

TABLE DES MATIERES

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1: COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU BETON.....	4
1.1. Introduction	5
1.2. Comportement dynamique	6
1.2.1.Compressiondynamique	6
1.2.2. Traction dynamique.....	7
1.2.3. Comportement du béton vis-à-vis de l'effet de vitesse.....	8
1.3. Caractérisation des champs asymptotiques en pointe de fissure : (Ionel Nistor, 2005).....	10
1.4. Caractérisation des impacts d'avions	13
1.4.1.Vue générale sur la notion d'impact dynamique.....	13
1.4.2.Choc mou et choc élastique	15
1.4.3.Choc mou, déplacements et force d'impact	17
1.5. Conclusion.....	20
CHAPITRE 2: LES MODELES DYNAMIQUES	21
2.1. Introduction	22
2.2. Modèles macroscopiques pour le béton en dynamique.....	23
2.3. Modélisation du comportement du béton en dynamique	24
2.3.1. Modèles visco-plastiques	24
2.3.2. Modélisation du comportement visco-endommageable.....	25
2.3.2.1. Exemple d'un modèle visco-endommageable avec prise en compte de l'effet de vitesse (Modèle de J.F.Dubé)	26
2.3.3. Modèles visco-plastiques visco-endommageables	28
2.4. Conclusion.....	30

CHAPITRE 3 : IMPACT D'AVION SUR UNE ENCEINTE DE CONFINEMENT 31

3.1.	Introduction	32
3.2.	Aspect et rôle structural des enceintes de confinement	33
3.2.1.	Les divers types d'enceintes de confinements [Jean-Louis Costaz 1997]	35
3.2.1.1.	Les enceintes à paroi unique du palier 900 MWe	35
3.2.1.2.	Les enceintes à double paroi des paliers 1300 MWe et 1450 MWe(N4) ..	36
3.2.2.	Le rôle de l'enceinte de confinement	37
3.3.	Les matériaux constituant l'enceinte de confinement	37
3.3.1.	Caractérisation du béton	37
3.3.2.	Caractérisation de la précontraintes	38
3.4.	Le risque de chute d'avion	39
3.4.1.	Caractérisation des impacts d'avions [Jessica Rousseau 2009]	39
3.4.2.	 Les règles de sûreté applicables aux installations nucléaires (John Large et Associates, 2011).....	43
3.4.2.1.	L'évaluation de la résistance des installations	46
3.4.3.	Conséquences éventuelles d'une chute d'avion sur une centrale nucléaire	47
3.5.	Conclusion	47

CHAPITRE 4: APPLICATION A LA SIMULATION DE L'ENCEINTE DE CONFINEMENT 48

4.1.	Introduction	49
4.2.	Géométrie et ferrailage de la centrale	49
4.2.1.	Géométrie	49
4.2.2.	Ferrailage.....	50
4.3.	Le modèle dynamique Dyna-LMT.....	50
4.3.1.	Description du modèle.....	51
4.3.2.	L'introduction de l'effet de vitesse	52
4.3.3.	Les paramètres du modèle dynamique Dyna-LMT.....	54
4.4.	Description de simulation numérique.....	55
4.5.	Les résultats de la simulation	57
4.5.1.	L'endommagement.....	57
4.5.2.	Les ouvertures des fissures	58
4.5.3.	Déformation des aciers.....	59

4.5.4 . Déplacement vertical du sommet du dôme.....	60
4.6. Conclusion.....	61
Conclusion générale	62
Références bibliographiques	64
Annexes.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Compilation des résultats de tests de compression dynamique.....	6
Figure 1.2 : Essai avec des barres de Hopkinson (DUBE , 2005).....	7
Figure 1.3 : Traction dynamique.....	8
Figure 1.4 : Limite de fluage par les isochrones et les tests de fluage.....	9
Figure 1.5 : Rupture par fendage sous chargement statique A et dynamique B.....	10
Figure 1.6 : Les modes fondamentaux de la mécanique de la rupture.....	11
Figure 1.7 : Zone autour de la pointe d'une fissure.....	11
Figure 1.8 : Configuration d'un impact accidentel sur la centrale nucléaire.....	14
Figure 1.9 : différents effets d'impact sur la dalle en béton, (a) pénétration, (b) formation d'un cône, (c) cratérisation, (d) fissurations sur (i) la face avant et (ii) la face arrière, (e) l'écaillage, (f) perforation, et (g) réponse de la structure entière.....	14
Figure 1.10 : Chocs mou et élastique de masses ponctuelles.....	15
Figure 1.11 : Modélisation d'un choc avec systèmes masse-ressort.....	18
Figure 1.12 : Modélisation d'un choc mou : détermination de la force d'impact.....	19
Figure 2.1 : Essai d'impact d'un avion sur un mur en béton armé (vitesse d'impact 215m)	22
Figure 2.2 : système masse ressort.....	23
Figure 3.1 :a) Empire State building en feu après l'impact d'un boeing b25 (juillet 1945)- b)Attentats du World Trade Center (septembre2001).....	32
Figure 3.2 : Dimensions du bâtiment réacteur de Flamanville (à gauche) et des enceintes d'un réacteur REP 1300MWe (à droite).....	34
Figure 3.3 : Différentes géométries d'enceintes de confinement.....	34

Figure 3.4 : schéma de l'enceinte a paroi unique.....	35
Figure 3.5 : schéma de l'enceinte a double paroi.....	36
Figure 3.6 : Fonctions de chargement d'impacts d'avions.....	40
Figure 3.7 : Fonctions utilisées pour évaluer la force de choc d'un Phantom F4-F: (a) Répartition des masses, (b) Force de flambage plastique, (c) Force de choc.....	41
Figure 3.8 : Impact d'un Phantom F4 sur un mur en béton armé.....	42
Figure 3.9 : Force d'impact des avions Lear Jet et Cessna.....	45
Figure 4.1 : Géométrie de la centrale nucléaire.....	49
Figure 4.2 : Ferrailage de la centrale nucléaire.....	50
Figure 4.3 : Force d'impact des avions Lear Jet 23 et Cessna 210.....	55
Figure 4.4 : Condition aux limites et chargement.....	56
Figure 4.5 : Centrale Nucléaire en axisymétrie.....	56
Figure 4.6 : L'endommagement sous l'effet de chute des deux avions Cessna 210 et learjet23.....	57
Figure 4.7 : Les ouvertures des fissures sous l'impact de chute de l'avion Learjet23.....	58
Figure 4.8 : Déformation sous l'effet d'impact de l'avion Cessna 210.....	59
Figure 4.9 : Déformation Sous l'effet d'impact de l'avion Lear jet23.....	59
Figure 4.10 : Le déplacement vertical du sommet du dôme pour $e_{p1}=10$ mm.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Probabilités retenues pour la prise en compte des chutes d'avion dans la conception des installations nucléaires.....	44
Tableau 3.2 : Evaluation de l'énergie libérée par la chute de différents types d'avions.....	46
Tableau 4.1 : Les paramètres du modèle dynamique DYNA-LMT.....	54

NOMENCLATURE

a et b : Paramètres des matériaux.

A_i et B_i : Des paramètres du matériau.

d_t et d_c : Les variables d'endommagement en traction et compression.

D_c : Endommagement de compression.

D_t : Endommagement de traction.

E_0 : Module d'Young initial.

