ouvrages de façon à ce qu'ils adoptent un comportement ductile en cas de séisme ou d'utiliser des dispositifs d'isolation sismique permettant de réduire les efforts sismiques transmis aux piles.

6.3.7.2 Conception ductile

Les ponts ayant un comportement ductile doivent être dimensionnés de manière qu'un mécanisme plastique stable puisse se produire dans la structure, par la formation de rotules plastiques de flexion. Ces rotules se forment normalement dans les piles et agissent comme les éléments essentiels pour la dissipation de l'énergie. Le comportement sismique post-élastique optimal est obtenu dans le cas où les rotules plastiques se forment presque simultanément dans le plus grand nombre possible de piles.

Les valeurs maximales du coefficient de comportement qui peuvent être utilisées pour les deux composantes sismiques horizontales sont données dans le Tableau 4.1 de la norme NF EN 1998-2. Elles dépendent du comportement post-élastique des éléments ductiles, dans lesquels se produit la principale dissipation d'énergie.

Il convient, dans toute la mesure du possible, de choisir l'emplacement des rotules plastiques aux points accessibles pour l'inspection et les réparations.

Le dimensionnement du système doit être effectué de façon à éviter toute formation de rotule plastique dans le tablier du pont et éléments précontraints.

6.3.7.3 Ponts avec isolation sismique

Les unités d'isolation sont disposées généralement sous le tablier et au-dessus de la tête des piles/culées. Elles visent à réduire la réponse :

- par une augmentation de la période fondamentale de la structure (effet du décalage de la réponse lue sur le spectre de réponse), qui réduit les forces mais augmente les déplacements ;
- par une augmentation de l'amortissement, qui réduit les déplacements et peut réduire les forces ;
- (solution préférable) par une combinaison de ces deux effets.

Les unités d'isolation consistent généralement en :

- des appareils d'appui en élastomères
- des amortisseurs visqueux fluides ;
- des dispositifs à comportement frottant.

Dans le cas de piles équipées d'appareils d'appui, il convient de dimensionner les piles pour qu'elles restent dans le domaine élastique (coefficient de comportement $q=1$).

Une conception avec appareils d'appuis souples peut conduire à des déplacements relatifs importants du tablier sur ses appuis et des distorsions importantes. Les risques d'échappement d'appui du tablier selon les directions transversales et longitudinales doivent être maîtrisés par l'application de dispositions constructives particulières au niveau des chevêtres et des systèmes d'appui.

7. Étude des ouvrages ou équipements existants

Ce chapitre a pour but de guider l'utilisateur dans l'étude de la démonstration de conformité d'un ouvrage ou d'un équipement existant aux exigences de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié; les ouvrages et équipements concernés par ce chapitre représentent la grande majorité des installations concernées par l'arrêté.

Dans un premier temps, la démarche et les différentes stratégies à adopter pour traiter un ouvrage existant sont présentées.

Les différentes étapes de la démarche sont ensuite détaillées et des directives sont données en ce qui concerne la collecte des données d'entrée, les méthodes de diagnostic en fonction des données d'entrée disponibles, les essais ou études à effectuer pour pallier le manque de données, et enfin, les mesures correctives à mettre en œuvre pour les équipements ou ouvrages ne satisfaisant pas les exigences.

7.1 Démarche pour le traitement d'un ouvrage ou équipement existant

7.1.1 *Approche et stratégies*

Avant de débiter le processus proprement dit de diagnostic sismique, l'exploitant aura intérêt à orienter sa stratégie en se basant sur les éléments en sa possession à ce moment particulier de son approche.

En effet, il existe 4 grands axes de travail pour vérifier qu'un équipement satisfait aux exigences de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié :

- justifier du respect des exigences de comportement de l'équipement ou de la structure pour le niveau de séisme réglementaire par une méthode calculatoire ou non ;
- renforcer physiquement l'équipement ou le remplacer (ERS ou OAP) ;
- mettre en place des barrières pertinentes (BPAP) (barrières physiques ou instrumentation) ou réduire le risque à la source afin que l'équipement ne génère plus de phénomènes dangereux satisfaisant aux critères risque spécial ;
- s'assurer de la maîtrise foncière des terrains concernés par les impacts létaux induits par l'équipement en cas de séisme.

Les barrières évoquées ci-dessus sont celles qui, par leur existence, permettent de cantonner les effets létaux en cas de séisme à l'intérieur du site, autrement dit de "sortir" l'équipement du périmètre de l'étude. Ce sont les Barrières de Prévention, d'Atténuation d'effets ou de Protection (BPAP) telles que définies au § 3.1.2.a.

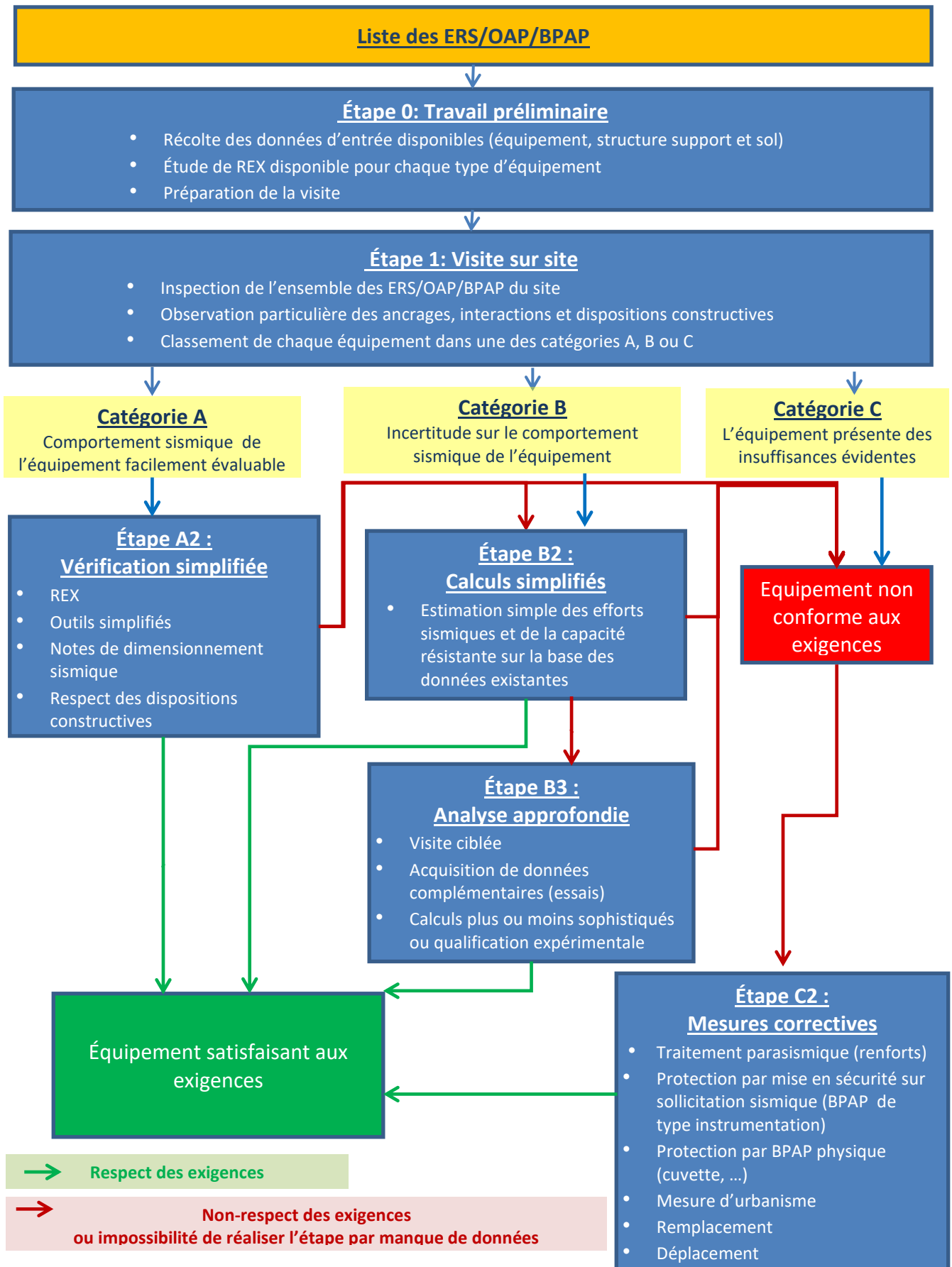
Bien sûr, l'exploitant visera la stratégie optimale en termes de coût (investissement et maintenance) tout en s'assurant, grâce à la collection des guides nationaux dont le présent guide fait partie, de la pertinence technique de la solution envisagée.

Il faut souligner que la plupart des équipements de sites industriels (partie chaudronnée) ont un bon comportement au séisme même s'ils n'ont pas été spécifiquement conçus selon des considérations parasismiques. Cette constatation est la raison pour laquelle de nombreux équipements (pour la partie chaudronnée) peuvent être dédouanés sans calculs spécifiques sur la base du retour d'expérience.

Cependant, certaines familles d'équipements présentent des dommages en cas de séisme et demandent des vérifications complémentaires ou la mise en place de dispositions particulières pour satisfaire à l'arrêté ; c'est le cas par exemple de certains réservoirs atmosphériques ou des armoires électriques et des contacteurs et relais. Les structures support, ouvrages d'art ou les bâtiments demandent généralement des renforcements significatifs.

7.1.2 Logigramme synthétique

L'approche à adopter pour le diagnostic de chaque équipement est synthétisée dans le logigramme suivant :



7.1.3 Description de la méthodologie

7.1.3.1 Étape 0 : Travail préliminaire

La méthodologie de diagnostic des équipements et structures existants part de la liste de l'étude de périmètre ayant permis d'identifier les ERS ainsi que leurs OAP et BPAP. Un travail préliminaire doit permettre à l'exploitant d'établir sa stratégie pour traiter chaque équipement. Ce travail comprend :

- La **récolte des données d'entrée disponibles** concernant chaque équipement. Ces données comprennent les données de sol ainsi que les données sur l'équipement et sa structure support. Les informations à récolter à cette étape sont détaillées au paragraphe 7.2 ;
- L'**identification** à partir de l'étude de définition du périmètre de l'étude (cf. § 3.) **des barrières** pertinentes existantes, des barrières existantes qu'une mise à niveau rendraient pertinentes, voire d'une liste de nouvelles barrières pouvant être mises en place.
- S'il existe, l'**étude du retour d'expérience (REX)** disponible pour chaque type d'équipement. Il peut s'agir de REX post-sismique, de REX issu d'études sismiques d'équipements similaires ou de REX d'essai d'équipements sur table vibrante. Les détails concernant la récolte d'information de retour d'expérience sont explicités au paragraphe 7.2 ;
- La **préparation de la visite**. A partir des données d'entrée et du REX, il s'agit de mettre en place la stratégie pour la visite de site qui constitue la phase cruciale du diagnostic. Cette étape consiste à répertorier les données disponibles et les informations manquantes, à identifier les points à regarder pour chaque équipement, et à établir pour quels équipements il est nécessaire de consacrer le plus de temps. Cette étape est détaillée au paragraphe 7.2.6.

7.1.3.2 Étape 1 : Visite de site

Le paragraphe 7.3 précise la composition de l'équipe à mettre en place pour effectuer la visite et détaille son déroulement. La visite est axée autour du classement des équipements en trois catégories comme le montre le logigramme :

- **Catégorie A** : équipements dont le comportement sismique est facilement évaluable

Sont classés dans cette catégorie les équipements ou structures pour lesquels il est a priori possible de justifier du respect des exigences sans calcul, à partir du retour d'expérience (REX), du simple respect des dispositions constructives, d'outils de diagnostic, ou de notes de dimensionnement au séisme (Etape A2). La méthode de vérification est présentée au paragraphe 7.1.3.3. Il convient de remarquer que les éléments nécessaires à la justification d'un équipement de catégorie A dépendent de la zone sismique dans laquelle se situe l'installation.

- **Catégorie B** : incertitude sur le comportement sismique de l'équipement

Sont classés dans cette catégorie les équipements ou structures pour lesquels il est nécessaire d'effectuer une analyse plus poussée pour évaluer le comportement sismique et justifier ou non du respect des exigences (Etapes B2 et éventuellement B3). Il s'agit des équipements pour lesquels le diagnostic demandera le plus d'effort

- **Catégorie C** : l'équipement présente des insuffisances évidentes

Sont classés dans cette catégorie les équipements ou structures pour lesquels les seules inspection visuelle et analyse des données d'entrée révèlent des insuffisances évidentes vis-à-vis du niveau d'exigence requis pour le niveau de séisme réglementaire. Il s'agit par exemple d'une insuffisance manifeste des ancrages de l'équipement, d'un état fortement dégradé de l'ouvrage (corrosion...). Ces équipements devront nécessairement faire l'objet de mesures correctives pour la mise en conformité vis-à-vis de l'arrêté (Étape C2).

