

RÈGLE N° I.2.d (7 mai 1982)

Tome I : Conception générale de la centrale et principes généraux applicables à l'ensemble de l'installation.

Chapitre 2 : Principes généraux relatifs à la protection contre les agressions externes.

Identification de la règle dans le chapitre : d.

OBJET : Prise en compte des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication.

Domaine d'application : Installations nucléaires de production d'énergie électrique comportant un réacteur à eau sous pression.

1. Objet de la règle

La pratique réglementaire française prévoit que des dispositions appropriées soient prises pour permettre le maintien du confinement des produits radioactifs, l'arrêt sûr du réacteur et le refroidissement à long terme du combustible dans toutes les situations considérées comme plausibles pouvant résulter du fonctionnement normal ou accidentel des installations voisines, y compris les voies de communication et, le cas échéant, les navires passant au large de la centrale.

La présente règle a pour objet de définir des méthodes permettant de déterminer les risques induits par les agressions potentielles dues à l'environnement industriel et aux voies de communication sur un site de centrale nucléaire de production d'énergie électrique comportant un réacteur à eau sous pression, afin de vérifier, au niveau de la conception, l'acceptabilité, vis-à-vis des risques précités, des hypothèses envisagées.

Le groupe permanent chargé des réacteurs nucléaires a été consulté pour l'élaboration de la présente règle.

2. Enoncé de la règle

Pour chaque site sont effectuées une identification et une évaluation des risques précisés en objet.

2.1. Identification des risques

a) Pour chaque site est effectuée une identification des installations industrielles et des voies de communication pouvant induire des risques sur les réacteurs nucléaires.

Seront considérés tant la situation existant au moment de l'examen que les projets de développement arrêtés ou d'une probabilité d'exécution jugée suffisante.

En outre, pour évaluer les risques plausibles qui seront pris en compte pour la conception, l'exploitant pourra tenir compte des modifications qui seront effectivement apportées à l'environnement, s'il apporte une preuve jugée suffisante que ces modifications seront réalisées avant la mise en service de l'installation.

A titre indicatif, une liste des installations industrielles et des voies de communication pouvant induire des risques sur les réacteurs nucléaires est présentée ci-après :

- zones, équipements industriels ou installations portuaires où peuvent se trouver :
 - installations pétrolières et pétrochimiques ;
 - installations chimiques ;
 - installations gazières ;
 - oléoducs, gazoducs et autres canalisations de transport de matières et produits dangereux tels que définis en 2.1 b ci-dessous ;
 - installations de fabrication et de stockage de substances explosives, toxiques ou corrosives, installations susceptibles d'engendrer de telles substances dans des circonstances accidentelles ;
- installations industrielles ou militaires nécessitant le transport ou le stockage de substances explosives, toxiques ou corrosives et de produits susceptibles d'engendrer de telles substances dans des circonstances accidentelles ; voies de communication terrestres, telles que routes, chemins de fer, gares de triage ;

- voies de navigation intérieures : chenaux, canaux et fleuves ;
- voies maritimes ;

b) En ce qui concerne les installations industrielles concernées, seront répertoriés les matières et produits réputés dangereux, leurs quantités maximales, ainsi que les plus courtes distances entre chacune de ces masses de matières et produits dangereux et chaque « cible » à protéger au sens du paragraphe 2.3. De plus, pour ce qui est des voies de communication, sera répertoriée la fréquence de passages pour chaque type de transport, par classes de tonnage et de matières et produits dangereux.

A titre indicatif, une liste des matières et produits réputés dangereux est présentée ci-après :

- les hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ;
 - certains produits chimiques et pétrochimiques ;
 - les explosifs ;
 - les produits nocifs pour les personnes et pour les matériels ;
 - les substances qui sont fabriquées, transportées, stockées au voisinage les unes des autres et dont les interactions (accidentelles) sont susceptibles d'engendrer des substances inflammables, explosibles, toxiques ou corrosives;
- c) Les risques à étudier sont ceux liés aux cinq catégories d'agression suivantes :
- l'élévation anormale de température due à un incendie extérieur au site ;
 - l'onde de pression aérienne due à une explosion ;
 - l'onde sismique associée à une explosion ;
 - les nappes ou nuages dérivants de gaz toxiques ou corrosifs et des gaz et fumées résultant d'un incendie ;
- d) Trois familles de sources d'agressions potentielles sont distinguées :
- les installations industrielles fixes telles que stockages et unités de production;
 - les canalisations de transport telles que les gazoducs ;
 - les trafics routier, ferroviaire, fluvial et maritime.