F : Potentiel d'évolution.

f^* : La porosité du matériau.

f_c ou f_t : Résistance de référence (c : compression et t : traction).

f_{ij}^{I-III} : Des fonctions angulaires connues pour chaque mode.

G_{ijkl} : Module de cisaillement du matériau.

k_0 : Seuil initial d'endommagement.

K_1 et K_2 : les raideurs des ressorts.

K_{I-III} : Les facteurs d'intensité de contraintes pour les trois modes fondamentaux de la rupture.

K_{ijkl} : Module de compressibilité du matériau.

m_i et n_i : des paramètres du modèle fonctions du matériau, $i = t$ ou c .

m_{vp} et n_{vp} : Paramètres des matériaux.

m_1 et m_2 : Des masses.

n_{D_t} , n_{D_c} , m_{D_t} , m_{D_c} : Paramètres matériau.

q_1, q_2, q_3 : Paramètres scalaires du critère.

V_0 : Vitesse du projectile.

$x(t)$: La distance écrasée.

α_c et α_t : Des fonctions de type de chargement.

β_t et β_c : Des constantes.

ν : Coefficient de Poisson.

r et θ : Les coordonnées polaires centrées sur la pointe de la fissure.

σ^+ et σ^- : Le tenseur des contraintes positif et le tenseur des contraintes négatif.

σ_c : Contrainte de rupture de la cible.

$\sigma_{ij}^{(1)}$: Les contraintes appliquées au front de la fissure.

σ_M : La contrainte sans vide dans la matrice.

σ_p : Contrainte de rupture du projectile.

σ_v : Contrainte visqueuse.

σ_y : Chargement suivant la direction y.

$f(\sigma)$: La fonction seuil.

$g(\sigma)$: Une fonction qui gère la refermeture des fissures.

τ_{xy} : Cisaillement selon la direction x perpendiculaire au front de fissure.

τ_{yz} : Cisaillement selon la direction z parallèle au front de la fissure.

ϵ_{eq} : Déformation équivalente.

$\epsilon, \epsilon^e, \epsilon^p$ et ϵ^{eD} : Les déformations totale, élastique, plastique et élastique déviatorique.

$\tilde{\epsilon}^e$: La déformation équivalente élastique.

ϵ_{D0} : Le seuil initial d'endommagement.

$F_D(\tilde{\epsilon}^e)$: Fonction seuil d'endommagement.

$\dot{\lambda}_i$: Multiplicateur d'endommagement.

$K(\Phi)$, $G(\Phi)$: Le module de compressibilité et le module de cisaillement.

ρ : Masse volumique du projectile.



INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau qui est utilisé dans de nombreuses applications aussi diverses que les bâtiments, les barrages, les ponts, les ouvrages de défense ou les enceintes de confinement des centrales nucléaires, en particulier les enceintes double paroi. C'est un matériau très complexe aussi de par sa nature quasi-fragile, avec un comportement quasi-élastique puis endommageable, dont les propriétés évoluent aussi avec le temps.

L'exploitation des installations de production d'électricité, initialement prévue pour une durée de 30 ans, pourrait être étendue à plus de 40 ans. Dans cet objectif, il est nécessaire de pouvoir s'assurer que les matériaux utilisés lors de la construction possèdent toujours des propriétés physiques suffisantes vis-à-vis de la sûreté des installations. En particulier, les enceintes de confinement des réacteurs ont un rôle essentiel de sûreté en assurant l'étanchéité entre l'intérieur de l'enceinte de confinement et l'extérieur.

Afin de protéger l'homme et l'environnement de toute dispersion de radioactivité, les centrales nucléaires disposent de trois barrières physiques de confinements, résistantes et étanches. Ces trois barrières successives forment un véritable écran entre les matières radioactives et l'environnement extérieur. La première barrière est la gaine métallique qui enferme l'uranium à l'intérieur du réacteur. Cette barrière retient les produits de fission, créés lors de la réaction en chaîne. La deuxième barrière est constituée par l'enveloppe métallique du circuit de refroidissement primaire, qui comprend notamment la cuve en acier du réacteur. Enfin, cet ensemble est lui-même confiné dans une enceinte en béton précontraint, simple ou double, selon les cas. Cette troisième barrière de sécurité étanche est conçue pour résister en cas de fusion du réacteur ou à des agressions externes. L'absence de cette troisième barrière, l'enceinte de confinement, dans la configuration de la centrale nucléaire de Tchernobyl a notamment conduit, lors de l'accident de 1986, à une dispersion radioactive sans précédent dans l'histoire de la production nucléaire.

La simulation numérique fait maintenant partie intégrante du processus de conception et validation des structures/ouvrages de Génie Civil. Les outils de simulations sont de plus en plus performants permettant ainsi une description très fine des phénomènes. De plus, ces outils ne se limitent plus à la mécanique linéaire, mais sont développés pour décrire des comportements plus complexes allant jusqu'à la ruine des structures, ce qui relève du domaine de la sécurité. Un chargement dynamique ou statique peut ainsi engendrer un endommagement, une fissuration puis une rupture de la structure. La dynamique rapide quant à elle permet de simuler des phénomènes rapides tels que des explosions, des chocs et impacts sur les structures.

L'objectif général de ce travail est d'étudier le comportement mécanique du béton et la modélisation de sa fissuration sous un impact. Il comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre comportera une synthèse générale du comportement dynamique du béton ainsi l'effet de vitesse, permettant de prendre en compte l'impact dynamique et ses différents effets sur la structure en béton.

Le deuxième chapitre est consacré à certains modèles dynamiques du béton, qui décrivent le comportement de béton sous des chargements dynamiques rapides.

Dans le troisième chapitre, des notions générales concernant l'enceinte de confinement seront présentées ainsi que le risque de chute d'avion.

Dans le quatrième chapitre, nous entamons une simulation d'une enceinte de confinement sous l'effet d'impact de deux avions "Cessna 210" et "Lear Jet 23" qui sont proposés par la RFS (Règles Fondamentales de Sureté), en utilisant le modèle dynamique DYNA- LMT.

Finalement nous terminerons le mémoire par une conclusion générale qui nous permettra à engendrer des perspectives pour des travaux futurs.



CHAPITRE 1 : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU BETON

1.1. Introduction

Le béton est le matériau le plus utilisé pour la construction d'ouvrages en Génie Civil. Cependant la connaissance de son comportement en dynamique rapide reste limitée. Le béton est un milieu hétérogène, son comportement est complexe à analyser. Plusieurs auteurs ont proposé des lois de comportement avec un degré de complexité plus ou moins élevé pour prédire son comportement en dynamique rapide.

La caractérisation du comportement des matériaux soumis à des sollicitations dynamiques constitue une des préoccupations actuelles, objet de nombreuses avancées, dans le contexte du développement d'outils numériques et expérimentaux.

Une structure soumise à des chargements dynamiques peut subir, selon la nature des sollicitations, de grandes variations dans son comportement allant de la phase de déformation plastique jusqu'à la rupture en passant par l'endommagement. Le caractère dynamique de ces sollicitations implique l'emploi de lois de comportement et de critères d'endommagement et de rupture prenant en compte l'influence des paramètres spécifiques à la dynamique rapide : vitesse de déformation, température, vitesse d'avancement de la fissure, etc. On est ainsi capable, en intégrant ces lois et critères dans des codes d'analyse numérique, de prévoir le comportement de la structure et d'identifier les zones à risque du point de vue de la sécurité.