7.1.3.3 Étape A2 : Vérification simplifiée

Cette étape ne concerne que les équipements classés en **Catégorie A** à l'issue de la visite. Elle consiste à vérifier le respect des exigences de ces équipements vis-à-vis du séisme réglementaire. Le diagnostic est effectué par une **vérification simplifiée**.

L'évaluation du comportement sismique et la justification d'un équipement par cette méthode simplifiée se base sur les éléments suivants :

- Le **retour d'expérience (REX)** du comportement d'équipements similaires (cf. 7.4.1) ;
- Le respect des **dispositions constructives**. (cf. 7.4.2) ;
- L'application d'**outils simplifiés** (cf. 7.4) ;
- L'étude des **notes de dimensionnement au séisme** de l'équipement pour les installations en zone 4 et 5 (cf. 7.4.4).

Les éléments requis dans l'application de cette méthode de vérification simplifiée sont **fonction de la zone sismique** dans laquelle se situe l'installation et du type d'équipement. Certains guides spécifiques fournissent la liste des éléments requis propre à certains types d'équipement. Dans le cas général ou en l'absence d'une telle liste, le tableau suivant précise les éléments requis selon la zone de sismicité :

Éléments minima requis pour la justification d'un équipement de Catégorie A				
	REX	Dispositions constructives	Outils simplifiés	Notes de dimensionnement sismique
Zone 1	X	X	(X)	(X)
Zone 2	X	X	X	(X)
Zone 3	X	X	X	(X)
Zone 4	X	X	(X)	X
Zone 5	X	X	(X)	X

Note : les éléments notés « X » sont indispensables ; ceux « (X) » facultatifs. Ainsi, il s'agit de « et » et non de « ou » entre les colonnes.

A la fin de cette étape :

- Si le respect des exigences est justifié, l'équipement est réputé satisfaire aux exigences de l'arrêté ;
- Si la méthode conclut au non-respect des exigences ou ne peut pas conclure, l'exploitant a deux possibilités :
 - Mettre en œuvre des calculs simplifiés (Étape B2) puis, si nécessaire, une analyse approfondie (Étape B3) pour tenter de justifier l'équipement s'il pense que des méthodes d'analyse plus sophistiquées peuvent permettre d'identifier des marges de capacité non identifiables par la méthode simplifiée ;

- Qualifier l'équipement de non-conforme aux exigences de l'arrêté et mettre en place des mesures correctives s'il pense que l'étude plus poussée ne permettra pas de justifier l'équipement tel quel.

7.1.3.4 Étape B2 : Calcul simplifié

Cette étape s'applique :

- à tous les équipements de **Catégorie B**
- aux équipements de **Catégorie A** n'ayant pu être justifiés par la méthode de vérification simplifiée (Étape A2) et pour lesquels l'exploitant pense qu'il peut y avoir des marges en réalisant un calcul.

Le calcul simplifié est effectué **sur la base des données disponibles à ce stade**.

Cette étape consiste à évaluer les efforts sismiques pour le niveau de séisme réglementaire par des calculs « manuels » simples (cf. 7.5). Il ne s'agit pas à ce stade de faire intervenir de modèles aux éléments finis.

A la fin de cette étape :

- Si le respect des exigences est satisfait, l'équipement est qualifié de conforme aux exigences de l'arrêté ;
- Si la méthode conclut au non-respect des exigences ou ne peut pas conclure, l'exploitant a deux possibilités :
 - Mettre en œuvre une analyse approfondie (Étape B3) pour tenter de justifier l'équipement s'il pense que des méthodes d'analyse plus sophistiquées ou des qualifications expérimentales peuvent permettre d'identifier des marges de capacité non identifiables par la méthode simplifiée ;
 - Qualifier l'équipement de non-conforme aux exigences de l'arrêté et mettre en place des mesures correctives s'il pense que l'étude plus poussée ne permettra pas de justifier l'équipement.

7.1.3.5 Étape B3 : Analyse approfondie

Cette étape s'applique aux équipements de **Catégorie A et B** n'ayant pu être justifiés par la méthode de calcul simplifié (Étape B2) et pour lesquels l'exploitant pense qu'il peut y avoir des marges en utilisant une méthode de justification plus sophistiquée, ou aux équipements pour lesquels les données d'entrée sont insuffisantes.

L'analyse approfondie peut demander l'obtention de données complémentaires par une visite ciblée, des relevés, des essais géotechniques, ou d'autres essais (cf. 7.6.1). Une fois les informations suffisantes, le diagnostic peut être réalisé par une méthode calculatoire plus ou moins complexe (cf. 7.6.2) ou par qualification expérimentale (cf. 7.6.3).

A la fin de cette étape :

- Si le respect des exigences est satisfait, l'équipement est qualifié de conforme aux exigences de l'arrêté ;
- Si la méthode conclut au non-respect des exigences ou ne peut pas conclure, l'exploitant a épuisé ses possibilités pour justifier l'équipement. L'équipement ou la structure est alors qualifié de non-conforme aux exigences de l'arrêté et l'exploitant doit mettre en place des mesures correctives pour le rendre conforme.

7.1.3.6 Étape C3 : Mesures correctives

Cette étape s'applique :

- à tous les équipements de Catégorie C ;
- aux équipements de Catégorie A et B n'ayant pu être justifiés par les méthodes de vérification plus ou moins complexes (« Vérification simplifiée », « Calcul simplifié » ou « Analyse approfondie »).

Cette étape consiste en la mise en œuvre de mesures correctives pour rendre ces équipements ou structures conformes aux exigences de l'arrêté. En fonction de sa stratégie, l'exploitant a plusieurs solutions pour rendre un équipement ou une structure conforme :

- Le traitement par des renforts ou dispositifs parasismiques dimensionnés pour le niveau de séisme réglementaire (cf. 7.7.1) ;
- Le remplacement par un équipement dont le respect des exigences pour le niveau de séisme réglementaire relatif aux équipements neufs aura été démontré ;
- Une stratégie de protection par mise en sécurité (BPAP de type instrumentation) (cf. 7.7.2.1) ;
- Une stratégie de protection par barrière physique (cf. 7.7.2.2) ;
- Des mesures d'urbanisme par l'acquisition ou la maîtrise foncière des terrains concernés par les impacts létaux induits par l'équipement en cas de séisme (cf. 7.7.2.3) ;
- Le déplacement de l'équipement vers un lieu réduisant les impacts létaux induits en cas de séisme et permettant de sortir l'équipement du périmètre de l'arrêté.

Le coût d'un traitement parasismique pourra être estimé par un chiffrage approximatif d'une reconstruction ou d'un remplacement des éléments visiblement trop "faibles" (ancrages, support, appareils, ...). L'exploitant pourra alors envisager la création de nouvelles BPAP comme alternative, en particulier si celles-ci proviennent d'équipements existants qu'une "simple" mise à niveau permet de rendre pertinents en cas de séisme, ou alors envisager la réalisation de mesures d'urbanisme (cf. § 3.1.4.b). Des chiffrages en ordre de grandeur (-30 % / +30 %) devront lui permettre d'éliminer les possibilités nettement défavorables et ainsi concentrer ses efforts sur la voie des solutions optimales.

7.2 Travail préliminaire (Étape 0)

Afin d'effectuer le diagnostic sismique d'une installation existante, il est nécessaire de posséder des données relatives à l'équipement, au génie civil de la structure supportant ou abritant l'équipement, aux fondations et aux caractéristiques géotechniques.

Les données d'entrée disponibles vont conditionner les méthodes de diagnostic pouvant être mises en œuvre. Généralement, plus la méthode mise en œuvre est complexe au niveau calculatoire, plus elle requiert de données d'entrée en termes de caractéristiques des sols, des matériaux, de masses, de raideurs et de géométrie. Les méthodes de diagnostic sans calcul requièrent une bonne connaissance du retour d'expérience du comportement sismique de l'équipement.

7.2.1 **Collecte des données sur l'équipement**

7.2.1.1 Données nécessaires a minima

Pour l'équipement objet du diagnostic, il convient de rassembler a minima les informations suivantes :

- **Données générales de l'équipement** : constitution, produit stocké
- **Limites de l'équipement et nature des interfaces** avec les équipements voisins dans le cas d'un équipement intégré dans un système.

- **Caractéristiques** de l'équipement : dimensions, épaisseurs, masse... ;
- **Positionnement** de l'équipement : au sol, dans une structure (hauteur, plan de pose, ...);

De façon générale, et tout particulièrement pour les épaisseurs qui varient dans le temps en fonction de la corrosion, les données doivent être garanties dans le temps par l'exploitant ; cette garantie d'épaisseur peut être apportée à partir des données constructeurs, du suivi réalisé de l'équipement, du calcul de la vitesse de corrosion, etc.

7.2.1.2 Données complémentaires nécessaires pour une « Vérification simplifiée (A2) »

Afin de mettre en œuvre la méthode de diagnostic par vérification simplifiée (Etape A2), les données complémentaires suivantes sont nécessaires :

- **Date de construction** de l'équipement
- **Retour d'expérience** sur le comportement d'équipements similaires : retour d'expérience post-sismique, d'études sismiques ou d'essais ;
- **Notes de dimensionnement au séisme** pour les installations en **zone 4 ou 5**.

7.2.1.3 Données complémentaires nécessaires pour un calcul (B2 ou B3)

Afin de mettre en œuvre la méthode de diagnostic par calcul (Etape B2 ou B3), les données complémentaires suivantes sont nécessaires :

- **Caractéristiques des matériaux** : module d'élasticité, limite élastique, allongement à la rupture...
- **Données d'exploitation** en service normal (et éventuellement en épreuve) : produit stocké ou transporté, pression, température...

7.2.1.4 Exemple de documentation

Dans le cadre de la collecte des données d'entrée, l'exploitant pourra se référer à la liste suivante de documents afin d'obtenir les informations répertoriées ci-dessus. Il s'agit d'une liste non-exhaustive fournie à titre informatif.

- Plans de chaudronnerie d'origine ;
- Plans de modification s'il y a lieu ;
- Fiches caractéristiques d'exploitation des équipements (pression, niveaux de service) ;
- Observations, photographies et mesures récentes témoignant de l'état actuel de l'équipement (corrosion...).
- Plans iso ;
- Notes de calcul de dimensionnement de l'équipement (pression, chargement thermique, vent, neige, séisme etc..).
- Normes utilisées à la conception et en service (CODAP, CODRES, tests ou normes éventuelles pour le transport des équipements fragiles...) ;
- Pièces constitutives du marché de réalisation

7.2.2 **Collecte des données sur la structure support**

7.2.2.1 Données nécessaires a minima

Il convient de connaître a minima les données suivantes sur la structure supportant l'équipement :

- **Date et typologie de construction** ;
- **Dimensions globales** ;
- **Dispositions constructives** ;
- **Ancrage** de l'équipement sur la structure : nature et quantité des points d'appui.
- **Masse** de l'équipement

7.2.2.2 Données complémentaires nécessaires pour un calcul (B2 ou B3)

Afin de mettre en œuvre la méthode de diagnostic par calcul (Etape B2 ou B3), les données complémentaires suivantes sont nécessaires :

- **Caractéristiques mécaniques** : ferrailage, type de profilés, résistance du béton, nuance d'acier...

7.2.2.3 Exemple de documentation

Dans le cadre de la collecte des données d'entrée, l'exploitant pourra se référer à la liste suivante de documents afin d'obtenir les informations répertoriées ci-dessus. Il s'agit d'une liste non-exhaustive fournie à titre informatif.

- Plans de construction (de préférence en version TQC) : coffrage et ferrailage pour les structures béton, plans de charpente pour les structures métalliques ;
- Plans de modification s'il y a lieu ;
- Plans de construction : coffrage et ferrailage pour les structures béton ;
- Plans de modification s'il y a lieu ;
- Notes de calcul de dimensionnement. Si possible, calculs de dimensionnement au vent ou de préférence au séisme ;
- Données de dimensionnement sismique éventuel (spectres de sol ou de plancher...) ;
- Normes et codes utilisés à la conception (BAEL, CM66, Eurocode...).
- Pièces constitutives du marché de réalisation

En l'absence d'information disponible, on recommande la mise en œuvre d'essais ou de relevés décrits au paragraphe 7.6.1.3. Cependant, en première approximation, il peut être fait référence aux règles de l'art en vigueur à la date de construction.