2.2. *Evaluation des risques et dispositions constructives*

Pour chaque site et chaque famille, est effectuée, dans la mesure où les informations statistiques existent et sont représentatives, une évaluation de la probabilité des effets de chaque catégorie d'agression définie ci-dessus en 2.1 c. Dans le cas où les informations statistiques ne sont pas suffisamment représentatives, une valeur enveloppe de la probabilité sera prise en compte. L'évaluation des risques comportera également des éléments déterministes tels que ceux mentionnés ci-après.

2.2.1. En ce qui concerne l'élévation de température due à un incendie, la méthode prendra en compte de façon déterministe, en particulier, l'aire réelle de la nappe en feu, sa vitesse de régression, la hauteur des flammes, les puissances surfacique et rayonnée par la flamme et incidente sur chaque « cible » à protéger au sens du paragraphe 2.3.

En outre seront examinés les points suivants :

- possibilités d'écoulement de l'extérieur vers le site de nappes de liquides inflammables ou en feu ;
- effets du rayonnement des flammes sur les bâtiments, stockages divers et matériels électriques ; existence de « relais de feu » ;
- possibilités de « tempête de feu », due aux vents violents induits par les grands incendies, en particulier d'hydrocarbures ;
- effets des fumées et gaz émis sur les équipements (en particulier effets de dépôts de carbone, de la corrosion par l'anhydride sulfureux) et sur les personnels (risque d'intoxication par l'oxyde de carbone ou d'autres gaz produits).

2.2.2. En ce qui concerne l'effet de l'onde de pression aérienne due à une explosion, seront pris en compte - en tant que de besoin - les probabilités des événements initiateurs et des conditions météorologiques, la formation et la dérive des nappes ou nuages de gaz explosibles, la notion d'explosion de trinitrotoluène

(TNT) équivalente à l'explosion de la masse de gaz ou de vapeurs se trouvant dans leurs limites d'inflammabilité avec l'air, l'atténuation avec la distance de l'onde de pression et les effets de l'interaction entre l'onde de champ libre et divers obstacles tels que des bâtiments voisins susceptibles de renforcer localement l'agression sur chaque « cible ».

L'exploitant devra vérifier la tenue des bâtiments abritant les structures et équipements nécessaires aux trois fonctions de sûreté définies en 2.3 et en particulier la tenue des ouvertures (accès et ventilations).

Le maintien de ces fonctions de sûreté doit rester assuré lorsque les bâtiments concernés sont soumis à une onde de surpression incidente dont les caractéristiques sont enveloppes de celles de toutes les ondes de surpression incidentes plausibles.

Cette onde enveloppe sera telle que la probabilité d'occurrence d'une onde de surpression incidente de caractéristiques plus sévères sera compatible avec l'objectif défini en 2.4.

Sera retenue par convention dans tous les cas *a minima* comme une agression plausible l'onde de surpression aérienne incidente de forme triangulaire et à front raide dite onde de référence et ayant les caractéristiques suivantes :

- valeur maximale de la surpression : 0,05 bar ;
- durée de la surpression : 0,3 s.

Est jugée comme valant conformité avec la pratique réglementaire technique française, la conception des bâtiments et structures de génie civil nécessaire aux trois fonctions de sûreté définies en 2.3 effectuée avec les hypothèses suivantes :

a) L'onde incidente de surpression en champ libre prise en compte est la plus pénalisante des ondes de surpression aériennes suivantes :

- onde de surpression de référence ;
- onde de surpression incidente dont les caractéristiques sont enveloppes de celles de toutes les ondes de surpression incidentes plausibles ;

b) Le chargement à prendre en compte sur les parois doit tenir compte des réflexions et des focalisations, sans privilégier aucune direction horizontale pour l'onde de surpression de référence.

La valeur maximale de la surpression appliquée sur les parois verticales et sur les toitures exposées aux réflexions dues à d'autres bâtiments plus élevés est prise forfaitairement, égale respectivement à 2 fois et à 1,5 fois la valeur maximale de la surpression de l'onde incidente.

La durée de la surpression appliquée sur les parois verticales est prise forfaitairement au moins égale à la moitié de la durée de la surpression de l'onde incidente.

L'exploitant peut prendre la durée de la surpression appliquée sur les toitures exposées aux réflexions dues à d'autres bâtiments plus élevés égale à la durée de la surpression de l'onde incidente.