La gamme des applications est très vaste, pratiquement toutes les structures en génie civil sont soumises à des charges dynamiques pendant leurs durées de vie. Certaines structures spéciales en béton (centrales nucléaires, plates-formes d'exploration, ouvrages stratégiques tels que les bâtiments névralgiques, les ponts...) sont susceptibles d'être soumises à des actions accidentelles. Ces actions peuvent être des séismes, des impacts ou des explosions générant des chargements intenses et de courtes durées.

1.2. Comportement dynamique

1.2.1. Compression dynamique

Dans la thèse de : Xuan Dung VU (**Xuan Dung VU, 2013**), il a montré que pour étudier le comportement en compression dynamique du béton, différentes méthodes ont été proposées comme la technique « drop – hammer », la technique utilisant les presses rapides hydraulique – pneumatique, et l'impact. En compression dynamique, la résistance du béton augmente apparemment avec la vitesse de déformation. Cette observation est commune à différents chercheurs tels que Bischoff et Perry (**Bischoff et Perry, 1991**) dont les résultats de leurs essais sont compilés dans la figure 1.1.

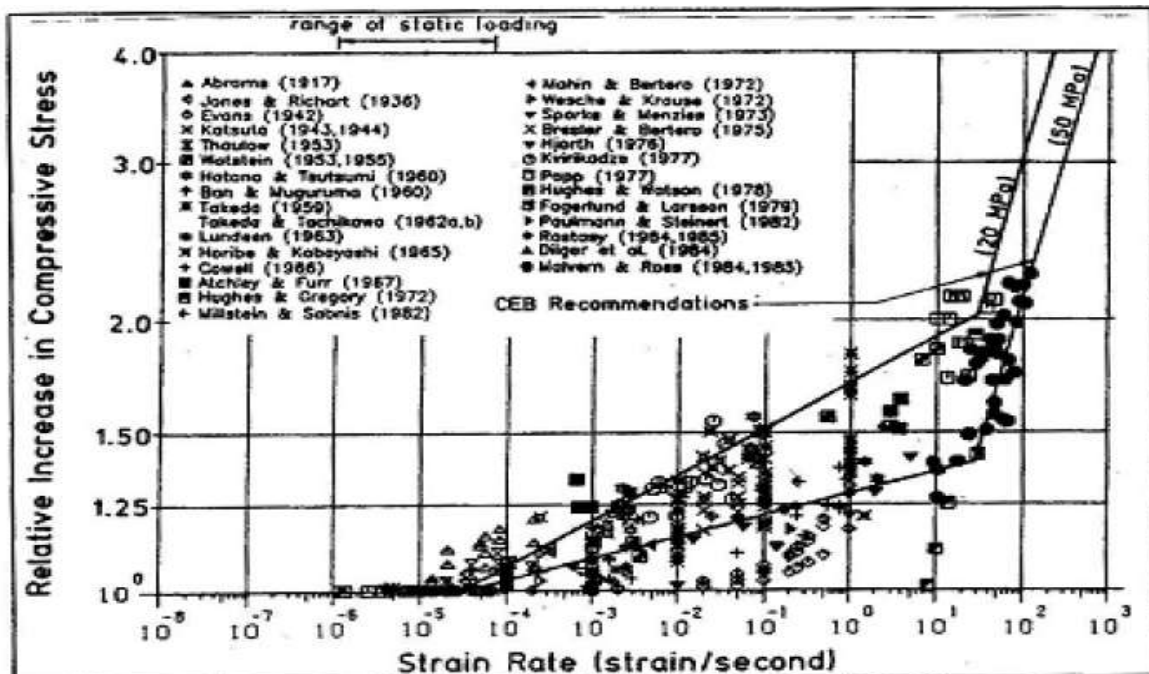


Figure 1.1: Compilation des résultats de tests de compression dynamique

(Bischoff et Perry, 1991)

A partir de ces essais; il a été observé qu'il y a deux régimes de comportement :

- 1) Si les vitesses de sollicitation sont comprises entre 10^{-4} et 10 s^{-1} : l'augmentation de résistance est faible, dans ce cas on peut exprimer l'accroissement de résistance comme une fonction linéaire du logarithme de la vitesse.
- 2) Si les vitesses de sollicitation sont au delà de 10 s^{-1} : la résistance du béton croît plus rapidement avec la vitesse de sollicitation ; on passe d'un rapport (résistance dynamique/résistance statique) de 1,5 à 10 s^{-1} à un rapport de 3 à 100 s^{-1} .

Les essais dynamiques sur barres d'Hopkinson (**figure 1.2**) ont permis d'atteindre des vitesses encore plus élevées (jusqu'à environ 1000 s^{-1}). Donc l'effet de vitesse est représenté en compression comme une fonction bilinéaire du logarithme de la vitesse de sollicitation.

L'augmentation de résistance en compression peut s'expliquer par des considérations structurales liées à l'inertie de l'échantillon testé.

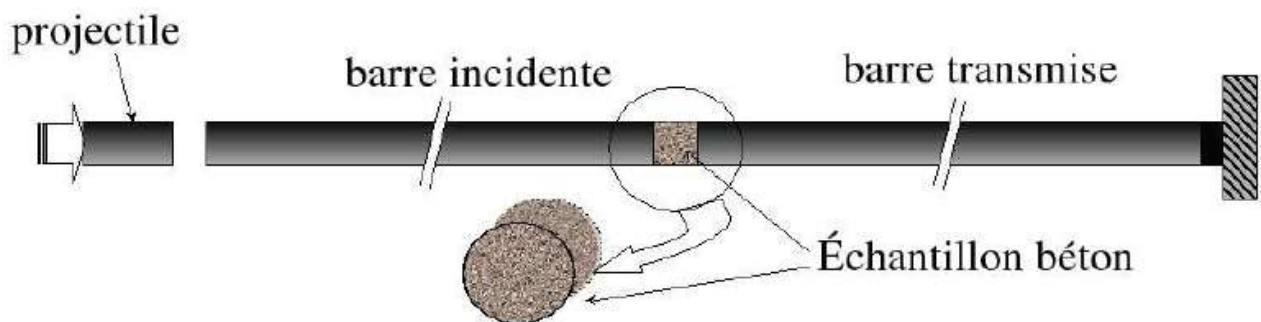


Figure 1.2 : Essai avec des barres de Hopkinson (DUBE, 2005)

Selon la thèse de Jessica ROUSSEAU (**Jessica ROUSSEAU, 2009**), en ce qui concerne les impacts d'avions, les vitesses de déformation sont comprises entre 6.10^{-3} s^{-1} pour un Boeing 707 et 5.10^{-2} s^{-1} pour un avion de chasse. Ces valeurs ont été estimées de façon assez grossière à partir de la vitesse de chargement lors de l'impact et des caractéristiques matériaux. Ces taux de déformation se trouvent dans la première phase et l'augmentation des résistances ne dépasse donc pas 25% de la valeur statique.

1.2.2. Traction dynamique

Les essais de traction en dynamique peuvent être réalisés principalement grâce à deux dispositifs:

- 1) Pour les essais "lents" : des presses relativement rapides sont asservies classiquement. Ces presses permettent en général une montée en charge de $0,05 \text{ MPa/s}$ à 50 GPa/s .
- 2) Pour les grandes vitesses : le dispositif dit barres d'Hopkinson (**A. Brara, 1999**) est utilisé. L'essai sur barre d'Hopkinson, ne permet pas d'atteindre les mêmes vitesses de sollicitation qu'en compression et ce pour la simple raison qu'il faut augmenter la vitesse et endommager d'abord l'éprouvette en compression (et non en traction). Ainsi la vitesse maximale qui a été atteinte n'est que légèrement supérieure à 100 s^{-1} .