7.2.3 **Collecte des données sur les fondations**

7.2.3.1 Données nécessaires a minima

Les fondations sont généralement les éléments pour lesquels il est difficile d'obtenir les données d'entrée. Il est fréquent que les exploitants ne possèdent plus les plans d'origine et n'aient aucune connaissance sur la nature des fondations des équipements de leur installation. Cependant, dans le cadre d'un diagnostic sismique, le mode de fondation est un élément essentiel. Il est donc indispensable de connaître a minima les informations suivantes :

- **Nature** : semelles, pieux, radier commun...
- **Quantité et position** : profondeur, distribution en plan, ...

7.2.3.2 Données complémentaires pour un calcul

Afin de mettre en œuvre la méthode de diagnostic par calcul (Etape B2 ou B3), les données complémentaires suivantes sont nécessaires :

- **Caractéristiques géométriques** : dimensions en plan et hauteur pour les semelles, longueur et section pour les pieux...
- **Caractéristiques mécaniques** : résistance du béton, nuance d'acier, ferrailage...

7.2.3.3 Exemple de documentation

Dans le cadre de la collecte des données d'entrée, l'exploitant pourra se référer à la liste suivante de documents afin d'obtenir les informations répertoriées ci-dessus :

- Plans de fondation
- Notes de calcul de dimensionnement
- Documents liés à la construction : photographies, schémas, marché de passation...

7.2.3.4 Options en cas d'absence d'information

Si aucune information permettant de connaître la nature des fondations n'est disponible, il sera nécessaire de mettre en œuvre des procédés comme des ouvertures de fouilles stabilisées et étanchées permettant de découvrir les fondations.

Cependant, ces procédés devront être mis en œuvre avec précaution si cela est incontournable et pour les cas à fort enjeu. Ils devront être encadrés par un ingénieur spécialiste qui s'assurera que la fonctionnalité de la structure n'est pas affectée par ces travaux.

7.2.4 **Collecte des données de sol**

7.2.4.1 Paramètres nécessaires à l'établissement de la classe de sol

Afin de déterminer le spectre réglementaire pour le diagnostic sismique, il est impératif d'établir la classe de sol au sens de l'Eurocode 8 (cf. § 4.1.2), définie à partir du $v_{s,30}$, vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 mètres de couches superficielles du terrain

Il convient donc en théorie de connaître **la stratigraphie sur les 30 mètres de couches superficielles** du terrain au voisinage de l'équipement étudié, c'est-à-dire la hauteur et la nature des couches de terrain (rocher, sables, limons, argiles...) ou **a minima la stratigraphie jusqu'au rocher** si celui est situé à moins de 30m de profondeur.

En toute rigueur, afin d'établir la classe de sol, il est nécessaire de connaître les propriétés dynamiques pour **chaque couche de sol** de la stratigraphie :

- Vitesse des ondes de cisaillement v_s ;
- Ou module de cisaillement dynamique G_{dyn} .

A défaut de la connaissance de $v_{s,30}$, on pourra utiliser, en ayant recours à un géotechnicien, les paramètres suivants pour caractériser chaque couche de sol :

- la valeur des essais de pénétration N_{SPT} pour les sols sableux ;
- la cohésion c_u pour les sols argileux.

Pour les sites stables au sens de la NF EN 1998-1, le profil de vitesse v_s de propagation des ondes de cisaillement dans le sol doit être considéré comme le paramètre d'évaluation le plus fiable pour la détermination des caractéristiques de l'action sismique dépendantes du site.

Le profil de vitesse est déterminé in situ par des essais géophysiques (cross-hole, downhole, MASW ...). Dans les régions de sismicité modérée à forte (zones 3 à 5), en particulier pour les sites de classe D, S1, ou S2, ces mesures géophysiques sont fortement recommandées.

Pour les zones de sismicité très faible à modérée (zones 1 à 3) il est possible d'estimer le profil v_s par des corrélations empiriques, en utilisant la résistance à la pénétration in situ ou d'autres propriétés géotechniques, en tenant compte de la dispersion de telles corrélations. Ces estimations doivent impérativement s'appuyer sur l'expertise d'un géotechnicien.

Le tableau ci-dessous résume les paramètres nécessaires à l'établissement de la classe de sol en fonction de la zone sismique :

Paramètres de sol nécessaires à l'établissement de la classe de sol		
	Propriétés dynamiques (v_s , G_{dyn})	Résistance à la pénétration in situ
Zone 1	Facultatif	Suffisant
Zone 2	Facultatif	Suffisant
Zone 3	Recommandé	Acceptable
Zone 4	Indispensable	-
Zone 5	Indispensable	-

7.2.4.2 Paramètres nécessaires à la vérification des fondations

La vérification de la stabilité sismique des fondations nécessite la connaissance des **caractéristiques mécaniques et de résistance des sols** sur la **profondeur intéressée par la fondation** (de 1 à 2 fois la largeur de la fondation):

- cohésion non drainée c_u ;
- ou angle de frottement interne ϕ ;
- ou pression limite p_l ;
- ou résistance à la pénétration N_{SPT} ou N_{CPT} .

Il est également nécessaire de connaître le niveau de la **nappe phréatique**.

7.2.4.3 Type d'essais et caractéristiques de sol associées

L'industriel pourra se référer au tableau de l'Annexe A de la norme NF EN 1997-2 pour avoir une liste des résultats d'essai des normes d'essai géotechniques.

Le tableau ci-dessous présente une liste des études géotechniques typiquement pratiquées et les caractéristiques de sol qui en sont déduites :

Essais	Caractéristique de sol	Cadre d'utilisation des paramètres
Relevés géologiques et hydrogéologiques	- Stratigraphie - Position de la nappe phréatique	- Caractérisation du sol
Forages carottés	- Stratigraphie - Position de la nappe phréatique	- Caractérisation du sol
Essais d'identification en laboratoire à partir de carottage (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau, densité), essais triaxiaux	- Nature du matériau - Caractéristiques de résistance: Angle de frottement ϕ , Cohésion c_u	- Etude de capacité portante (stabilité des fondations)
Essai de pénétration standard (SPT)	- Résistance à la pénétration N_{SPT}	- Identification de la classe de sol (zone 1 à 3) - Etude de liquéfaction
Essai de pénétration au cône (CPT),	- Résistance à la pénétration N_{CPT}	- Identification de la classe de sol (zone 1 à 3) - Etude de liquéfaction - Etude de capacité portante (stabilité des fondations)
Essais pressiométriques	- Module pressiométrique E_M - Pression limite p_l	- Etude de capacité portante (stabilité des fondations)
Essais Cross-Hole, Down-hole ou MASW	Caractéristiques dynamiques : - Vitesse des ondes de cisaillement v_s - Module de cisaillement dynamique G_{dyn}	- Identification de la classe de sol - Etude de l'interaction sol-structure

Ce tableau peut servir de guide à l'exploitant dans le cadre de la collecte des données de sol.

7.2.4.4 Collecte de données de sol et prestations géotechniques éventuelles

Dans la phase de collecte des données de sol, l'exploitant veillera à rassembler le maximum de rapports d'étude de sol susceptibles de contenir les informations exposées ci-dessus.

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

- (1) l'exploitant dispose d'études de sol probantes dans la zone concernée. Ces documents d'entrée sont suffisants pour les études ;
- (2) l'exploitant dispose d'études de sol sur son site mais pas dans la zone concernée. Il faut alors se poser la question de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité du sol sur le site pour définir si les études existantes sont suffisantes et peuvent être utilisées ;
- (3) l'exploitant ne dispose pas d'études de sol ou dispose d'études de sol insuffisantes. Il est alors impératif de réaliser une **prestation géotechnique en amont de la visite** afin de connaître le type de stratigraphie et d'identifier la classe de sol.

Pour l'établissement de la classe de sol, certaines prestations géotechniques typiques peuvent être adaptées à la zone de sismicité comme suit :

Prestation géotechnique à réaliser en l'absence d'études de sol pour l'établissement de la classe de sol	
Zone 1	Essais de pénétration au cône (CPT)
Zone 2	Essais de pénétration au cône (CPT)
Zone 3	Essais de pénétration au cône (CPT)
Zone 4	Essais Cross-Hole, Down-hole ou MASW
Zone 5	Essais Cross-Hole, Down-hole ou MASW

Pour les autres prestations, l'industriel pourra se référer à l'Annexe B de la norme NF EN 1997-2 « Programmation des reconnaissances géotechniques ».

Il convient de déterminer les données géotechniques ou géologiques relatives au site en quantité suffisante pour permettre de déterminer un profil moyen du sol nécessaire à l'établissement de la classe de sol et évaluer les risques potentiels de liquéfaction.

L'étude de sol comprenant des essais in situ et/ou en laboratoire doit être réalisée au voisinage de l'ouvrage et doit permettre de caractériser les couches superficielles du terrain sur une profondeur suffisante pour évaluer la stabilité et la réponse sismique de l'ouvrage. Cette étude doit permettre de déterminer les propriétés statiques et dynamiques des couches de sol.

Il peut être avantageux d'inclure dans les reconnaissances de sol des essais de pénétration au cône (CPT), éventuellement avec des mesures de la pression interstitielle, chaque fois que cela est réalisable, car ces essais fournissent un enregistrement continu des caractéristiques mécaniques du sol en fonction de la profondeur.

Les essais et la présentation des rapports géotechniques doivent être réalisés selon les exigences de la norme NF EN 1997-2.

7.2.5 Collecte des données de retour d'expérience

Dans le cadre d'une justification d'équipements par la méthode de vérification simplifiée (Etape A2), il est nécessaire d'obtenir des données de retour d'expérience du comportement sismique d'équipement similaire.

Il convient de se référer aux paragraphes 5.3.2.1, 5.3.2.2 et 5.3.2.3 qui présentent le cadre pour l'utilisation, la base de données SQUG et les bases de données en France.

7.2.6 Préparation de la visite

Il convient de connaître avant la visite la liste des équipements (ERS, OAP et BPAP) et de leur exigence de comportement.

Avant la visite de reconnaissance, un examen systématique de la documentation relative aux équipements identifiés et d'une base de données de retour d'expérience, si elle est disponible, devra avoir été réalisé par l'équipe (cf. 7.3.1).

Il convient de préparer une description et un calendrier des tâches à effectuer au cours de la visite. Le parcours de l'équipe doit être soigneusement planifié et optimisé.

Après une première estimation basée sur la documentation disponible, la visite doit être organisée de manière à vérifier si les équipements étudiés sont représentés dans la base de données de retour d'expérience et, par conséquent, si la procédure simplifiée de diagnostic peut être appliquée à l'équipement en question.

7.3 Visite sur site et classement des équipements (Etape 1)

La visite sur site est l'une des tâches les plus critiques pour l'évaluation sismique des installations existantes. Elle permet la collecte de données sur les équipements « en l'état » et une première approche de l'évaluation de sa tenue au séisme.

Il est essentiel d'organiser et de conduire la visite de façon très méthodique. Les objectifs et la méthodologie à mettre en œuvre sont détaillés dans les paragraphes suivants.

7.3.1 Composition de l'équipe de reconnaissance

Une équipe de reconnaissance rassemble généralement les compétences suivantes (la composition doit être adaptée à la taille et complexité de l'installation) :

- génie parasismique
- sécurité des procédés et maîtrise des risques industriels ;
- instrumentation ;
- exploitation et maintenance du process.

Les ingénieurs en génie parasismique doivent justifier d'au moins quelques années d'expérience dans le domaine, de préférence dans le cadre d'installations industrielles.

Le niveau d'expertise de l'ingénieur en génie parasismique dépend de la complexité de l'installation et de la zone sismique.

L'ingénieur sécurité des procédés est indispensable pour le passage en revue des ERS, OAP, BPAP et leur mode de défaillance.

7.3.2 Objectifs de la visite

7.3.2.1 Observations globales

Passer en revue les équipements identifiés préalablement comme ERS, OAP ou BPAP afin de :

- Confirmer la liste des équipements, leurs fonctions requises, leurs modes de défaillance possibles ;
- Identifier tout autre équipement ERS, OAP ou BAP qui devrait être inclus dans la liste ;
- Déterminer l'emplacement de chaque équipement dans l'installation ;
- Regrouper les équipements intégrés ou reposant sur d'autres équipements ;
- Identifier les dispositions constructives simples à mettre en œuvre indépendamment de toute analyse ;

- Confirmer que la base de données de retour d'expérience est appropriée pour les équipements étudiés.