Des coefficients de focalisation doivent être évalués dans les configurations géométriques significatives pour les problèmes de réflexions multiples ;

c) Les déformations limites admissibles doivent être compatibles avec celles définies dans les règles de calcul du béton armé aux états limites (version 1980).

2.2.3. En ce qui concerne l'effet de l'onde sismique associée à une explosion donnée, seront prises en compte de manière déterministe, en particulier, les atténuations, avec la distance entre le lieu de l'explosion et chaque « cible », des pics d'accélération horizontale et verticale, en tenant compte de la vitesse sismique des terrains. Ces pics seront comparés aux accélérations maximales acceptables résultant du dimensionnement envisagé par ailleurs par l'exploitant vis-à-vis des séismes.

2.2.4. En ce qui concerne l'impact de projectiles engendrés par une explosion, seront prises en compte la probabilité d'impact sur chaque « cible » et, de façon déterministe, la résistance de la cible à l'impact.

L'exploitant examinera les effets des ondes sismiques associées à une explosion, ainsi que ceux des projectiles éventuellement engendrés, en vue de vérifier que les trois fonctions de sûreté définies en 2.3 sont remplies

dans les conditions précisées en 2.4.

2.2.5. En ce qui concerne les effets de nappes dérivantes de gaz toxiques ou corrosifs et des gaz et fumées résultant d'un incendie, seront prises en compte - en tant que de besoin - les probabilités des événements initiateurs et des conditions météorologiques et, de façon déterministe, la dispersion atmosphérique et l'évaluation de l'efficacité par rapport à cette agression des dispositions prévues par ailleurs pour le fonctionnement normal (par exemple pour le maintien de la fiabilité des équipements de sûreté vis-à-vis de la pollution atmosphérique en zone industrielle) et pour des événements accidentels (par exemple un rejet non concerté de produits radioactifs par une tranche voisine).

Dans le cas de produits toxiques, des dispositions complémentaires à celles adoptées pour les tranches standardisées doivent être prises si un tel événement est susceptible de se produire avec une probabilité non compatible avec l'objectif défini en 2.4, une fois prise en compte l'efficacité des dispositions prévues à rencontre d'autres situations accidentelles dans les tranches standardisées.

Dans le cas de produits corrosifs, l'exploitant devra vérifier que les dispositions standardisées de conception et, en tant que de besoin, les dispositions complémentaires prises pour garantir la fiabilité des équipements importants pour la sûreté vis-à-vis notamment des intempéries et de la pollution atmosphérique, sont suffisantes pour éviter la mise en défaut de ces équipements, à court, moyen et long terme, à la suite de l'envahissement occasionnel plausible du site par une nappe ou un nuage de gaz corrosif.

2.2.6. En annexe n° 2 à la présente règle sont exposées quelques pratiques actuelles relatives, d'une part, à l'évaluation de la valeur maximale de la surpression de l'onde incidente en champ libre résultant d'une explosion, et, d'autre part, aux problèmes liés à la dérive de nuages ou nappes de gaz, en particulier inflammables. Ces pratiques sont considérées comme acceptables par le Service central de sûreté des installations nucléaires.

2.3. Définition de la cible

On considère comme « cibles » à protéger, l'ensemble des bâtiments, structures et équipements nécessaires aux trois « fonctions de sûreté » suivantes, définies pour les besoins de la présente règle :

- arrêt du réacteur et évacuation de la puissance résiduelle ;
- stockage du combustible usé ;
- traitement et confinement des effluents radioactifs.

Quand il n'est pas possible d'étudier les conséquences de l'agression sur une portion de « cible », on prend en compte - par conservatisme - le bâtiment qui l'abrite.

2.4. Objectif probabiliste

L'ordre de grandeur (¹¹³) de la probabilité limite pour accepter l'éventualité d'un dégagement inacceptable de substances radioactives à la limite du site, pour chacune des fonctions de sûreté définies ci-dessus, est de :

$10^{-6}/(\text{an} \times \text{tranche})$ pour l'ensemble des agressions d'origine extérieure liées aux activités humaines.

Toutefois, pour tenir compte de la sommation nécessaire des probabilités d'accidents d'origine différente aux conséquences analogues, on se fixe, pour chaque famille de sources d'agressions considérée en 2.1 d, un ordre de grandeur (¹¹³) limite de la probabilité d'occurrence de l'événement, pour chacune des fonctions de sûreté définies en 2.3, de $10^{-7}/(\text{an} \times \text{tranche})$.