Comme en compression, l'augmentation de contrainte est exprimée comme le rapport de la résistance dynamique sur la résistance statique.

L'effet de la vitesse de sollicitation est beaucoup plus sensible en traction qu'en compression (la résistance est multipliée par 14 au lieu de 3 en compression). Comme il a été indiqué précédemment, certains auteurs ont exprimé cet effet de vitesse comme une fonction bilinéaire, mais il semble qu'une loi puissance soit également bien adaptée (**Figure 1.3**).

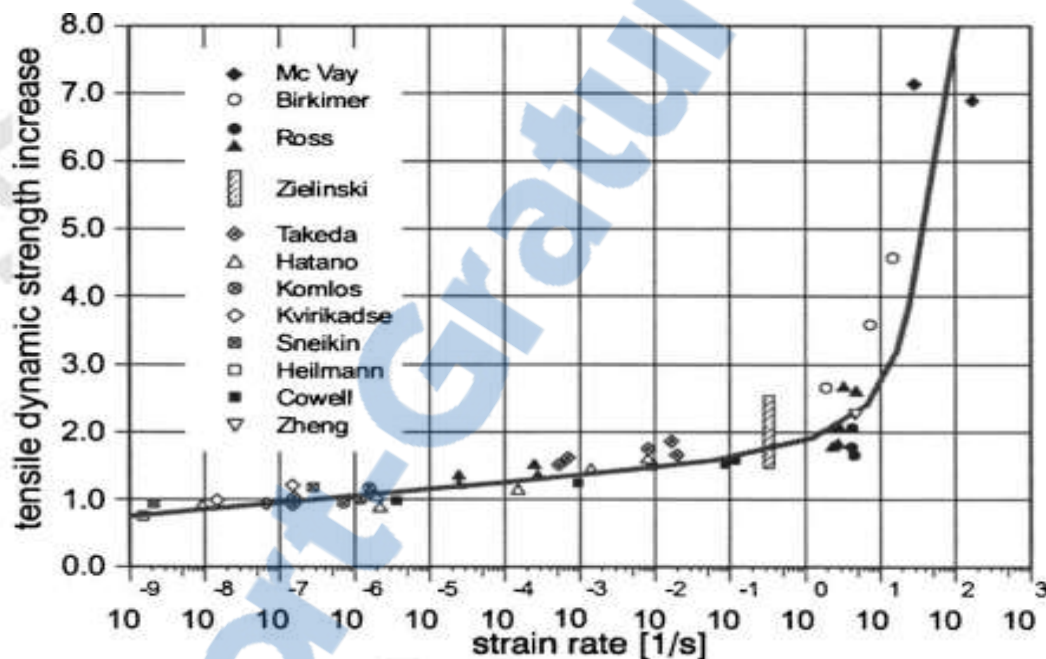


Figure 1.3 : Traction dynamique

1.2.3. Comportement du béton vis-à-vis de l'effet de vitesse

D'après le comportement généralisé du béton vis-à-vis de l'effet de vitesse, on distingue deux grands domaines de comportement identifiés par deux phases de vitesse. Les vitesses dynamiques et quasi – statique encadrent la phase "dynamique" de comportement. Quant aux vitesses quasi-statiques à statique, elles matérialisent la phase "statique". Cette partition est reliée à l'observation de mécanismes différents dans les deux phases. L'évolution de la courbe enveloppe des résistances (ou de rupture) explique le choix de la vitesse quasi - statique en particulier, comme valeur de caractérisation pour le béton.

L'effet de vitesse sur le comportement du béton est mis en évidence par la représentation des isochrones. Le comportement obtenu à vitesse quasi-statique caractérise le béton et particulièrement, en terme de résistance.

La vitesse de chargement influence le comportement du béton. L'essai de caractérisation mené à vitesse quasi-statique (imposée par la réglementation), fournit une courbe caractéristique dont on identifie une résistance de référence f_c ou f_t . Pour des gammes de vitesses plus rapides, le béton présente de plus fortes résistances par effet inertiel ou par effet Stéfán dû à la mise en pression de l'eau interne du matériau. A l'inverse, pour des gammes de vitesse plus lentes, le temps d'essai augmente et laisse la possibilité au développement de déformations différées qui confère des résistances différées plus faibles. Une valeur minimale est obtenue lors d'un chargement infiniment lent et caractérise la résistance intrinsèque du béton. Cette vitesse extrême de sollicitation est analogue à celle de la phase de chargement par fluage. On remarque d'ailleurs que les paliers de fluage supérieurs à la résistance intrinsèque, conduisent à des déformations de fluage tertiaire qui génèrent la rupture du spécimen (**limite de rupture figure 1.4**).

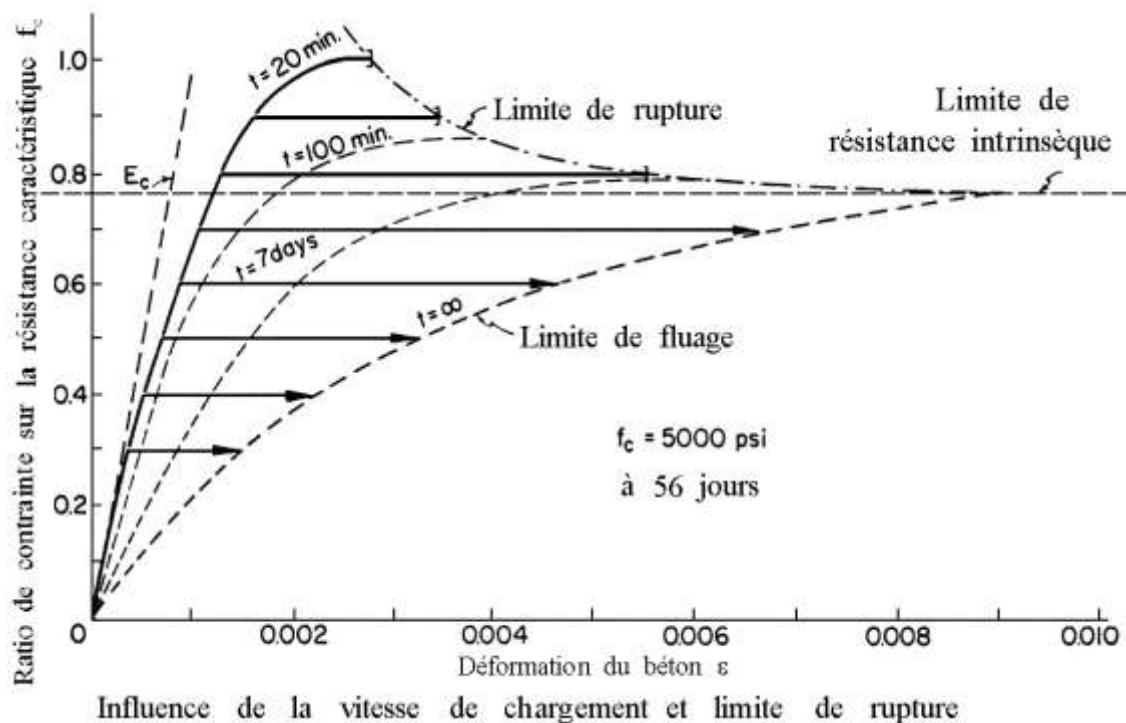


Figure 1.4 : Limite de fluage par les isochrones et les tests de fluage

(Amandine Berthollet, 2013)

A l'inverse de sollicitations rapides où la ruine est due à la rupture de granulats et partiellement, à la perte de cohésion des interfaces "pâte de ciment, granulat", des sollicitations lentes initient tout d'abord une perte de cohésion des interfaces puis, des fissures au sein même de la pâte de ciment (**figure 1.5**). Ces fissures dans le liant affectent directement la portance et leur initiation identifie le seuil de résistance intrinsèque (**Amandine Berthollet, 2013**).