7.3.2.2 *Analyse et classement de chaque équipement*

Au niveau de chaque équipement plus spécifiquement, les objectifs principaux de la visite consistent à évaluer les points suivants :

- Caractéristiques de l'équipement et de la capacité de résistance inhérente au séisme ;
- Détermination du cheminement des efforts sismiques de l'équipement jusqu'aux fondations ;
- Ancrage de l'équipement ;
- Interaction mécanique, thermique ou autre avec d'autres équipements ;
- Etat actuel de l'équipement, notamment en comparaison avec les plans de construction (surtout lorsque l'évaluation est effectuée par des calculs sur la base des documents de construction) ;

A partir de cet examen visuel, chaque équipement doit être classé dans l'une des trois catégories A, B ou C telles que décrites au paragraphe 7.1.3.2.

Le classement se fera sur la base des documents d'entrée et du REX disponibles ainsi que sur l'inspection visuelle de l'équipement. Ce classement est principalement basé sur le jugement. Ainsi, il est essentiel que l'équipe de reconnaissance ait une expérience en conception parasismique et, s'il existe, une connaissance du retour d'expérience relatif au comportement sismique de ces équipements (cf 7.3.1).

Ce tableau présente de façon synthétique le mode de classement de l'équipement en fonction des observations lors de la visite et des données disponibles :

Guide pour le classement des équipements lors de la visite			
	Catégorie A	Catégorie B	Catégorie C
Définition	équipements dont le bon comportement sismique est facilement évaluable	incertitude sur le comportement sismique de l'équipement	l'équipement présente des insuffisances évidentes
Observations lors de la visite	Dispositions constructives adaptées : ancrage... (voir guides spécifiques) + Etat d'endommagement raisonnable + Compatibilité de l'équipement avec les données de REX (géométrie, matériau, masse, niveau de qualification...) + Absence d'interactions	Pas d'insuffisances évidentes pour le cheminement des efforts sismiques de l'équipement jusqu'aux fondations + Etat d'endommagement maîtrisé	Insuffisance du contreventement ou Insuffisance de l'ancrage ou Etat d'endommagement très avancé ou Autre insuffisance (voir guide spécifique)
Données disponibles	REX pertinent + Outils de diagnostic (Zones 2 et 3) + Notes de dimensionnement sismique (Zones 4 et 5) + Mode de fondation + Stratigraphie	Données existantes (une collecte de données complémentaires pourra être éventuellement nécessaire en fonction des méthodes appliquées)	

7.3.3 Points particuliers lors de la visite

7.3.3.1 Documentation

La visite doit être correctement documentée (notes, photographies, schémas...).

7.3.3.2 Insuffisances fréquemment observées

L'expérience des visites sur site montre qu'il est fréquemment relevé, sans que la liste ci-dessous soit exhaustive, des insuffisances soit en raison de la conception initiale soit liées au vieillissement, des éléments suivants :

- Ancrages des armoires électriques et de certains équipements mécaniques ;
- Murs de maçonnerie non armée ;
- Isolateurs des systèmes de distribution électrique ;
- Fondations et dispositions constructives des ouvrages de génie civil ;
- Tronçons courts de tuyauteries.

Une attention particulière devra donc être portée à ces éléments.

7.3.3.3 Identification des interactions entre équipements

La visite sur site de l'installation est l'outil clé pour identifier les interactions spatiales qui peuvent potentiellement affecter la performance de l'équipement en cas de séisme. Ces interactions peuvent être de plusieurs natures :

- chute d'un équipement sur un autre ;
- chute d'un équipement pouvant entraver l'accès des secours ou une zone devant rester accessible dans le cadre d'une stratégie de repli nécessitant une intervention humaine ;
- proximité trop importante d'équipements pouvant mener à un impact physique en cas de séisme.

Dans tous ces cas, l'OAP est l'équipement ou ouvrage agresseur.

La bonne pratique est de réduire au maximum les interactions potentielles en cas de séisme.

L'identification et l'évaluation des interactions potentielles exigent un bon jugement de l'équipe de reconnaissance. Seules les conditions qui représentent vraiment un danger grave d'interaction doivent être identifiées ou vont nécessiter une modification.

7.3.3.3.1 Chute

La chute d'un élément non-critique résultant de sa perte de stabilité peut amener cet élément à l'impact et l'endommagement d'un équipement critique de type ERS ou BPAP. Lorsque l'énergie de l'impact est significative et l'équipement critique vulnérable, une telle interaction peut conduire à une difficulté de démonstration du respect des exigences de comportement attribuées à l'équipement critique.

Par exemple, la chute d'un luminaire n'est peut-être pas une interaction critique pour la tenue d'une ligne de tuyauterie de 100 mm de diamètre mais peut l'être vis-à-vis d'une armoire électrique ouverte.

Les murs de maçonnerie non armée sont la source la plus fréquente des interactions par chute. Les murs de maçonnerie sont généralement assez proches des équipements critiques pour que leur défaillance puisse endommager l'équipement. Les murs pouvant endommager l'équipement qu'ils abritent et en bloquer l'accès doivent être renforcés.

Si le mur est proche d'armoires électriques ou de contrôle, la chute de la paroi pourrait entraîner des dommages aux armoires et à leur contenu.

Il convient en particulier d'examiner le risque de chutes de cheminées ou de torches en situation sismique et, lorsque le risque est avéré, d'examiner l'influence de la chute de ces équipements sur le comportement des éléments critique susceptibles d'être impactés.

7.3.3.3.2 Proximité

L'interaction de proximité est définie comme un état dans lequel deux éléments sont suffisamment proches pour que leurs déplacements sismiques se traduisent par un impact physique. Les impacts sur des cibles fragiles comme les relais électriques, les instruments ou les actionneurs de soupapes sont les plus préoccupants.

7.4 Diagnostic par vérification simplifiée (Etape A2)

La méthode dite de « Vérification simplifiée », s'appliquant aux équipements classés en Catégorie A à l'issue de la visite, permet de justifier le respect des exigences de comportement de l'équipement par une approche sans calcul. Si elle épargne le travail calculatoire, la mise en œuvre de cette

méthode requiert une documentation solide et une bonne connaissance du comportement sismique de ce type d'équipement.

L'évaluation du comportement sismique et la justification d'un équipement par cette méthode simplifiée se base sur les éléments suivants :

- Le **retour d'expérience (REX)** du comportement sismique ;
- Le respect des **dispositions constructives** ;
- L'application d'**outils simplifiés** ;
- L'étude des **notes de dimensionnement au séisme** de l'équipement ;

Il est rappelé que les éléments requis pour l'application de cette méthode de vérification simplifiée sont fonction de la zone sismique dans laquelle se situe l'installation, tel que décrit dans le tableau présenté au paragraphe 7.1.3.3.

La mise en œuvre de chaque élément de cette méthode est précisée dans les paragraphes suivants.

7.4.1 Utilisation du retour d'expérience

Pour justifier un équipement par la méthode simplifiée sans calcul, il est exigé pour toutes les zones de sismicité d'avoir un retour d'expérience positif sur le comportement sismique de ce type d'équipement dans des conditions sismiques au moins aussi importantes. Il peut s'agir de REX post-sismique, de REX issu d'études sismiques antérieures ou de REX d'essai d'équipements sur table vibrante.

Afin d'utiliser le REX comme élément de justification d'un équipement vis-à-vis du niveau de séisme réglementaire, l'exploitant devra démontrer la pertinence de ce REX pour son équipement à partir des données d'entrée sur l'équipement et de l'examen visuel lors de la visite. Le paragraphe 5.3.2.1 précise les conditions d'application de données de retour d'expérience à un équipement donné (similitudes en termes de géométrie, matériaux, masse, niveau de qualification).

Pour les bâtiments, lorsque les données collectées sont insuffisantes ou s'avèrent impossibles à obtenir, il est possible de s'appuyer, en développant une méthodologie appropriée, sur la classification donnée par une échelle d'intensité, telle l'échelle d'intensité macrosismique EMS98 (voir paragraphe 6.2.1.2); l'échelle d'intensité permet de relier les degrés de dommage attendus sous séisme à la typologie du bâtiment et à l'intensité sismique de la zone. Une méthodologie permettant l'utilisation de l'échelle d'intensité en zones 1 et 2 a été développée par l'AFPS ; une telle méthodologie n'existe pas actuellement pour les zones 3 et 4 un travail similaire serait à établir et à valider au préalable à l'utilisation de l'échelle EMS98. L'utilisation d'une échelle d'intensité requiert la connaissance de l'intensité de la zone sismique ; pour la période de retour de 3 000 ans, applicable aux installations existantes, le tableau suivant fournit cette information.

Zone de sismicité	1	2	*3	*4
Intensité macrosismique	VI	VII	VIII	IX

**l'utilisation de l'EMS est conditionnée par le développement d'un complément de méthode*

7.4.2 Respect des dispositions constructives

Dans le cadre de la construction parasismique, il existe des dispositions constructives particulières qu'il convient de respecter pour assurer un bon comportement sismique à l'équipement ou à la structure.

Il peut s'agir par exemple de :

- la bonne connexion entre éléments pour une ossature en éléments de béton préfabriqués ;
- la présence de butées latérales sur des racks et supports de tuyauteries.

Ces dispositions sont spécifiques à chaque type de d'équipement ou de structure support. Elles sont précisées dans les guides d'application spécifiques.

Pour justifier un équipement par la méthode simplifiée sans calcul, il est exigé pour toutes les zones de sismicité de démontrer à partir des données d'entrée et de l'examen visuel que l'équipement ou la structure respecte ces dispositions constructives.

7.4.3 Outils de diagnostic

Des outils de diagnostic ont été développés par des bureaux d'étude pour permettre le diagnostic rapide de certains équipements. Il s'agit généralement de feuilles de calcul Excel (feuille de diagnostic des réservoirs cylindriques verticaux (bacs) par exemple, feuille de calcul des tuyauteries...). Certains outils disponibles sont précisés dans les guides spécifiques aux équipements. L'exploitant pourra également développer de nouveaux outils en fonction de ses besoins.

Pour justifier un équipement d'une installation en zone de sismicité 2 et 3 par la méthode simplifiée sans calcul, la démonstration du respect des exigences de comportement à partir d'un de ces outils de diagnostic est exigée.

7.4.4 Analyse des notes de dimensionnement au séisme

Pour les installations en zone de sismicité moyenne et forte (4 et 5), pour appliquer la méthode de vérification sans calcul, il est exigé de démontrer que l'équipement ou la structure a été dimensionné au séisme à partir des notes de dimensionnement. Il convient de plus de vérifier par un examen de ces notes que le **niveau de séisme de dimensionnement est enveloppe du niveau réglementaire de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié et que ce dimensionnement est recevable eu égard aux méthodes et aux critères utilisés.**

7.5 Diagnostic par calcul simplifié (Étape B2)

La méthode de diagnostic par calcul simplifié s'applique :

- à tous les équipements de **Catégorie B** ;
- aux équipements de **Catégorie A** n'ayant pu être justifiés par la méthode de vérification simplifiée (Étape A2) et pour lesquels l'exploitant pense qu'il peut y avoir des marges si l'on procède à un calcul.

Le calcul simplifié est effectué **sur la base des données disponibles à ce stade**. Si ces données sont insuffisantes pour effectuer un calcul simplifié, alors, il convient de passer directement à une analyse approfondie (Étape B3).

Pour valider le diagnostic par calcul simplifié, il faut pouvoir démontrer grâce à ces calculs simples le respect des exigences de comportement de l'équipement ou de la structure.

Les méthodes d'évaluations simplifiées, à l'aide d'approches par des calculs analytiques simples ne sont pas développées dans ce guide. De telles méthodes s'appuient sur la connaissance de l'ingénieur. Ces méthodes basées sur la résistance des matériaux et la dynamique des structures font

partie des outils utiles aux évaluations préalables et aux recherches d'orientations préliminaires du diagnostic sismique de l'équipement.

Les efforts sismiques pourront être évalués simplement pour le niveau de séisme réglementaire par calculs « manuels » à partir de la masse et de la fréquence propre du système, issues des documents d'entrée. Pour certains équipements, il est également possible d'utiliser des formules simplifiées proposées dans les guides méthodologiques associés.

Il existe ensuite de nombreuses façons pour démontrer le respect des exigences de comportement de l'équipement en fonction des données disponibles. Par exemple :

- Si des notes de calculs de dimensionnement ou autres notes de calcul sont disponibles (séisme, vent...), on peut comparer les efforts induits par le séisme réglementaire avec les efforts de dimensionnement ;
- Il est possible d'estimer la capacité résistante des éléments structuraux à partir des données d'entrée tels que les plans ou des notes de calcul, ou bien à partir des observations lors de la visite.