2.5. Conception de l'installation vis-à-vis des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication

Avant toute décision irréversible, il est vérifié que l'installation est suffisamment protégée contre les risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication, c'est-à-dire que les trois fonctions de sûreté définies en 2.3 sont assurées, lorsque l'installation est soumise à une agression parmi celles énumérées en

¹¹³ Comme il est d'usage, il s'agit ici de l'ordre de grandeur logarithmique.

2.1 c considérée comme suffisamment plausible à l'égard de l'objectif défini en 2.4.

Lorsque tel n'est pas le cas, l'exploitant soumet à l'administration des dispositions constructives appropriées pour protéger l'installation contre la ou les catégories d'agressions concernées.

3. Commentaires

Les centrales du programme nucléaire français sont conçues pour la plupart de façon standardisée, afin de bénéficier dans un grand nombre de domaines, y compris celui de la sûreté nucléaire, d'un certain effet de continuité.

La conception de ces tranches standardisées prend en compte un certain nombre d'événements accidentels, dont quelques-uns concernent la présente règle de sûreté.

Les dispositions prévues en 2.5 visent à s'assurer que la conception des centrales standardisées est suffisante pour les agressions qu'il y a lieu de prendre en compte pour un site considéré. Les paragraphes 3.1 à 3.8 ci-après complètent les dispositions du chapitre 2.

Le caractère partiel des connaissances actuelles, d'origine essentiellement expérimentale, en matière de risques industriels, rend inévitable le recours aux différentes étapes des procédures réglementaires en vigueur, à des jugements d'experts pour préciser certaines des hypothèses à prendre en compte.

3.1. *Dérive vers le site de nappes ou de nuages de gaz*

Ce paragraphe concerne les gaz inflammables, en particulier le gaz naturel, les propanes et butanes commerciaux et l'éthylène, les gaz toxiques comme le chlore et les gaz corrosifs.

L'événement initiateur le plus sévère peut être la rupture d'un réservoir ou d'une canalisation, le gaz étant souvent à l'origine liquéfié par augmentation de la pression ou par une diminution de la température.

Le débit de gaz émis en fonction du temps après la rupture doit être évalué dans le sens de la sûreté : ce débit constitue le terme source qui sera utilisé dans un modèle de dispersion atmosphérique présentant des marges suffisantes de conservatisme pour une telle application.

3.2. *Incendies*

En France, les tranches nucléaires standardisées comportant un réacteur à eau sous pression ne sont pas conçues de manière spécifique vis-à-vis des risques induits par les incendies extérieurs au site. Des dispositions particulières appropriées devront donc être prises, en tant que de besoin, par l'exploitant.

3.3. *Explosions*

Dans le cas de dérive de nappes ou de nuages de produits inflammables, cette dérive déplace le point potentiel d'initiation de l'explosion par rapport à la centrale, cet aspect pouvant être probabilisé par la prise en compte des conditions météorologiques propres au site.

En ce qui concerne les dispositions de construction prises pour assurer la résistance des bâtiments vis-à-vis des effets de l'onde de surpression, il convient de préciser que les déformations limites admissibles définies dans les règles de calcul du béton armé aux états limites dans la version 1980 sont :

- 0,35 % pour le béton;
- 1 % pour les aciers.

Les règles de conception des structures métalliques, ouvertures et ventilations, et notamment les déformations limites admissibles, seront précisées dans une révision ultérieure de la présente règle.

3.4. *Onde sismique associée à une explosion*

Il est à noter que les dispositions de construction prises vis-à-vis des séismes en application de la règle fondamentale de sûreté n° \ I.c, s'appliquant à des bâtiments, structures et équipements nécessaires aux trois fonctions de sûreté ci-dessus, sont en général estimées suffisantes pour la protection contre l'effet des ondes sismiques associées aux explosions considérées dans la présente règle de sûreté.

3.5. *Projectiles engendrés par une explosion*

Les dispositions de construction des bâtiments prises vis-à-vis du risque de chute d'aéronefs de l'aviation générale, qui fait l'objet de la règle fondamentale de sûreté n° 1.2.a, sont en général estimées suffisantes pour la protection contre l'effet des projectiles engendrés par les explosions considérées dans la présente règle.