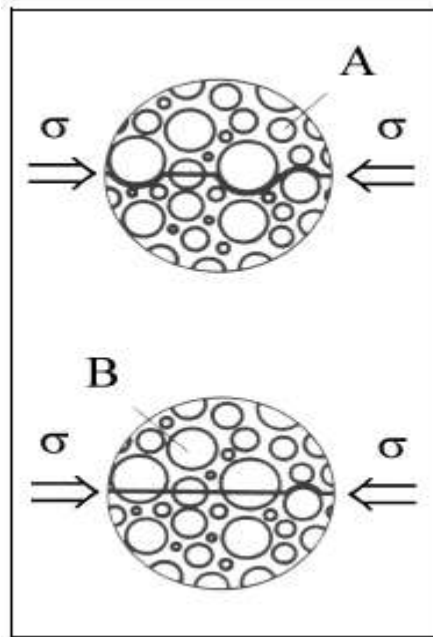


Figure 1.5 : Rupture par fendage sous chargement statique A et dynamique B

(Amandine Berthollet, 2013)

1.3. Caractérisation des champs asymptotiques en pointe de fissure (Ionel Nistor, 2005)

La connaissance des champs asymptotiques de contrainte et de déplacement autour de la pointe de fissure, est essentielle pour la compréhension du processus de rupture dynamique. Une fois les équations qui régissent ces champs connues, les autres paramètres importants pour l'étude de la rupture dynamique, comme le facteur d'intensité dynamique de contraintes et le taux de restitution dynamique de l'énergie peuvent être déterminés. Il convient d'abord de rappeler les trois modes fondamentaux de rupture correspondant aux déplacements relatifs des lèvres de la fissure (**Figure 1.6**) :

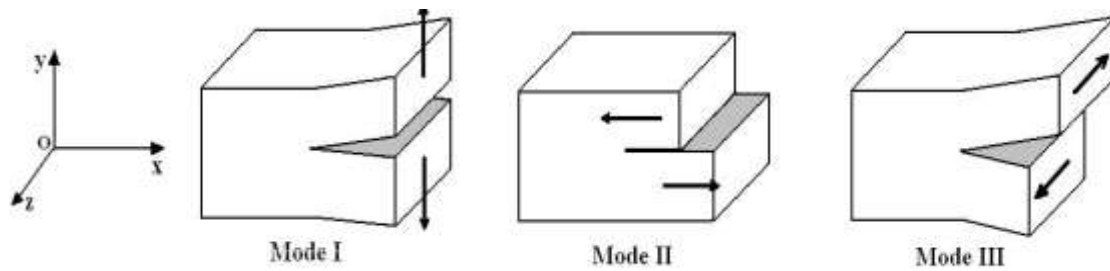


Figure 1.6 : Les modes fondamentaux de la mécanique de la rupture

- ✓ Mode I : mode d'ouverture où les lèvres s'écartent l'une de l'autre suivant la direction y suite au chargement σ_y .
- ✓ Mode II : mode de glissement où les lèvres glissent l'une sur l'autre selon la direction x perpendiculaire au front de fissure, qui apparaît lors d'un cisaillement τ_{xy} .
- ✓ Mode III : mode de déchirement où les lèvres se déplacent l'une par rapport à l'autre selon la direction z parallèle au front de la fissure qui apparaît lors d'un cisaillement τ_{yz} .

Dans l'étude de l'interaction entre une discontinuité géométrique (la fissure) et le milieu continu avoisinant, la mécanique de la rupture distingue classiquement trois zones successives autour de la tête de la fissure (**Figure 1.7**) :

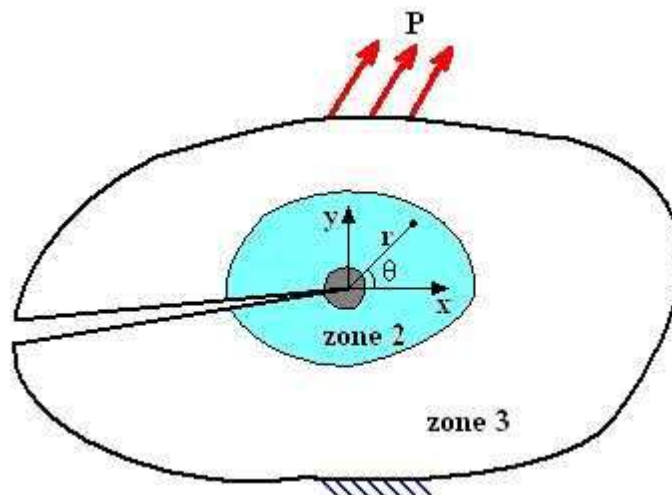


Figure 1.7 : Zone autour de la pointe d'une fissure

- ✓ La zone d'élaboration (zone 1) qui se trouve à la pointe de la fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation ; sa taille étant en général très faible, elle est considérée comme ponctuelle d'un point de vue mécanique. Siège de contraintes très importantes qui ont endommagé fortement le matériau, l'étude de cette zone est complexe et dans notre approche est basée sur un modèle de cohésion.
- ✓ La zone singulière (zone 2) dans laquelle les champs de déplacement, de déformation et de contrainte sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure ; quantitativement, cette zone est caractérisée par un facteur multiplicateur appelé facteur d'intensité de contraintes.
- ✓ La zone extérieure (zone 3), comprend les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites.

La zone singulière de la fissure (zone 2), la plus importante pour la mécanique de la rupture, est caractérisée, d'un point de vue des contraintes et des déplacements, par des champs asymptotiques. Le premier à avoir déterminé et résolu les équations de ces champs, pour le cas statique, a été Irwin en 1957 en s'appuyant sur les travaux de Griffith, montrant que les contraintes au voisinage de la pointe de la fissure ont la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta) + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{III}(\theta) + \sigma_{ij}^{(1)} \quad (1.1)$$

D'où :

- ✓ r et θ : les coordonnées polaires centrées sur la pointe de la fissure ;
- ✓ K_{I-III} : les facteurs d'intensité de contraintes pour les trois modes fondamentaux de la rupture ;
- ✓ f_{ij}^{I-III} : des fonctions angulaires connues pour chaque mode ;
- ✓ $\sigma_{ij}^{(1)}$: les contraintes appliquées au front de la fissure.

Les expressions analytiques des trois facteurs d'intensité de contraintes dépendent, dans le cas de la rupture statique, de la longueur de la fissure, de la géométrie et du chargement ; ils déterminent à eux seuls les champs asymptotiques de contraintes et de déplacements. Dans le cas de la rupture dynamique, les facteurs d'intensité de contrainte dépendent en plus du temps, et d'autres paramètres particuliers.