7.6 Analyse approfondie (Étape B3)

Cette étape s'applique aux équipements ou structures initialement de **Catégorie A ou B** dont le diagnostic par les méthodes de vérification simplifiée ou par calcul simplifié n'a pas été concluant ou bien n'a pu être effectué en raison de manque de données d'entrée.

Le diagnostic de ces équipements demande la mise en œuvre d'une ou plusieurs de ces mesures :

- Recueil de données complémentaires ;
- Diagnostic par un calcul plus ou moins sophistiqué ;
- Diagnostic par essai.

L'exploitant devra juger des mesures à appliquer en fonction des raisons qui l'ont amené à mettre en œuvre une analyse approfondie pour cet équipement. Il n'y a de sens à mettre en œuvre cette méthode que dans les cas suivants :

- (1) Les données d'entrée sont insuffisantes pour établir un diagnostic par l'une des deux méthodes simplifiées ;
- (2) Le diagnostic établi par l'une des deux méthodes simplifiées est négatif mais il existe a priori des marges susceptibles de permettre la justification de l'équipement par une méthode plus sophistiquée de type calcul aux éléments finis ou essai.

7.6.1 Collecte d'informations complémentaires

7.6.1.1 Visite ciblée

La visite préalable ayant concerné l'ensemble des équipements à traiter du site, il peut être nécessaire de refaire une visite ciblée au niveau de l'équipement concerné par l'analyse approfondie pour effectuer une inspection plus détaillée.

7.6.1.2 Essais géotechniques complémentaires

Des essais géotechniques complémentaires peuvent être nécessaires dans plusieurs cas :

- si les études de sol collectées lors de la phase de travail préliminaire sont insuffisantes pour effectuer un diagnostic de l'équipement (vérification de la stabilité des fondations par exemple) ;
- s'il est souhaitable de déterminer des caractéristiques de sol complémentaires dans le cadre d'une étude avec prise en compte de l'interaction sol-structure par exemple.

Les essais à effectuer dans ce cas sont ceux mentionnés dans le paragraphe 7.2.4.

7.6.1.3 Essais mécaniques ou relevés

En l'absence de plans de charpente ou d'information sur la structure support, il existe des procédés de relevés ou d'essais en fonction des matériaux de construction :

- Pour des structures en acier, une prestation de relevé des dimensions des éléments structuraux, des ancrages et des assemblages est réalisable ;
- Pour le béton, des procédés non-destructifs de mesure de la résistance de la dureté de surface et de vitesse de propagation des ondes sonores permettent de déterminer une plage de variation de leur résistance, et, des procédés destructifs permettent de déterminer en laboratoire de manière certaine leur résistance sur des carottes ;
- Pour les armatures, des procédés non-destructifs de détection des armatures (« Ferroskan ») permettent de déterminer leur diamètre, espacement et profondeur, et, des procédés destructifs permettent leur relevé direct après dégagement du béton au marteau burineur.

7.6.1.4 Autres essais

En fonction de l'information recherchée et du type d'équipement d'autres essais peuvent être pertinents pour estimer le comportement sismique de l'ouvrage.

Pour un équipement plutôt monomodal, ou pour un équipement supporté sur une structure en acier (des racks par exemple), les premières fréquences propres du système et les déformées modales associées peuvent par exemple être estimées par des essais fréquentiels. Il s'agit d'instrumenter la structure et d'estimer son comportement dynamique par des mesures de sa réponse à des vibrations. Les sources de vibration peuvent être diverses (vibrations ambiantes (bruit), chute d'une masse à proximité...).

Il faut rester vigilant quant à l'utilisation de ce type de résultats puisque les fréquences mesurées correspondent au système réel avec ses éléments non-structuraux. Ces fréquences ne sont pas nécessairement représentatives du modèle structural applicable à la situation sismique.

7.6.2 Méthodes d'évaluation calculatoires

7.6.2.1 Principes des marges de capacité

Lorsqu'un ouvrage est dimensionné au séisme selon les codes et normes en vigueur, le principe des règles de dimensionnement fait que la structure possède des marges de capacité provenant :

- des coefficients appliqués sur les matériaux et les charges ;
- des valeurs sécuritaires de résistance des matériaux prises en compte et des critères associés ;
- des méthodes d'analyse, généralement linéaires.

Cependant, les marges ne sont, en général, ni quantifiées, ni uniformes pour les différents ouvrages et à l'intérieur d'un même ouvrage. Lorsque le comportement d'un ouvrage existant est évalué, il est nécessaire d'identifier les marges complémentaires pour permettre la justification du respect des exigences.

De plus, la plupart des structures ou équipements étudiés n'ont pas été conçus au séisme, ou peuvent avoir été dimensionnés pour un niveau de séisme inférieur au niveau réglementaire défini par l'arrêté. Ainsi, il est très probable que ces structures aient un comportement non-linéaire pour un séisme de niveau réglementaire.

Un comportement post-élastique conduit à la dissipation d'une partie de l'énergie dans la formation de zones plastiques. Dans ce cas, évaluer les efforts sismiques relatifs au séisme réglementaire en utilisant un calcul élastique amène à surestimer parfois significativement ces efforts, qui excèdent généralement la capacité ultime de la structure. Par conséquent, l'application d'une approche de dimensionnement élastique à une structure peut ne pas permettre de conclure à un diagnostic sismique positif.

En fonction du niveau d'exigence de comportement, il est admis dans le cadre du diagnostic sismique de faire appel, si c'est justifié par des dispositions constructives adéquates, à la ductilité de la structure, c'est-à-dire à sa capacité à se déformer au-delà de sa limite élastique. Si un comportement post-élastique est envisageable, la dissipation d'énergie liée à la formation des zones plastiques permet alors de réduire les efforts sismiques dans la structure en comparaison avec un calcul élastique. Les efforts calculés selon cette approche non-linéaire sont dits anélastiques.

L'appel à ductilité permet donc de dégager une certaine marge de capacité dans une structure qui n'avait pas été initialement dimensionnée pour un tel niveau d'agression sismique. L'approche du diagnostic consiste donc à évaluer cette marge de capacité et à estimer si elle est suffisante compte-tenu du niveau de la demande sismique anélastique.

7.6.2.2 Évaluation des marges de capacité

La prise en compte de ces marges de capacité peut se faire de plusieurs façons. En fonction de la marge à dégager pour justifier l'ouvrage, il pourra être utile de mettre en œuvre un ou plusieurs de ces principes :

- utiliser les **valeurs réalistes des caractéristiques mécaniques des matériaux** (résistance du béton, propriétés du sol et des **critères de vérification** associés ;
- prise en compte du **comportement non-linéaire de l'équipement ou de la structure** en estimant les déplacements du composant plutôt que les efforts ;
- intégration de l'**interaction sol-structure** avec éventuellement prise en compte d'un comportement non-linéaire du sol.

La prise en compte de ces principes peut permettre de dégager des marges de capacité importantes pour justifier un équipement ou une structure mais peut demander une quantité importante de données d'entrée.

Par exemple un calcul statique avec interaction sol-structure non-linéaire peut permettre de justifier des ouvrages dont la stabilité des fondations ne peut être démontrée par une approche linéaire, mais il demande de connaître un nombre important de paramètres de sol, et demandera certainement des études géotechniques complémentaires.

7.6.2.3 Types de calculs

Après la collecte éventuelle de données d'entrée complémentaires, l'évaluation du comportement sismique de l'équipement ou de la structure peut être effectuée par des calculs plus ou moins sophistiqués passant généralement par un modèle aux éléments finis. Ces calculs peuvent être plus ou moins sophistiqués en fonction du niveau de dimensionnement et des marges nécessaires pour pouvoir dédouaner l'équipement ou la structure.

Les types de calculs pouvant être réalisés sont :

- Calcul dynamique linéaire (modal-spectral) ;
- Calcul dynamique linéaire avec coefficients de comportement q ;
- Calcul statique équivalent ;
- Calcul statique linéaire avec interaction sol-structure ;
- Calcul statique non-linéaire (push over) ;

- Calcul statique non-linéaire avec interaction sol-structure non-linéaire ;
- Calcul transitoire linéaire ;
- Calcul transitoire linéaire avec interaction sol-structure ;
- Calcul transitoire non-linéaire.

Certaines de ces méthodes sont décrites en annexe de ce document.

7.6.3 Méthodes d'évaluation par essai

Enfin, il est possible de qualifier un équipement par des **essais** montrant qu'il satisfait dans les conditions de son utilisation aux exigences associées à des vibrations simulant un mouvement sismique au moins égal à celui correspondant au spectre réglementaire transféré.

Les accélérographes à utiliser pour ces essais devront être sélectionnés selon les exigences décrites au chapitre 4. En l'absence de moyen d'essais sismique adéquat, des essais de balayage sinus ou bruit blanc pourront être effectués.

En cas d'équipement reposant sur une structure support, il convient bien entendu de considérer le spectre transféré et non le spectre de sol comme action sismique de référence.

Les ancrages et la tenue de la structure support devront faire l'objet de vérifications particulières.

7.7 Mesures correctives (Étape C2)

Cette étape s'applique à l'ensemble des équipements ayant été identifiés comme ne satisfaisant pas aux exigences de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, c'est-à-dire :

- tous les équipements de **Catégorie C** ;
- les équipements de **Catégorie A et B** n'ayant pu être justifiés par les méthodes de vérification plus ou moins complexes (« Vérification simplifiée », « Calcul simplifié » ou « Analyse approfondie »).

Si un équipement ou une structure est non-conforme, il existe plusieurs options pour mettre en conformité l'équipement :

- la première stratégie consiste à **intervenir sur l'équipement ou la structure** même, par un traitement parasismique ou même son remplacement :
 - le **traitement parasismique** passe par le renforcement de l'équipement ou la structure au niveau des points faibles identifiés, ou par la mise en place de dispositifs parasismiques (cf. 7.7.1) ;
 - le **remplacement** de l'équipement par un équipement conforme est une solution radicale qui s'appliquera généralement aux équipements à l'état de vieillissement très avancé. Il conviendra alors de considérer le spectre réglementaire relatif aux équipements neufs pour justifier la conformité de ce nouvel équipement. On se référera au chapitre 5 pour les méthodes de dimensionnement applicables dans ce cas.

- la seconde option consiste à mettre en place une **stratégie de protection** afin de limiter les effets induits par l'équipement. Ces stratégies peuvent passer par :
 - une mise en sécurité de l'installation sur sollicitation sismique par instrumentation ou opération humaine (BPAP) (cf. 7.7.2.1) ;
 - la mise en place de **barrières physiques pertinentes** (BPAP) (cf. 7.7.2.2) ;
 - l'acquisition de la **maîtrise foncière** des terrains concernés par les impacts létaux induits par l'équipement en cas de séisme (cf. 7.7.2.3).

7.7.1 Traitement parasismique de l'équipement ou la structure

7.7.1.1 Équipements et structures à traiter

A la fin du diagnostic, la liste des équipements et structures non justifiés au séisme devra être établie. Cette liste devra inclure la nature et le degré des insuffisances établies. Cette information permettra d'établir, conjointement avec des considérations liées à la sûreté du site et des considérations économiques, les équipements devant être traités en priorité. Il convient ainsi d'établir un classement des mesures nécessaires selon leur degré de priorité.

7.7.1.2 Renforcements

Le dimensionnement des renforcements doit être effectué en conformité avec les normes en application pour l'équipement ou la structure étudiés pour le niveau de séisme réglementaire fixé par l'arrêté.

Les renforcements peuvent être conçus pour satisfaire les vérifications relatives aux normes appliquées pour la conception d'origine.

Il est recommandé de concevoir les renforcements avec une certaine marge vis-à-vis du niveau de séisme réglementaire pour couvrir tout effet falaise au-delà de ce niveau.

Les renforcements concerneront généralement les ancrages, la structure support ou les fondations. Les renforcements communément mis en œuvre dans le cadre d'un traitement parasismique sont les suivants :

- Ajout de contreventement par des tirants ou profilés métalliques ;
- Renforcement des liaisons entre éléments par des plaques ou cornières métalliques ;
- Renforcement d'éléments structuraux par tissus composites pour augmenter la résistance ou la capacité de déformation ;
- Ajout de boulons d'ancrage ;
- Mise en place de butées évitant les échappements d'appui ;
- Élargissement des semelles de fondation ;
- ...

7.7.1.3 Dispositifs parasismiques

Pour certains équipements ou certaines structures, il peut être envisagé de mettre en place des dispositifs parasismiques tels que des amortisseurs ou isolateurs. Ces mesures peuvent s'avérer lourdes à mettre en place et seront généralement réservées à des équipements ou structures importantes dans des installations situées en zone de sismicité moyenne à forte.