3.6. Produits toxiques

Dans le cas de dérive de nappes ou de nuages de produits toxiques dégagés dans l'atmosphère par rupture de leur confinement ou produits par réaction chimique y compris la combustion, le risque est lié à l'envahissement du site par une nappe ou un nuage dont la concentration en gaz ou en fumées est suffisante pour conduire à la réduction des capacités du personnel nécessaire à la sûreté de la tranche nucléaire.

3.7. Evaluation probabiliste

Au plan pratique, la probabilité d'un dégagement inacceptable de substances radioactives à la suite d'une agression pourra être évaluée comme suit :

On évalue la probabilité d'occurrence P_1 de l'agression sur les bâtiments concernés, la probabilité P_2 qu'à la suite de l'agression la fonction de sûreté ne soit plus garantie, la probabilité P_3 pour qu'il en résulte un dégagement inacceptable de substances radioactives à la limite du site.

On a :

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3$$

a) L'évaluation de P_1 repose sur une approche mixte contenant des éléments probabilistes et des éléments déterministes.

Les éléments probabilistes sont relatifs aux événements initiateurs (par exemple probabilités d'accidents conduisant à un incendie ou à une explosion sur chacune des voies de communication concernées), pour lesquels on dispose de données statistiques suffisantes, données qui doivent pouvoir être exploitées, de manière sûre, pour des prévisions dans l'avenir proche en tenant compte notamment :

- de la taille des bases statistiques historiques ;
- de l'évolution des grandeurs des composants ;
- des changements technologiques ;
- des modifications des conditions de trafic.

Dans les éléments probabilistes entrent également les statistiques météorologiques annuelles établies sur la base de plusieurs années complètes de mesures ; les données concernées ici sont la vitesse et la direction du vent, ainsi que la classe de stabilité associée, qui gouvernent en particulier la dérive des nuages de gaz, donc l'évolution des quantités explosibles et influent de ce fait sur l'amplitude des ondes de surpression.

Conformément au paragraphe 2.2 ci-dessus, l'estimation de P_1 sera effectuée à partir d'éléments déterministes conservatifs dans le cas où les données statistiques ne sont pas suffisantes ;

b) La détermination de P_2 repose, en général, sur les bases suivantes :

- si le bâtiment abritant la fonction de sûreté résiste à l'effet de l'agression (par exemple au flux de chaleur dû à un incendie ou à la surpression incidente résultant d'une explosion) : $P_2 = 0$ donc $P = 0$;
- dans le cas contraire :
 - pour les circuits de sûreté :
 - si le circuit n'est pas redondant et si la dispersion géographique est insuffisante eu égard aux dimensions des effets de l'agression : $P_2 = 1$;
 - sinon, on essaie de quantifier P_2 en faisant appel, le cas échéant, à des techniques fiabilistes ;
 - pour les équipements stockant ou confinant des produits radioactifs : $P_2 = 1$;

c) La valeur P_3 est prise égale à 1 quand elle est difficilement quantifiable. Pour la piscine de stockage du combustible, l'étude de la radioactivité libérale en fonction du temps de stockage pourra permettre d'approcher de façon plus précise la valeur des rejets probables. De même, très généralement, pour les circuits de traitement d'effluents liquides et gazeux, l'étude des conséquences radiologiques potentielles

pourra montrer le caractère acceptable des rejets et la valeur adoptée pour le terme P_3 sera alors nulle.

3.8. Evolution de l'environnement

Quand sur un site particulier des évolutions de l'environnement industriel ou concernant les voies de communication sont prévues, ayant pour conséquences des modifications d'ordre de grandeur des probabilités précédentes, il devra en être tenu compte lors de l'examen de compatibilité de la tranche prévue avec son environnement.

Si par contre des évolutions interviennent alors que l'installation a déjà fait l'objet d'une autorisation de création, une nouvelle évaluation des probabilités devra être présentée par l'exploitant au Service central de sûreté des installations nucléaires avec, en tant que de besoin, la description des dispositions complémentaires projetées ainsi que les justificatifs correspondants.

ANNEXE N° 1

Plan de principe des règles fondamentales de sûreté.

Tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression.

(Pour mémoire)

ANNEXE N° 2

Exemples de pratiques considérées comme acceptables par le Service central de sûreté des installations nucléaires pour évaluer certains termes techniques du scénario accidentel intervenant dans le calcul de la probabilité d'occurrence d'une onde de pression aérienne, due à une explosion, sur les bâtiments concernés.