1.4. Caractérisation des impacts d'avions

1.4.1. Vue générale sur la notion d'impact dynamique

Les structures en béton sont souvent conçues pour résister à des impacts de fortes énergies cinétiques, comme par exemple, les galeries de protection dans les régions montagneuses qui permettent de protéger les routes contre les chutes de bloc ; les enceintes de centrale nucléaire qui permettent de protéger le réacteur contre tous les types d'évènement accidentel (**Figure. 1.8**) ; les protections militaires permettent elles aussi de se prémunir des impacts liés aux projectiles. La réponse d'une structure lors de tels chargements peut s'exprimer en deux termes : la réponse globale et la réponse locale. La réponse globale est principalement due à la vibration de l'ensemble de la structure. L'endommagement est alors surtout lié à une réponse en mode cisailant ou en flexion et qui va apparaître lorsque la capacité d'énergie potentielle en déformation est inférieure à l'énergie transmise par l'impact du projectile.

Ici, nous nous intéressons plutôt à la réponse locale, dont l'endommagement se localise près de la zone d'impact où la pénétration, la perforation (limite balistique) et l'écaillage ont lieu. Lorsqu'une cible est soumise à un missile rigide, le missile pénètre d'abord dans la cible. Une série d'ondes élastiques est générée par l'impact, puis, si la cible est mince, l'écaillage apparaît dans la face arrière due à la réflexion de ces ondes. Si la vitesse initiale est assez importante, le missile peut perforer complètement la cible. On peut distinguer sept phénomènes associés aux différents niveaux d'endommagement observés (**figure 1.9**) (SHIU, 2008) :

- ✓ **Pénétration** : le projectile pénètre dans la cible.
- ✓ **Fissuration en cône et « plugging »** : devant le nez du projectile.
- ✓ **Cratérisation** : L'éjection des petits morceaux de matériau par l'écrasement de missile en face avant.
- ✓ **Fissuration radial** : L'expansion de fissures globales à partir de la zone d'impact apparaît sur les deux surfaces de la cible lorsque ces fissures se propagent suivant la direction d'épaisseur de la cible.
- ✓ **Ecaillage** : L'éjection des morceaux de matériau en face arrière.
- ✓ **Perforation** : Le projectile peut passer complètement à travers la cible avec ou sans vitesse résiduelle.

- ✓ **Réponse globale de la structure** : la vibration globale d'une structure peut parfois induire des endommagements en cisaillement sur toute la cible.

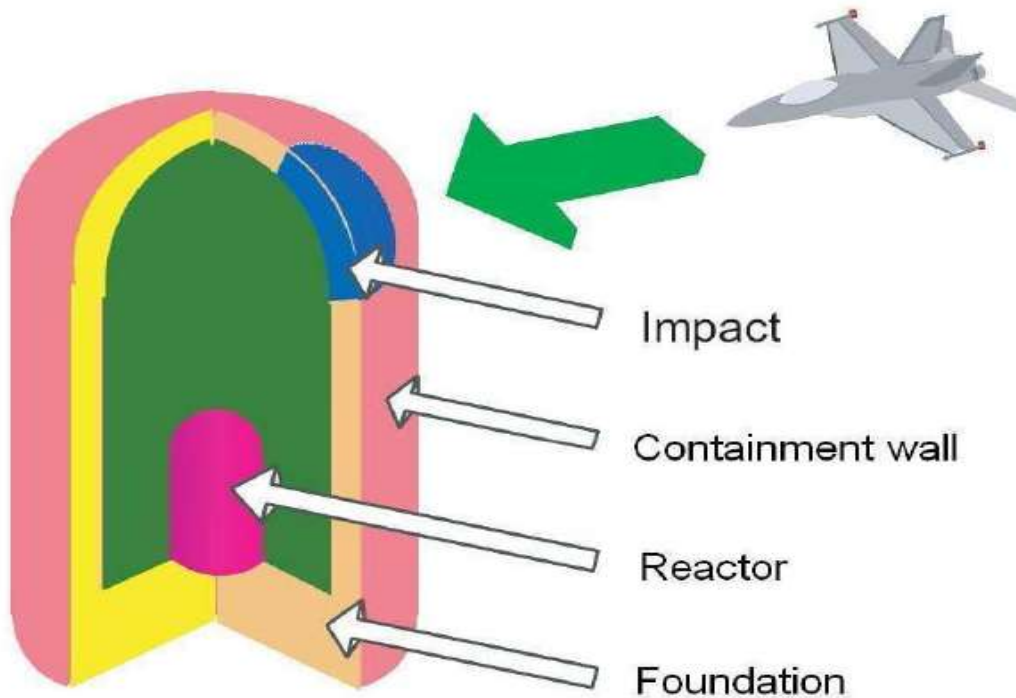


Figure 1.8 : Configuration d'un impact accidentel sur la centrale nucléaire

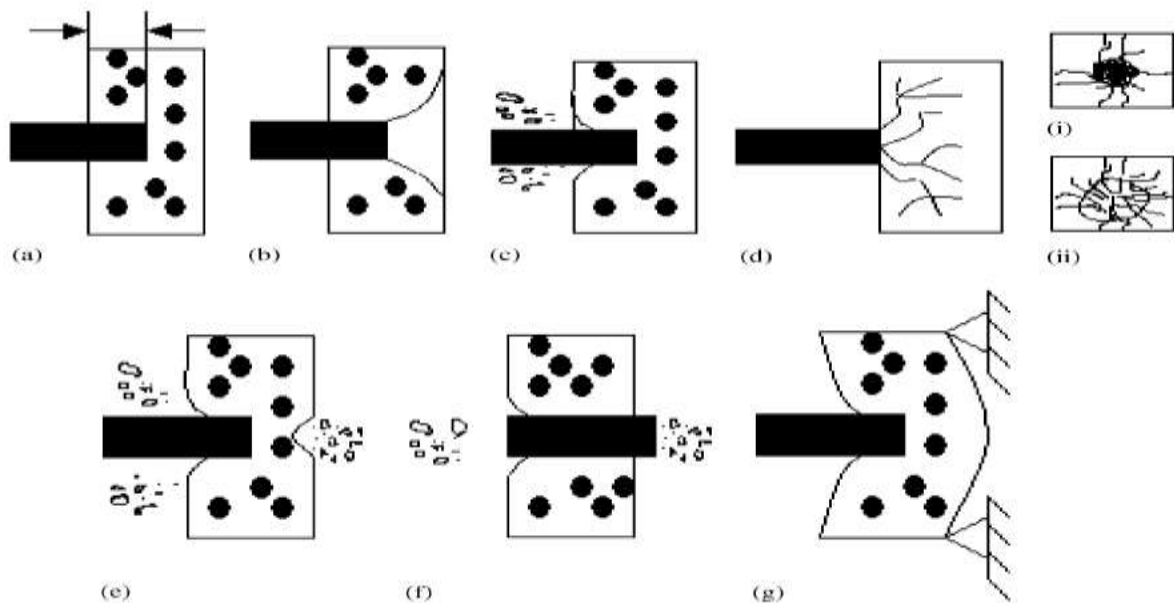


Figure 1.9 : différents effets d'impact sur la dalle en béton, (a) pénétration, (b) formation d'un cône, (c) cratérisation, (d) fissurations sur (i) la face avant et (ii) la face arrière, (e) l'écaillage, (f) perforation, et (g) réponse de la structure entière.