L'évaluation du comportement sismique et la justification de la conformité de l'équipement ou la structure prenant en compte des dispositifs parasismiques devront être effectuées selon les principes exposés au chapitre 5.

7.7.2 Stratégies de protection

7.7.2.1 Mise en sécurité de l'installation sur sollicitation sismique

La mise en œuvre de cette stratégie de protection fait l'objet d'un **guide spécifique « Mise en sécurité d'une installation sur sollicitation sismique »**.

La décision d'installer de tels équipements relève de la stratégie définie par l'exploitant en fonction du résultat d'une étude de risque propre au site concerné.

Cette stratégie consiste à limiter les conséquences par des actions engagées lors même de la survenue du séisme, soit :

- par une action de sectorisation des substances. La sectorisation étant réalisée lors de la survenue du séisme par action manuelle ou bien par action automatique en utilisant le mouvement même engendré par le séisme comme déclencheur de l'action. Cette sectorisation vise :
 - soit à ne relâcher que des quantités limitées de produits toxiques contenus dans le secteur ;
 - soit à agir sur ces inventaires pour leur appliquer un traitement particulier comme la vidange, la neutralisation... ou en retarder, diluer, réguler le relâchement.
- par action sur des facteurs de risques qui pourraient être déclenchés par le séisme :
 - prévention d'incendie, d'explosion par exemple par aspersion automatique ;
 - ouverture de trappes en cas de crainte d'accumulation d'hydrogène ou d'autres matières explosives non nécessairement toxiques mais dont l'explosion pourrait conduire – par destruction du procédé – au relâchement de produits cette fois-ci toxiques ;
 - isolement de fluide (gaz, hydrocarbure...).

7.7.2.2 Barrière physique

Dans certains cas, la seule option ou l'option la plus stratégique pour l'exploitant pour la mise en conformité d'un équipement est de prendre en compte une barrière physique contenant les effets induits par la non-étanchéité de l'ERS.

Dans ce cas, il convient de démontrer que cette BPAP est dimensionnée conformément au niveau de séisme réglementaire fixé par l'arrêté suivant les prescriptions des guides.

Le concept de barrière est largement développé dans le chapitre 3 de ce présent guide et notamment dans l'annexe B.

7.7.2.3 Mesure d'urbanisme

Une solution pour obtenir la conformité de l'équipement vis-à-vis de l'arrêté est d'acquérir la maîtrise foncière des terrains concernés par les impacts létaux induits par l'équipement en cas de séisme, afin de s'assurer que ces zones restent « sans occupation humaine permanente » au sens de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié.

ANNEXES

ANNEXE A TEXTES REGLEMENTAIRES

Textes relatifs au zonage sismique

- **Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010** relatif à la prévention du risque sismique
- **Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010** portant délimitation des zones de sismicité du territoire français

Textes relatifs au risque spécial

- **Arrêté du 4 octobre 2010** relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation
Section II : Dispositions relatives aux règles parasismiques applicables à certaines installations
- **Arrêté du 24 janvier 2011** fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées (modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010)
- **Arrêté du 13 septembre 2013** modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.
- **Arrêté du 5 mars 2014** définissant les modalités d'application du chapitre V du titre V du livre V du code de l'environnement et portant règlement de la sécurité des canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques.

Textes relatifs au risque normal

- **Arrêté du 22 octobre 2010** relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- **Arrêté du 19 juillet 2011** modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- **Projet d'arrêté « équipements »** de la classe dite « à risque normal »
- **Arrêté du 26 octobre 2011** relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal »

ANNEXE B CALCUL DES EFFETS DU SEISME / EXEMPLES DE SCENARI

SEISME PAR TYPE D'EQUIPEMENT ET BARRIERES ASSOCIEES

B.1 Modalités de calcul

Les paragraphes qui suivent donnent les conditions pratiques des calculs des effets des scenarii en cas de séisme.

D'une manière générale, les hypothèses techniques nécessaires aux calculs des effets seront prises en accord avec la circulaire du 10 mai 2010 et les seuils d'effets en accord avec l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005.

Cela concerne en particulier les conditions météorologiques telles, par exemple, les conditions atmosphériques à envisager pour les calculs de dispersion (§ D.3. de la circulaire) ou les conditions de rayonnement solaire pour les évaporations de flaques (§ E.2.1. de la circulaire).

B.1.1 Flux

Le calcul des effets doit tenir compte de l'ensemble des flux émis en cas de perte de confinement de l'équipement :

- libération immédiate de l'ensemble de l'encours de l'équipement en tenant compte d'éventuels changements d'état (flash à la décompression par exemple),
- flux induits par les éléments adjacents (alimentation de l'équipement après l'éventuelle vidange de l'en-cours et retour des équipements en aval). Au sujet des flux adjacents et des retours des équipements en aval, rappelons qu'un récipient mobile ou un véhicule de transport de produit raccordé à l'équipement étudié participe au calcul des effets en conservant son intégrité (cf § 3.1.2.d). Ceci signifie qu'il faut éventuellement tenir compte, pour l'évaluation des effets, des conséquences que l'équipement mobile induit indirectement.

En l'absence de barrière de protection, il convient de considérer le phénomène dangereux tel que prévu par l'étude de dangers pour le dimensionnement notamment des plans d'urgence externes (PPI en particulier).

B.1.2 Nappes de liquides

Il sera possible de considérer que l'expansion de la nappe liquide est limitée par un ouvrage de rétention si ce dernier peut être considéré comme une barrière pertinente en cas de séisme, les conditions que cet ouvrage doit alors satisfaire étant exposées dans les guides techniques concernés.

En l'absence d'une telle barrière, il pourra être tenu compte :

- de la géométrie du terrain,
- de la présence d'obstacles à l'écoulement ou de moyens permettant de canaliser l'écoulement (caniveaux, pipeways).

On considérera que ces éléments ne sont pas affectés par le séisme.

B.1.3 Inflammation de produits

L'approche suivante est à retenir :

1er cas : pour les liquides inflammables mis en œuvre ou stockés à une température inférieure à leur point éclair :

- si le point éclair est inférieur à 23°C : il est nécessaire de considérer les phénomènes d'incendie et d'UVCE ;
- si le point éclair est compris entre 23°C et 55°C : il est nécessaire de considérer les phénomènes d'incendie ;
- si le point éclair est supérieur à 55°C : les phénomènes d'incendie et d'UVCE ne sont pas à prendre en compte.

2ème cas : pour les liquides inflammables mis en œuvre ou stockés à une température supérieure à leur point éclair : Il est nécessaire de considérer les phénomènes d'incendie et d'UVCE.

L'inflammation des rejets gazeux inflammables générés doit être systématiquement considérée, sauf si le rejet se produit dans une zone exempte de toute source d'inflammation (rejet en hauteur par exemple).

B.2 Conditions générales prises en compte suite à un séisme**B.2.1 Contrôle commande**

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Perte du contrôle / commande Mise en arrêt d'urgence soit par l'opérateur, soit par perte de courant Mise en position de repli des actionneurs	Dysfonctionnement du fonctionnement des arrêts d'urgence à sécurité positive (le déclenchement d'un arrêt d'urgence par action manuelle relève du paragraphe B.2.2)

Si un contrôle/commande est identifié comme un élément d'une barrière de prévention, d'atténuation des effets ou de protection, il devra être conçu et réalisé selon les prescriptions du guide technique « Mise en repli sous sollicitation sismique ».

B.2.2 Action opérateur

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Indisponibilité de la salle de contrôle Accès difficile aux installations	

Si une intervention humaine est nécessaire à la protection parasismique, des dispositions devront être prises pour protéger les opérateurs (bâtiment les abritant résistant au séisme). Voir à ce sujet le chapitre barrières humaines (chapitre 0).

B.2.3 Intervention d'une astreinte pour effectuer des actions de mise en sécurité

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Accès au site impossible	

Si l'intervention d'une astreinte est nécessaire, une étude spécifique doit être menée.

B.2.4 Utilités

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Perte des utilités indispensable aux fonctions de sécurité nécessaires au respect de la présente réglementation	Perte partielle

Si une utilité est identifiée comme l'élément d'une barrière de prévention, d'atténuation des effets ou de protection, elle devra faire l'objet de mesures parasismiques.

En ce qui concerne les utilités nécessaires au contrôle commande, la conception « sécurité positive » permet de mettre en sécurité les installations touchées en cas de perte de la force électrique et/ou de l'air instrumentation.

B.2.5 Systèmes de détection de fuite

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Non fonctionnement de la détection	

Si un système de détection de fuite est identifié comme l'élément d'une barrière de prévention, d'atténuation des effets ou de protection, il devra être conçu et réalisé selon les prescriptions de l'état de l'art.

B.2.6 Système d'isolement (manuel ou automatique)

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Non fonctionnement des vannes nécessitant une source d'énergie Impossibilité d'une action manuelle	Non fonctionnement d'un organe d'isolement à sécurité positive Non fonctionnement (ou mouvement intempestif) d'une vanne manuelle Non fonctionnement d'un clapet anti retour s'ils répondent aux critères de tenue au séisme.

Si un organe d'isolement est identifié comme l'élément d'une barrière de prévention, d'atténuation des effets ou de protection, il devra être conçu et réalisé selon les prescriptions du guide technique "tuyauteries-robinetteries" pour sa partie mécanique. La partie contrôle commande, le cas échéant, devra être conçue et réalisée selon les prescriptions du guide technique "instrumentation".

Si un organe d'isolement identifié comme barrière de prévention, d'atténuation des effets ou de protection, nécessite de l'énergie ou des utilités, ces énergies ou utilités devront faire l'objet de mesures parasismiques.

Si une intervention humaine est nécessaire, des dispositions spécifiques devront être prises. Voir à ce sujet le chapitre barrières humaines (chapitre B.5.3).

B.2.7 Protection incendie

Potentiellement initié par un séisme	Situation non prise en compte
Perte de la protection incendie (scenarii incendie identifiés avec en plus manque de protection incendie)	
Stratégie de sous-cuvette inopérante	

B.3 Analyse équipement par équipement

B.3.1 Réservoirs de stockage de liquides inflammables (aériens cylindriques verticaux) et cuvettes (stockage à température ambiante)

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite en cuvette via tuyauteries associées Fuite en cuvette via brèche de fond ou de robe Renversement du réservoir Déchirement d'un toit fixe lié à une vague interne Rupture catastrophique : effet de vague Feu de réservoir à toit flottant ou écran flottant (produit à bas point éclair)	Feu de cuvette Flashfire pour les produits les plus volatils UVCE Inflammation de la surverse	Isolement du réservoir Cuvette Protection incendie	Explosion interne de réservoirs Feu de cuvette de produits à haut point éclair (supérieur à 55°C) Sur-remplissage / débordement ... Boil over Feu de bac pour réservoir à toit fixe

Rappel : Voir au paragraphe B 1.3 les phénomènes dangereux à étudier selon les points éclairés des liquides inflammables.

La tenue de la cuvette au séisme n'est pas demandée, si le bac et les tuyauteries restent intègres (ou si le bac reste intègre et les tuyauteries du bac peuvent être isolées).

La cuvette n'est jamais un équipement à risque spécial mais elle peut être éventuellement considérée comme une protection parasismique (si l'on ne recherche pas l'intégrité du réservoir).

Rupture catastrophique : à juger en fonction des REX (voir guide réservoir- Partie A). Ce type de rupture est rarement initié par un séisme.

On peut éventuellement baser la protection à la fois sur le bac (stabilité) et la cuvette (intégrité).

B.3.2 Réservoirs de stockage de liquides inflammables (autres types)

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite en cuvette via tuyauteries associées Fuite en cuvette via déchirure de l'enveloppe Renversement du réservoir	Feu de cuvette Flashfire pour les produits les plus volatils UVCE	Isolement du réservoir Cuvette Protection incendie	Explosion interne de réservoirs Surremplissage / débordement ... Feu de cuvette de produits à haut point éclair (supérieur à 55°C)

La tenue de la cuvette au séisme n'est pas demandée, si le bac et les tuyauteries restent intègres (ou si le bac reste intègre et les tuyauteries du bac peuvent être isolées).

B.3.3 Stockages de gaz inflammables liquéfiés sous pression (GIL)

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite de GIL via tuyauteries associées Fuite de GIL via bèche dans l'enveloppe Renversement du réservoir	Jet fire Flashfire UVCE Feu de cuvette BLEVE (sauf protection spécifique)	Isolement du réservoir Refroidissement Ignifuge	Non fonctionnement des soupapes Surremplissage / débordement ...