Dans de très nombreux cas, un accident survenant dans l'environnement industriel d'une tranche nucléaire ou sur les voies de communication au voisinage, et impliquant des produits dangereux, se déroule selon un scénario qui peut être décomposé en trois étapes :

- épandage de liquide par une brèche et évaporation instantanée ou progressive de ce liquide ;
- dérive et dispersion atmosphérique de la nappe ou du nuage gazeux ainsi formé ;
- explosion accidentelle de ce nuage.

En fonction des produits impliqués et de la forme sous laquelle ils sont stockés ou transportés, certaines de ces étapes n'ont pas lieu d'être examinées. Par exemple, dans le cas des explosifs solides, seule la dernière étape est à considérer ; en ce qui concerne les produits gazeux, seules la dérive de la nappe ou du nuage et son explosion sont à examiner.

La décomposition en trois étapes, telle que présentée ci-dessus, illustre simplement le déroulement de la séquence la plus générale à analyser.

1- Emission de produits dangereux dans l'environnement

1.1, Réservoir de stockage (ou citerne d'un véhicule de transport terrestre)

Pour chacun des trois cas ci-dessous (gaz sous pression, gaz liquéfié sous pression, gaz liquéfié à basse température sous la pression atmosphérique), deux méthodes possibles sont présentées : la première peut être appliquée dans tous les cas, la deuxième peut être considérée comme acceptable chaque fois qu'il sera apporté une preuve jugée suffisante du fait qu'elle prend en compte une enveloppe réaliste des ruptures.

1.1.1. Gaz sous pression.

a) Rupture brutale du réservoir.

La bouffée de gaz (¹¹⁴) quasi instantanée, correspondant à la masse totale de gaz contenue dans le réservoir avant rupture, est considérée comme le terme source du calcul de dispersion atmosphérique.

¹¹⁴ Bouffée de gaz = émission localisée et brève.

b) Cas d'une simple brèche.

Est prise en compte une émission de gaz à un débit continu dépendant de la taille de la brèche et des conditions de stockage.

1.1.2. Gaz liquéfié sous pression.

a) Rupture brutale du réservoir.

De cette rupture résultent l'émission d'une grande bouffée ⁽¹¹⁴⁾ initiale de gaz, due à la surchauffe du liquide à la pression atmosphérique, puis d'une bouffée ⁽¹¹⁴⁾ secondaire lors du contact du liquide, restant à sa température d'ébullition sous la pression atmosphérique, avec le sol à la température ambiante, enfin une faible émission continue gouvernée par les transferts thermiques air-liquide. En général seule la première bouffée ⁽¹¹⁴⁾ - la plus importante - est à prendre en compte dans le calcul de dispersion atmosphérique.

b) Cas d'une simple brèche.

Est prise en compte l'émission d'un fluide diphasique à un débit continu dépendant de la taille de la brèche et des conditions de stockage.

La nappe ou le nuage gazeux résultant est constitué, d'une part, de la fraction instantanément évaporée dans le jet - résultant de l'état de surchauffe du liquide porté à la pression atmosphérique -, d'autre part, de l'évaporation de la nappe liquide au contact du sol, nappe formée par la fraction non évaporée dans le jet.

1.1.3. Gaz liquéfié à basse température sous la pression atmosphérique.

a) Rupture brutale du réservoir.

De cette rupture résultent l'émission d'une bouffée ⁽¹¹⁴⁾ de gaz lors du contact du liquide avec le sol, puis une faible émission continue.

b) Cas d'une simple brèche.

Est prise en compte l'émission de liquide à un débit massique continu dépendant de la taille de la brèche et de la masse volumique du liquide stocké.

Au contact du sol, la nappe de liquide s'évapore et la vapeur ainsi formée constitue une nappe ou un nuage gazeux.

1.2. *Citerne d'un transport fluvial ou maritime*

La prise en compte peut être analogue à celle de 1.1. Néanmoins, le débit d'évaporation de la nappe liquide qui s'étend sur l'eau est différent de celui observé dans les cas d'épandage sur le sol, compte tenu en particulier de la formation d'une couche de glace.

1.3. *Canalisation de transport*

a) Gaz sous pression.

Est prise en compte la rupture circonférentielle brutale de la tuyauterie avec séparation complète des deux extrémités. Le débit est en général pris égal au débit critique à la brèche. L'air entraîné par le jet de gaz dilue rapidement celui-ci jusqu'en dessous de la limite inférieure d'inflammabilité.

b) Gaz liquéfié.