Le développement des fissures dans une dalle en béton lors d'un impact est compliqué dépendant à la fois des caractéristiques du projectile (forme du nez, déformable ou indéformable, résistance, vitesse initiale) et de celles de la dalle en béton (épaisseur, dimensions, résistance).

1.4.2. Choc mou et choc élastique

La chute d'avion, qu'il soit militaire ou civil, est qualifiée habituellement de choc mou. Cette appellation vient de l'absence de rebond de l'avion contre la paroi en béton, constatée sur les essais effectués en grandeur nature : l'avion se déforme et s'écrase complètement contre la structure en béton armé qui ne subit que de faibles déplacements (**Pierre KOECHLIN, 2007**).

Dans le cas de deux masses ponctuelles qui s'entrechoquent, on définit habituellement un choc mou par opposition au choc élastique. On parle de choc mou lorsque les deux corps se lient l'un à l'autre pour ne plus former qu'un seul solide et repartir avec la même vitesse, sans qu'il n'y ait aucun rebond. Au contraire, lorsqu'il y a un rebond parfait sans dissipation d'énergie, le choc est qualifié d'élastique (**Figure 1.10**). Le choc élastique est parfois improprement appelé choc dur.

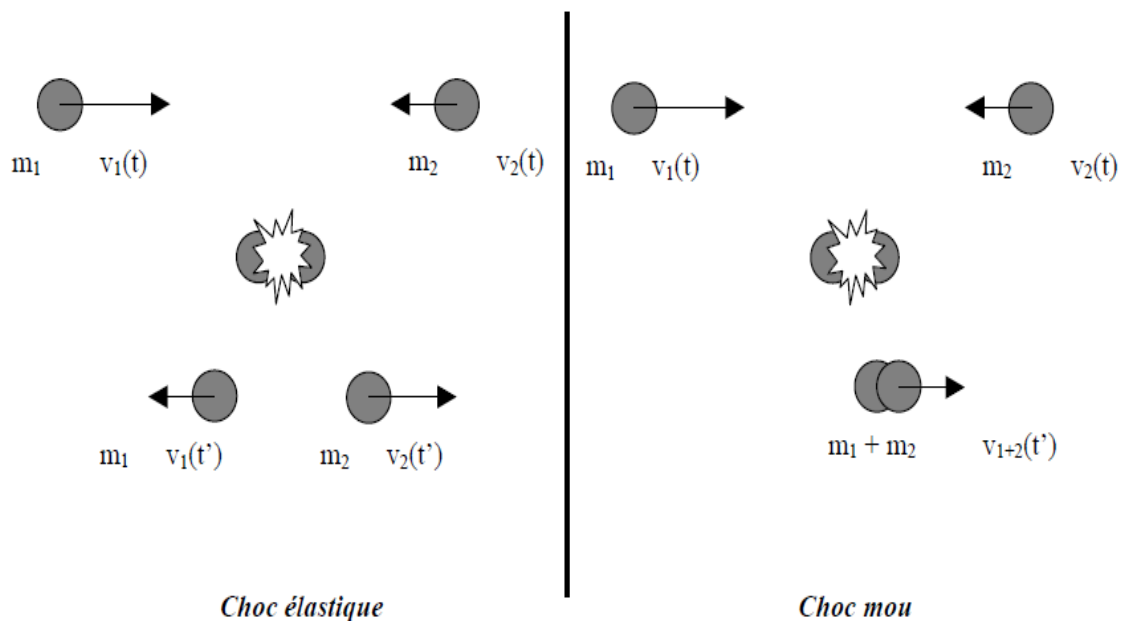


Figure 1.10 : Chocs mou et élastique de masses ponctuelles

En effet, ce n'est pas en premier lieu les forces de chocs qui nous intéressent. D'ailleurs, elles sont difficiles à évaluer à cause de leur brièveté et de leur intensité. Pour un choc direct, la conservation de la quantité de mouvement s'écrit donc de manière algébrique :

$$m_1 v_1(t) + m_2 v_2(t) = m_1 v_1(t') + m_2 v_2(t') \quad (1.2)$$

Mais dans le cas du choc élastique, cela ne suffit pas à déterminer les vitesses après impact. Huygens introduisit la conservation, non plus seulement de mv , mais de mv^2 , ce qui revient à écrire la conservation de l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2(t) + \frac{1}{2} m_2 v_2^2(t) = \frac{1}{2} m_1 v_1^2(t') + \frac{1}{2} m_2 v_2^2(t') \quad (1.3)$$

Il est alors possible d'obtenir les vitesses au temps t' :

$$v_1(t') = \frac{2m_2 v_2(t) + [m_1 - m_2] v_1(t)}{m_1 + m_2} = v_1(t) - 2 \frac{v_1(t) - v_2(t)}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \quad (1.4)$$

$$v_2(t') = \frac{2m_1 v_1(t) - [m_1 - m_2] v_2(t)}{m_1 + m_2} = v_2(t) + 2 \frac{v_1(t) - v_2(t)}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \quad (1.5)$$

Dans le cas du choc mou, la conservation de la quantité de mouvement donne directement la vitesse finale des deux corps :

$$v_{1+2}(t') = \frac{m_1 v_1(t) + m_2 v_2(t)}{m_1 + m_2} \quad (1.6)$$

Si on fait le bilan de l'énergie dissipée au cours du choc mou, on obtient :

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2(t) + \frac{1}{2} m_2 v_2^2(t) - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_{1+2}^2(t') = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} [v_1(t) - v_2(t)]^2 \geq 0 \quad (1.7)$$

Il y a bien dissipation d'énergie. Mais en réalité, il existe beaucoup d'autres types de choc où il y a dissipation d'énergie. Ainsi, pour traiter tous les cas intermédiaires entre choc élastique et choc mou, il est possible d'introduire un coefficient de restitution d'énergie défini par :

$$\varepsilon = - \frac{v_1(t') - v_2(t')}{v_1(t) - v_2(t)} \quad (1.8)$$

Les chocs mous ainsi que les chocs élastiques sont évidemment des cas particuliers où le coefficient de restitution prend respectivement les valeurs 0 et 1. L'énergie dissipée s'écrit alors :

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2(t) + \frac{1}{2}m_2v_2^2(t) - \frac{1}{2}m_1v_1^2(t') + \frac{1}{2}m_2v_2^2(t') =$$

$$\frac{1}{2} \frac{m_1m_2}{m_1+m_2} (1 - \varepsilon^2) [v_1(t) - v_2(t)]^2 \geq 0 \quad (1.9)$$

On peut voir que le choc mou correspond à l'impact où l'énergie dissipée est maximale.

Cette définition basique des chocs mous peut être appliquée aux impacts d'avion. Elle n'est cependant pas assez précise pour caractériser complètement de tels impacts. En effet cette approche ne permet pas de savoir en quoi les caractéristiques des matériaux influent sur le type de choc ni de distinguer les chocs mous des chocs durs, que l'on définirait intuitivement comme un impact où un corps très résistant percute à forte vitesse l'autre corps et l'endommage sans être lui-même détérioré. Autant le choc élastique est clairement défini, autant pour le choc mou, il reste à préciser où se dissipe l'énergie et si les différents corps sont endommagés ou non.