À noter qu'il est assez facile de démontrer la tenue de l'enveloppe aux sollicitations sismiques surtout pour des sphères. D'expérience on sait que le traitement parasismique se résout par le renforcement des contreventements.

Cas particulier du BLEVE

Le *BLEVE* (chaud) n'est pas à prendre en compte si la capacité de GIL est protégée thermiquement et si la protection thermique (talus par exemple) résiste aux accélérations sismiques.

Le *BLEVE* (froid) n'est pas à prendre en compte si l'enveloppe résiste aux contraintes sismiques.

B.3.4 Réservoirs de stockage de liquides toxiques (aériens cylindriques verticaux et autres types) et cuvettes

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite en cuvette via tuyauteries associées Fuite en cuvette via brèche de fond ou de robe (cylindriques verticaux) ou déchirure de l'enveloppe (autres) Renversement du réservoir (selon géométrie) Déchirement d'un toit fixe lié à une vague interne	Dispersion toxique	Isolement du réservoir Cuvette	

B.3.5 Stockages de produits pulvérulents en silos

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Perte de confinement via tuyauteries associées Perte de confinement via déchirure de l'enveloppe Renversement du silo (selon géométrie)	Explosion de poussières si poudre explosive et EMI atteinte	Isolement du silo Cuvette	

B.3.6 Stockages de gaz toxiques liquéfiés sous pression

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite de gaz via tuyauteries associées Fuite de gaz via bêche dans l'enveloppe Renversement du réservoir	Dispersion toxique	Isolement du réservoir	

B.3.7 Stockages de gaz d'air liquéfié

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite en cuvette via tuyauteries associées Fuite en cuvette via brèche de fond ou de robe (cylindriques verticaux) ou déchirure de l'enveloppe (autres) Renversement du réservoir (selon géométrie)	Dispersion	Isolement du réservoir Cuvette Mur	Non fonctionnement des soupapes Surremplissage / débordement ...

B.3.8 Pomperies et tuyauteries associées

Potentiellement initié par un séisme	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite	Isolement Cuvette	Non fonctionnement des organes d'isolement s'ils répondent aux critères de tenue au séisme.

Les phénomènes dangereux associés sont liés à la dangerosité du produit

B.3.9 Tuyauteries de transfert de produit

Potentiellement initié par un séisme	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite	Isolement	Non fonctionnement des organes d'isolement s'ils répondent aux critères de tenue au séisme.

B.3.10 Unités raffinage / pétrochimie / chimiques "chaudes"

Il s'agit principalement d'unités avec four ou chaudière, où un fluide est véhiculé à une température supérieure à sa température d'auto-inflammation ; dans ces conditions, la possibilité d'inflammation doit être prise en compte.

On associera à ce type de comportement le cas des gaz de très faible EMI, dont l'hydrogène, pour lesquels le rejet, même en dessous de la TAI, sera considéré comme pouvant s'enflammer.

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite	Embrasement généralisé systématique (donc pas d'effet toxique)	Isolement	Fuite non enflammée
Effondrement d'équipements	Jet fire éventuel		UVCE majeur car ignition immédiate via multiples sources d'inflammation

B.3.11 Unités raffinage / pétrochimie / chimiques "froides"

Il s'agit des unités mettant en œuvre un produit à une température comprise entre le point d'éclair et la TAI. Dans ces conditions, l'EMI ou des barrières techniques peuvent être prises en compte pour justifier l'absence d'inflammation du rejet en cas de séisme.

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuite (toxique et/ou inflammable) Effondrement d'équipements	Dispersion toxique Feu de nappe sur radier UVCE Jet fire Incendie	Isolement	Non fonctionnement des organes d'isolement s'ils répondent aux critères de tenue au séisme.

B.3.12 Postes de chargement / déchargement vrac

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Fuites aux bras de chargement / déchargement (toxique (cf. Ch.3 §3.1.3) et/ou inflammable (cf. §B.1.3)) Effondrement structure -> idem fuite	En fonction de la nature des produits Dispersion toxique (cf. Ch.3 §3.1.3) Feu de nappe sur radier UVCE Jet fire Incendie	Rétention Isolement	Renversement de véhicules -> assimilé à une fuite chargement / déchargement Perte de confinement directement sur le véhicule (ce n'est pas un équipement)

Les véhicules stationnés (vides ou pleins) ne sont pas des équipements, ils n'ont donc pas à être pris en compte directement (cf. § B.1.1).

B.3.13 Entrepôts / stockages de récipients mobiles

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Renversement de récipients mobiles (perte de confinement potentielle) Effondrement de rayonnage et chute des récipients mobiles (perte de confinement potentielle)	En fonction de la nature des produits : Dispersion toxique Feu de nappe dans le bâtiment UVCE Incendie		Selon résistance éventuelle de certains emballages la chute peut ne pas entraîner de perte de confinement
Effondrement du bâtiment entraînant une perte de confinement des récipients mobiles	Idem ci-dessus		

B.3.14 Bâtiments industriels, unités sous bâtiment

Potentiellement initié par un séisme	Phénomènes dangereux associés	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Effondrement Pertes de confinement associées aux équipements contenus	En fonction de la nature des produits : Dispersion toxique Feu de nappe dans le bâtiment UVCE Incendie		

B.4 Autres équipements pouvant être source d'agression

Le liste des équipements potentiellement source d'agression n'est pas exhaustive. Elle est donnée à titre indicatif.

B.4.1 Cheminées / Structures élevées / Fûts de torche

Potentiellement initié par un séisme	Barrières potentielles d'atténuation ou de protection	Non pris en compte
Effondrement		
Aggression sur d'autres équipements situés à proximité (1 x la hauteur comptée à partir du carneau)		

Ce ne sont pas des équipements à risque spécial, mais des sources d'agression à traiter au titre de la protection parasismique.

B.4.2 Grues / engins de travaux

Ce ne sont pas des équipements. De plus, la simultanéité d'événements n'est pas retenue.

B.5 Barrières

Les barrières sont typiquement de 3 types :

- Les barrières passives (rétentions,...),
- Les barrières actives notamment à base d'automatismes (instrumentation notamment),
- Les barrières humaines (action manuelle).

On peut éventuellement dans une barrière avoir une combinaison des deux derniers types (arrêt d'urgence déclenché manuellement).

D'une manière générale, il sera considéré que les barrières conformes aux critères énoncés par les divers guides techniques, ou dont l'efficacité en cas de séisme est démontrée par un raisonnement ad hoc de l'industriel, fonctionnent. Il ne sera jamais considéré le dysfonctionnement d'une telle barrière dans les scénarii "réduits".

B.5.1 Barrières passives

Les barrières passives nécessaires à la protection parasismique doivent être étudiées dans le cadre de l'étude sismique et selon les exigences de comportement retenues (cf. chapitre 5).

B.5.2 Barrières actives

Les barrières actives nécessaires à la protection parasismique doivent être étudiées dans le cadre de l'étude sismique et selon les exigences de comportement retenues qui, dans ce cas précis, est l'opérabilité (cf. chapitre 5).

Pour ce qui est des dispositifs d'isolement, il n'y a pas lieu d'ajouter en cas de séisme de délai particulier à leur mise en œuvre.

La perte des utilités (courant électrique et/ou air instrumentation) doit être envisagée en cas de séisme, sauf dispositions particulières adéquates.

Sinon, l'existence de matériels permettant la mise en repli automatique de l'équipement par manque d'utilité pourra être considérée globalement comme une barrière, dans la mesure où le fonctionnement de ces matériels en cas de séisme sera démontré (cf. guide instrumentation sismique).

B.5.3 Barrières humaines

La mise en œuvre de barrières humaines en matière de protection parasismique est possible sous réserve de respecter les critères suivants :

- Les points principaux de la fiche 7 (chapitre 1.1.7) de la circulaire du 10 mai 2010 doivent être appliqués et notamment les aspects disponibilité, cinétique d'intervention et maintien dans le temps de la barrière humaine ;
- Une analyse spécifique doit être menée pour vérifier que les aspects disponibilité et cinétique ne sont pas affectés par le séisme. Cela peut notamment impliquer une tenue au séisme des locaux où se trouvent le personnel, les moyens d'interventions etc... avec une sollicitation sismique basée sur le risque spécial.

Ces points devront être soigneusement étudiés et exposés dans l'étude séisme.

Le guide spécifique « Mise en repli sur sollicitation sismique » précise les conditions d'application de barrières humaines.

ANNEXE C GLOSSAIRE

C.1 Acronymes

AFPS	Association Française du Génie Parasismique
AS	Autorisation avec Servitude
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
ATEX	ATmosphère EXplosive
BAEL	Béton Armé aux États Limites (ancienne norme)
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
BPAP	Barrière de Prévention, d'Atténuation d'effets ou de Protection
CPT	Cone Penetration Test
CSEM	Centre Sismologique Euro-Méditerranéen
CST	Comité Scientifique et Technique
DCH	Ductilité de Classe Haute
DCL	Ductilité de Classe Limitée
DCM	Ductilité de Classe Moyenne
DOE	Department of Energy (USA)
EDD	Étude De Danger
ELS	Etat-Limite de Service
ELU	Etat-Limite Ultime
EMI	Energie Minimale d'Inflammation
ENS	Élément Non-Structural
ERC	Evènement Redouté Central
ERP	Etablissement Recevant du Public
ERS	Équipement à Risque Spécial
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GIL	Gaz Inflammable Liquéfié
GIP	Generic Implementation Procedure
GRV	Grands Récipients pour Vrac
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
ISS	Interaction Sol-Structure
MASW	Multichannel Analysis of Surface Waves
NGA	Next Generation Attenuation
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OAP	Ouvrage Agresseur Potentiel
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research center
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
REX	Retour d'EXpérience
RN	Risque Normal
RS	Risque Spécial
SETRA	Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SNCT	Syndicat National de la Chaudronnerie et Tuyauterie & Maintenance Industrielle

SPT	Standard Penetration Test
SQUG	Seismic Qualification Utility Group
TAI	Température d'Auto-Inflammation
TFC	Tissu de Fibres de Carbone (marque déposée)
TQC	Tel Que Construit
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion

C.2 Définitions

Absence d'interaction	Exigence de comportement qui a pour objectif d'éviter le choc entre des composants de l'installation proches les uns des autres. Elle se traduit par une exigence de limitation des déplacements de ces composants en fonction de leur distance de séparation les uns vis-à-vis des autres.
Accélérogramme	Signal donnant accélération du mouvement dû à un séisme en fonction du temps pour une direction donnée
Action	Cause des forces appliquées ou de déformations imposées à un ouvrage
Amortissement radiatif du sol	Phénomène de dissipation d'énergie due aux ondes transmises dans le sol par les vibrations des fondations d'un ouvrage
Barrière de Prévention, d'Atténuation ou de Protection (BPAP)	Ouvrage ou équipement dont la perte de fonctionnalité induirait, de façon indirecte, un phénomène dangereux conduisant à des effets létaux sur des zones à occupation humaine permanente (ex : dégâts dans la salle de commande ou blessures des opérateurs d'un ERS empêchant la mise en œuvre des procédures de sécurité, perte des moyens d'intervention ou d'extinction). La BPAP ne fait pas obligatoirement partie d'une installation classée.
Classe de sol	Catégorie définissant la nature du sol dans la norme NF EN 1998-1 en fonction des propriétés dynamiques des couches de sol sur les 30 premiers mètres. La classe de sol est nécessaire pour définir l'action sismique de calcul (spectre de sol réglementaire). Les classes vont de A (sol "dur") à E (sol "mou").
Coefficient de comportement	Coefficient utilisé pour les besoins du dimensionnement, qui réduit les forces obtenues par une analyse linéaire afin de tenir compte de la réponse non linéaire d'une structure. Ce coefficient est lié au matériau, au système structural et aux méthodes de dimensionnement.
Confinement	Exigence de comportement qui a pour objectif le maintien de la fonction passive d'étanchéité, permettant le maintien d'un produit (gaz, liquide, solide) dans un espace défini.
Diaphragme	Système de contreventement horizontal transférant les efforts latéraux aux systèmes de contreventement verticaux par cisaillement en plan. Le rôle de diaphragme est généralement joué par les planchers et/ou le toit dans un bâtiment et par le tablier dans un pont.
Dispositions constructives	Dispositions techniques à l'échelle des éléments structuraux qui concourent à la robustesse recherchée d'un ouvrage (par exemple: disposition locale de ferrailage pour le béton armé, adaptation des assemblages des éléments de charpente métallique...)