Est prise en compte la rupture circonférentielle brutale de la tuyauterie avec séparation complète des deux extrémités. On suppose que l'écoulement reste en phase liquide jusqu'à la brèche et que la détente suivie de l'évaporation instantanée d'une fraction du débit se produit dans le jet. La fraction non évaporée forme une nappe liquide qui se vaporise progressivement sur le sol (cf. 1.1.2).

2. Dispersion atmosphérique de nuages ou nappes de gaz dérivants

Un modèle à émission séquentielle (somme de bouffées élémentaires) peut être utilisé, tant pour le traitement de la bouffée initiale que pour l'émission continue subséquente. Un modèle utilisant la formulation et les données de Pasquill ⁽¹¹⁵⁾ est également acceptable pour le traitement de l'émission continue à débit constant ou quasi constant.

¹¹⁵ Atmosphère Diffusion F. Pasquill. Ellis Horwood Limited Publisher, Halsted Press, John Wiley and Sons.

Pour la phase initiale de la dérive de gaz lourds (chlore, propane...), des modélisations spécifiques appropriées peuvent être utilisées. Des méthodes fondées sur l'extrapolation, selon une procédure qualifiée, de résultats expérimentaux d'épandage sont également acceptables.

3. Explosion de mélanges gazeux ou de produits dangereux

3.1. Généralité. - *Equivalent TNT. - Abaque*

L'allumage accidentel d'une nappe ou d'un nuage dérivant de mélange inflammable ne conduit pas en général à une réaction à cinétique rapide produisant des effets mécaniques à distance. De tels accidents se sont néanmoins produits mais il paraît difficile *a posteriori* de rattacher les phénomènes observés à telle ou telle valeur des paramètres physiques de la combustion.

En attendant des progrès significatifs dans les connaissances théoriques et expérimentales sur les mécanismes commandant les transitions entre régimes de combustion de cinétiques différentes, l'hypothèse est faite qu'une explosion d'une nappe ou d'un nuage de gaz ou d'un mélange gazeux est équivalente à une détonation de TNT, et que la valeur du pic de surpression résultant peut être déduite, moyennant la définition d'un équivalent massique approprié, d'un abaque relatif à cet explosif condensé.

En cas d'explosion près du sol d'une masse de trinitro-toluène M_{TNT} (exprimée en kg), la valeur du pic de surpression (exprimée en mbar) de l'onde de pression résultante de champ libre à front raide est donnée en fonction de la distance au point de l'explosion (exprimée en m) par la courbe de la figure jointe à la présente annexe, déduite de la figure 4.12 du manuel technique TM 5-1 300 de l'armée américaine, extrapolée vers les bases surpressions de 69 mbar (1 psi) à 50 mbar. Cette courbe ne prend pas en compte les effets de focalisation que pourrait produire le relief ou une inversion de température de l'atmosphère près du sol, effets qui peuvent être négligés compte tenu des marges de sécurité prises par ailleurs dans la présente règle.

3.2. *Cas des nappes ou des nuages gazeux de produits inflammables*

Dans le cas de produits inflammables, il y a dérive de la nappe de gaz jusqu'à l'endroit où une source d'ignition est rencontrée alors que le mélange est dans ses limites d'inflammabilité.

Si le déroulement d'un tel scénario ne peut être précisé dans des conditions acceptables sur le plan de la sûreté dans les évaluations prévisionnelles, une pratique actuelle est de faire l'hypothèse conservatoire que l'explosion de la nappe se produit à la distance de la source de gaz (lieu de l'accident ou emplacement de la rupture) où la concentration maximale de gaz dans la nappe est égale à sa limite inférieure d'inflammabilité dans l'air.

La masse de produit inflammable pur alors impliquée dans l'explosion est celle mélangée à l'air à l'intérieur des limites d'inflammabilité.

Si cette quantité ne peut pas être évaluée en sûreté, elle sera prise par convention égale à 20 % de la masse totale émise à la source sous forme gazeuse ; dans le cas de cinétiques d'émission rapidement décroissantes (épandages de gaz liquéfié dans une cuvette de rétention par exemple), seront examinées la dispersion de la bouffée initiale et, en tant que de besoin, celle dans la panache correspondant à l'émission continue se déroulant par la suite.