Ductilité	Capacité d'un élément structural à se déformer dans le domaine post-élastique des matériaux sans perte de sa capacité résistante
Durée de phase forte	Intervalle de temps pendant lequel le pourcentage de l'intensité d'Arias passe de 5% à 95% de sa valeur totale.
Effet de directivité du séisme	Augmentation de l'amplitude du mouvement du sol à faible fréquence dans la direction perpendiculaire à la direction de rupture sismique.
Effet P- δ	Effet du second ordre sur le moment dû à l'action d'un effort vertical sur une structure défléchie par l'action d'efforts horizontaux. Ces effets concernent les structures ou éléments élancés.
Efforts inertiels	Efforts dus à l'accélération des masses d'un ouvrage
Élément non structural	élément, système ou composant architectural, mécanique ou électrique, qui, faute de résistance ou à cause de la façon dont il est relié à la structure, n'est pas considéré comme élément transférant des efforts dans le dimensionnement sismique.
Équipement	Ensemble des matériels, accessoires associés à l'exercice de l'activité visée par la nomenclature concernée (machines de fabrication ou de transfert de fluide, les appareils de procédé, les réservoirs de stockage, les tuyauteries, accessoires de tuyauteries, réseaux, etc...)
Équipement à Risque Spécial (ERS)	Équipement qui génère de façon directe, en cas de séisme, un scénario menant au phénomène dangereux dont les conséquences relèvent du risque spécial défini par l'arrêté.
Fonction d'intercorrélation	Fonction permettant d'établir la corrélation entre deux accélérogrammes et d'établir leur indépendance statistique.
Installation existante	Installation non nouvelle
Installation nouvelle	Installation autorisée après le 1er janvier 2013
Interaction sol-structure	Modification du comportement d'une structure liée à la déformabilité du terrain sur lequel elle est fondée.
Isolation sismique	Principe de conception consistant à découpler la réponse de la superstructure de celle de l'infrastructure grâce à des dispositifs se déformant de façon importante sous l'effet du séisme. L'utilisation de tels dispositifs réduit les efforts sismiques mais augmentent considérablement les déplacements.
Magnitude	Mesure de l'énergie libérée par un séisme. On peut associer une magnitude à une zone de sismicité pour une période de retour donnée.
Magnitude de moment M_w	Magnitude calculée à partir de la surface de faille rompue et de la distance de glissement produit sur la faille. Donnée utilisée pour les études de risque de liquéfaction.
Magnitude d'ondes de surface M_s	Magnitude basée sur la mesure de l'amplitude maximale des ondes de surface à une période de 20 s. Utilisée dans le cadre de la méthode simplifiée d'étude de liquéfaction de l'Annexe B de la norme EN NF 1998-5.

Méthode de dimensionnement en capacité	Méthode de dimensionnement suivant laquelle certains éléments du système structural sont choisis, conçus et étudiés en détail de manière appropriée pour assurer la dissipation d'énergie sous l'effet de déformations importantes, alors que tous les autres éléments structuraux sont suffisamment résistants pour que les dispositions choisies pour dissiper l'énergie puissent être assurées.
Opérabilité	Exigence de comportement correspondant au maintien de l'accomplissement de la fonction associée à l'ouvrage ou à l'équipement
Ouvrage Agresseur Potentiel (OAP)	Ouvrage ou équipement pouvant être source d'agressions physiques externes (d'énergie cinétique suffisante) d'un ERS ou d'une BPAP (ex : chute d'une cheminée induisant l'endommagement d'un réservoir). L'OAP ne fait pas obligatoirement partie d'une installation classée.
Risque normal	Tout ce qui n'est pas du ressort du risque spécial
Risque spécial	Qui entre dans le périmètre de l'arrêté du 4 octobre 2010 - Section II
Site	Périmètre de la plateforme industrielle (voir fiche 1 B de la circulaire du 10 mai 2010)
Spectre de réponse	Courbe correspondant à l'amplitude maximale en fonction de la fréquence de la réponse d'oscillateurs simples pour un amortissement donné lorsqu'ils sont sollicités par le mouvement sismique
Spectre de sol	Spectre de réponse représentant le mouvement sismique au niveau du sol. Les spectres réglementaires sont des spectres de sol. Ils dépendent de la classe de sol et de la zone de sismicité.
Spectre transféré (ou spectre de plancher)	Spectre représentant le mouvement sismique à un point donné d'une structure lorsque celle-ci est soumise au mouvement sismique défini par un spectre de sol. Ces spectres sont utilisés pour le dimensionnement d'équipements sur des structures supports ou d'éléments non-structuraux.
Stabilité d'ensemble	Exigence de comportement attribuée au système principal de contreventement qui a pour objectif le non-effondrement ou le non basculement
Stabilité locale	Exigence de comportement qui a pour objectif le non-effondrement d'un ou plusieurs éléments
Structure dissipative	Structure capable de dissiper l'énergie par un comportement hystérétique ductile et/ou par d'autres mécanismes.
Supportage	Exigence de comportement qui exprime le fait que l'état de l'élément structural supportant des équipements est compatible avec le respect des exigences attribuées à ces équipements. Cette exigence implique la stabilité de l'élément structural concerné.
Unité dynamiquement indépendante	Structure ou partie d'une structure soumise directement au mouvement du sol et dont la réponse n'est pas influencée par la réponse d'unités ou de structures adjacentes.

Zone de sismicité	<p>Zone géographique associée à une accélération sismique du sol réglementaire fixée par l'arrêté du 4 octobre 2010 - Section II pour le risque spécial. La répartition du territoire français en cinq zones de sismicité croissante en fonction de la probabilité d'occurrence des séismes est définie par le décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 :</p> <ul style="list-style-type: none">- Zone de sismicité 1: très faible- Zone de sismicité 2: faible- Zone de sismicité 3: modérée- Zone de sismicité 4: moyenne- Zone de sismicité 5: forte
Zones dissipatives	<p>Parties prédéfinies d'une structure dissipative où est principalement localisée l'aptitude de la structure à dissiper l'énergie (appelées également zones critiques).</p>

ANNEXE D ANNEXES AU CHAPITRE 7

Méthodes de calculs

D.1 Méthode statique non-linéaire en poussée progressive (« push-over »)

Les méthodes de calculs non linéaires statiques de type « push-over » ou « en poussée progressive » peuvent être utiles dans le cas où les approches de type linéaire se révèlent trop enveloppes, notamment du point de vue des efforts sismiques.

Lorsqu'on effectue un calcul tenant compte des non-linéarités matérielles, les efforts dans les éléments et les connexions sont alors plafonnés, et il est alors plus pertinent d'adopter une approche en déplacement, ou en déformation qu'une approche en efforts ou en contraintes. Le but de la méthode en déplacement est de déterminer les déformations induites par le niveau de séisme réglementaire et de les comparer avec les limites de déformations. Cette analyse en chargements progressifs permet aussi de localiser les points successifs de plastification et les faiblesses potentielles locales de l'équipement ou de l'ouvrage pour ces chargements. Un exemple est l'analyse statique en poussée progressive (« push-over »).

Cependant, la méthode d'analyse en déplacement est généralement difficile à mettre en oeuvre car les pratiques et outils d'ingénierie (par exemple les normes, critères et des codes de calcul) sont orientés vers une analyse en contraintes.

D.2 Méthode statique non-linéaire équivalente par utilisation d'un coefficient de comportement

Une méthode simplifiée pour estimer les efforts anélastiques dans la structure est de réduire les efforts obtenus par un calcul élastique par un coefficient de comportement q . Le calcul élastique est généralement un calcul modal spectral ou un calcul statique équivalent.

Les **valeurs du coefficient de comportement q** , incluant également l'influence d'amortissements visqueux différents de 5 %, sont indiquées, pour divers matériaux et systèmes structuraux, selon divers niveaux de ductilité, dans les parties concernées de la NF EN 1998 ainsi que dans les **guides d'application spécifiques**.

Les valeurs du coefficient de comportement q peuvent être différentes dans les deux directions horizontales, bien que la classe de ductilité doive être la même dans toutes les directions.

La résistance et la capacité de dissipation d'énergie à conférer à la structure dépendent de la façon dont il est fait appel à son comportement non linéaire. En pratique, un tel arbitrage entre résistance et capacité de dissipation d'énergie est caractérisé par les valeurs du coefficient de comportement q et les classes de ductilité associées, données dans les parties concernées de l'EN 1998. Dans le cas limite des structures faiblement dissipatives, il n'est tenu compte pour la conception et le dimensionnement d'aucune dissipation d'énergie hystérétique, et le coefficient de comportement ne peut pas, en général, être pris supérieur à la valeur 1,5, considérée rendre compte des sur-résistances. Pour les bâtiments métalliques ou mixtes acier-béton, la valeur limite correspondante du coefficient q peut être prise entre 1,5 et 2.

L'ingénieur devra toujours justifier l'usage d'un coefficient de comportement en démontrant le caractère ductile de la structure étudié par l'étude des paramètres suivants :

- Dispositions constructives adéquates des armatures dans le béton ;
- Caractère ductile des connexions pour les structures métalliques ;

- Sur-résistance des matériaux de soudure par rapports à ceux des éléments soudés ;
- Fragilisation des tôles de réservoir ;
- Fragilité des ancrages ;
- Tout autre élément influençant la ductilité du système.

Dans le cadre du diagnostic, l'ingénieur pourra éventuellement utiliser un coefficient de comportement plus important mais la valeur devra être convenablement justifiée en démontrant le caractère particulièrement ductile du système.

D.3 Méthodes de calcul transitoire

Les méthodes de calcul transitoires, linéaires ou non-linéaires, peuvent être appliquées afin d'obtenir une meilleure estimation des efforts et permettre de dédouaner des équipements qui ne peuvent pas l'être par des méthodes plus simplifiées.

La méthode de calcul transitoire linéaire utilise un modèle dont les éléments constitutifs (filaires, surfaciques ou volumiques) ont des caractéristiques linéaires élastiques. Cette méthode peut être suffisante pour réaliser l'évaluation sismique de structures ou équipements existants dont la conception d'origine assure un dimensionnement satisfaisant par rapport aux sollicitations sismiques élastiques dérivant de l'aléa sismique utilisé en diagnostic.

Les sollicitations sismiques, obtenues à l'aide du modèle aux éléments finis de caractéristiques mécaniques élastiques linéaires, permettent de comparer les capacités de résistances ou de déformation des éléments de structure existants aux demandes théoriques d'efforts, ou de déformations appelés par le calcul sismique élastique. Les vérifications sont à mener pour l'ensemble des éléments de structure en tenant compte des fonctionnements spécifiques de ces éléments, en compression, traction, cisaillements, flexion et torsion.

Les vérifications des sections peuvent être faites selon les règles spécifiques. Quelques exemples : avec les critères des règles BAEL, NF EN 1998-3 pour les structures en béton armé, avec les critères des règles type CM66 ou EC3 pour les structures métalliques en acier.

La méthode transitoire linéaire peut convenir dans les diagnostics quantitatifs. L'inconvénient principal de ce type de méthode, bien adapté à la conception d'ouvrages ou équipements neufs, est qu'il ne permet de trouver qu'une approximation enveloppe des efforts sismiques réels. Cette surestimation des efforts est due au fait que le calcul sismique linéaire élastique néglige en général les comportements réels non-linéaires qui existent pour toutes les natures de matériaux.

La méthode de calcul transitoire non-linéaire peut être utile dans le cas où les analyses antérieures (par exemple linéaires ou non-linéaire de type push-over) ont mis en évidence des comportements non-linéaires liés à des phénomènes de contact ou encore liés à des non-linéarités localisées appelant un besoin de démonstration spécifique vis-à-vis des objectifs assignés à l'équipement ou à l'ouvrage.

Cette méthode, appliquée à des modèles simplifiés de comportement peut être utile à des démonstrations, ou à des études de sensibilités, vis-à-vis de problèmes non linéaires spécifiques. L'application à des modèles trop complexes peut devenir prohibitive du fait des volumes de calculs engendrés par les approches temporelles non linéaires. Ces volumes sont d'autre part conditionnés par l'utilisation d'un nombre d'accélérogrammes non corrélés (au moins 5 accélérogrammes, ce point apparaît par exemple dans le guide ASN/GUIDE/2/01) et par les besoins des post-traitements de ces réponses temporelles non-linéaires.

Les méthodes transitoires sont des méthodes sophistiquées qui sont lourdes à mettre en œuvre. Elles ne doivent être envisagées qu'en dernier recours si les méthodes simplifiées d'évaluation des marges de capacité ne permettent pas de justifier l'ouvrage mais que les critères de vérification ne sont excédés que modérément.