Si M_{HC} est la masse d'hydrocarbure mélangée à l'air à l'intérieur de ses limites d'inflammabilité, il est admis, compte tenu du conservatisme de l'hypothèse faite en 3.1, 2^e alinéa, de la présente annexe, que l'explosion est équivalente quant à ses effets à celle d'une masse de TNT $M_{TNT} = 5 M_{HC}$, dans la fourchette des pics de surpression (50 mbar - 500 mbar).

Cas particulier du méthane

La quantification des effets d'une explosion accidentelle d'un nuage gazeux libre de méthane - provenant de l'évaporation d'une nappe de gaz naturel liquéfié - est effectuée selon la même démarche. Toutefois on considère que la probabilité d'observer ces effets est au moins dix fois plus faible que celle de les observer à la suite d'une explosion d'un autre hydrocarbure.

3.3. *Cas des réservoirs vides mal dégazés*

Pour évaluer les risques présentés par l'explosion de réservoirs ou de citernes destinés au stockage de produits dangereux et qui ont été vidangés de leur contenu liquide mais qui ont été mal dégazés, il est supposé que leur contenu gazeux est constitué d'un mélange de vapeur et d'air en proportions stœchiométriques. Il est admis que l'explosion est équivalente quant à ses effets à celle d'une masse de TNT égale à cinq fois celle des vapeurs contenues.

3.4. *Cas des explosifs solides*

Les explosions d'explosifs par destination autres que le TNT ou d'explosifs occasionnels sont traitées en se ramenant à l'explosion de TNT produisant les mêmes effets. Des tables de correspondances ont été établies, fondées sur des résultats d'essais ; la table reconduite ci-après est présentement considérée comme acceptable.

Table citée au paragraphe 3.4 de l'annexe n° 2

Extrait de : « *Les Explosifs occasionnels* » par L. Médard

Collection « Industrie, productions, environnement » Technique et Documentation

Propriétés de quelques explosifs condensés

(Le potentiel et le volume gazeux spécifique sont relatifs à la déflagration en vase clos engendrant une pression de 1 000 bars ; le c.u.p. concerne la détonation dans le bloc de plomb.)

	POTENTIEL (kcal/kg)	VOLUME Gazeux spécifique (dm ³ /kg)	c.u.p. *
--	------------------------	------------------------------------------------------	----------

Explosifs intentionnels			
Nitroglycérine	1623	716	145
Acide picrique	770	880	100
Nitroguanidine	727	1075	96
Trinitrotoluène	685	960	94
Fulminate de mercure	417	315	-
Explosifs occasionnels			
Tétranitrométhane	540	690	50
Nitrate d'ammonium	628	980	70
Nitrate d'hydrazinium	1018	1002	120
Perchlorate d'ammonium	473	810	68
Perchlorate d'hydrazinium	894	845	106
Nitrate de méthyle	1650	875	158
Nitrate d'éthyle	860	1230	122
Nitrate de propyle normal	600	1245	-
Nitrométhane	1130	1100	135
Nitroéthane	570	750	-
Dinitroéthane	1240	930	128
Nitro-urée	920	850	97
Nitrate d'urée	804	910	82
Nitrate de guandinium	610	1100	80
Nitrate de méthylsmonium	850	1190	100
Nitrocellulose (à 12,1 % d'azote)	867	930	108
Acide trinitrobenzoïque	630	870	83
Acide picramique	475	950	61
Dinitro-1,3 benzène	630	920	86
Dinitro-2,4 toluène	580	927	68
Dinitro-2,4 phénol	510	935	78
Dinitro-orthocrésol	500	930	59
Dinitronaphtalène	575	770	50
Cyclotriméthylène-trinitrosamine	870	1160	125.5
Pentaméthylène-dinitrosotétramine	675	1120	-

* Coefficient d'utilisation pratique (par convention c.u.p. = 100 pour l'acide picrique). Le c.u.p. est lié au travail spécifique d'un explosif.

Exemple : 15 g d'acide picrique et $15 \times \frac{100}{94}$

15,96 g de TNT produisent le même évasement dans des blocs de plomb étalons.

Figure citée au paragraphe 3.1 de l'annexe n° 2

Pic de surpression de champ libre
en fonction de la distance réduite

pour une explosion de TNT au niveau du sol

Exemple d'application :

Pic de surpression exprimé en mbar	50			100		
Distance réduite exprimée en $m/(kgmfl)^{1/3}$	25			13,5		
Masse de TNT exprimée en kg	10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5
Distance exprimée en m	250	549	1160	135	291	627