1.4.3. Choc mou, déplacements et force d'impact

Dans la distinction qui vient d'être explicitée entre choc élastique et choc mou, les deux corps qui entrent en contact jouent un rôle symétrique. Or si on considère un impact d'avion sur une structure en béton ou plus généralement un impact de projectile déformable sur une structure rigide, il est évident qu'il n'y a pas symétrie dans le choc. Pas de symétrie parce qu'un des corps est immobile et l'autre en mouvement, pas de symétrie non plus si on examine les matériaux, la nature des structures ou leur mode de ruine. Pas de symétrie enfin parce que du point de vue de celui qui cherche à garder intègre sa structure en béton, le sort de l'avion lui importe moins que la ruine du béton armé soumis à l'impact.

Dans la suite de ce document, on désigne donc naturellement l'avion comme le projectile et la structure en béton armé comme la cible immobile juste avant l'impact.

Cette dissymétrie de comportement entre le projectile et la cible au cours de l'impact conduit à une nouvelle caractérisation des chocs mous. Cette classification est basée sur une modélisation avec des systèmes de masse-ressort (**Figure 1.11**).

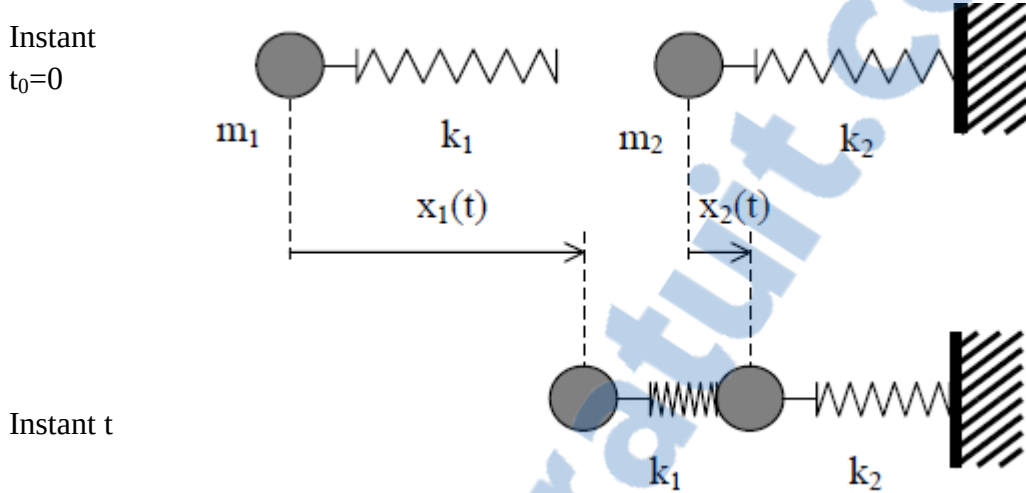


Figure 1.11 : Modélisation d'un choc avec systèmes masse-ressort

Soient deux solides rigides de masses m_1 et m_2 , K_1 et K_2 les raideurs des ressorts associées. Les équations différentielles décrivant le mouvement s'expriment ainsi :

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1(t) + k_1 [x_1(t) - x_2(t)] = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2(t) - k_1 [x_1(t) - x_2(t)] + k_2 x_2(t) = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Si le déplacement de la cible est faible par rapport au projectile, c'est à dire si : $x_1(t) \gg x_2(t)$, alors, en posant :

$$F(t) = k_1 x_1(t) \quad (1.11)$$

Les équations du mouvement s'écrivent :

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2(t) + k_2 x_2(t) = F(t) \end{cases} \quad (1.12)$$

Le problème est maintenant découplé : il est possible de résoudre d'abord la première équation qui est indépendante de x_2 , d'en déduire $F(t)$ et enfin de calculer la réponse de la cible à partir de la seconde équation. Ce cas est appelé choc mou par contraste, les cas où les deux équations ne peuvent pas être découplées sont qualifiés par Eibl (**Eibl, 1987**) de chocs durs.

On peut noter au passage qu'il n'a pas été fait d'hypothèse sur la linéarité des ressorts. Cette approche est par conséquent tout à fait applicable aux cas de matériaux au comportement non-linéaire.

Des essais en grandeur réelle ont montré que lors d'un impact d'avion sur une structure en béton armé, le projectile s'écrase complètement et les déplacements et déformations de la cible sont faibles comparés aux déplacements et déformations de l'avion.

En accord avec la définition des chocs mous donnée par Eibl, cette constatation nous permet de traiter le problème de manière découplée, en commençant par estimer la force d'impact et ensuite en procédant à un calcul de toute la structure en béton armé soumise à cette force d'impact.

Pour déterminer la force d'impact d'un avion, on utilise classiquement l'approche de Riera (**Riera 1968**) (**Figure 1.12**):

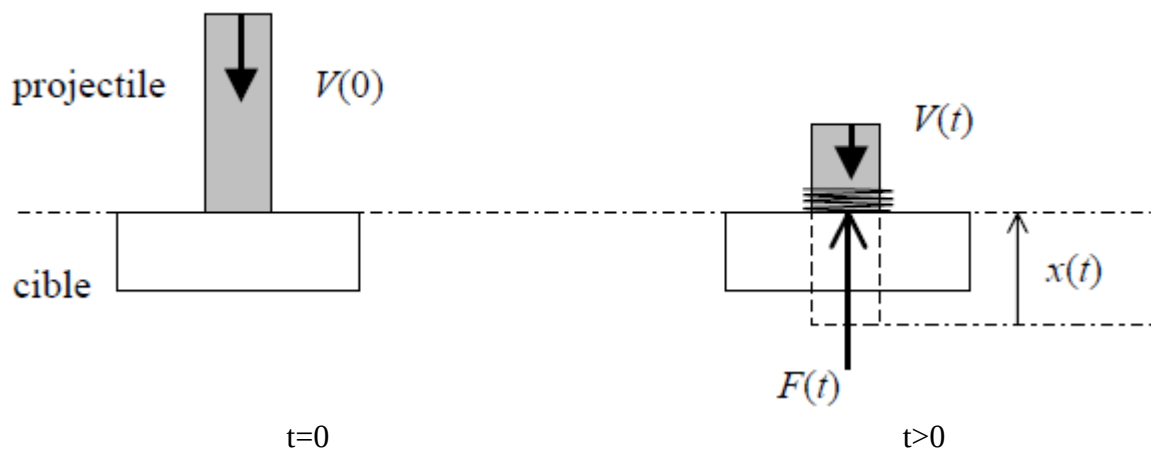


Figure 1.12 : Modélisation d'un choc mou : détermination de la force d'impact

Pour un projectile ayant une force de flambage P_f et une masse linéique μ s'écrasant perpendiculairement sur une cible rigide à une vitesse V , Riera explique que la force d'impact F peut se décomposer en deux termes : l'un venant du flambage, l'autre de l'effet inertiel de la masse.

$$F(t) = P_f(x(t)) + \mu(x(t))V(t)^2 \quad (1.13)$$

Avec :

- ✓ $x(t)$: la distance écrasée (en partant du nez du projectile).

En vertu du découplage du système **(1.10)**, cette force peut être ensuite appliquée à la structure en béton armé dans un calcul éléments finis en dynamique transitoire. Des expressions plus complètes de la force d'impact ont été proposées, comme :

$$F(t) = P_f(x(t)) + \alpha \mu(x(t)) V(t)^2 \quad (1.14)$$

Où se trouve un coefficient α dit de « masse effective sur l'impact » dont on peut démontrer qu'il est compris entre 0,5 et 1. Les essais l'ont identifié à 0,9 sur un impact de F-4 Phantom. La formule **(1.13)** donnée par Riera est donc conservative.

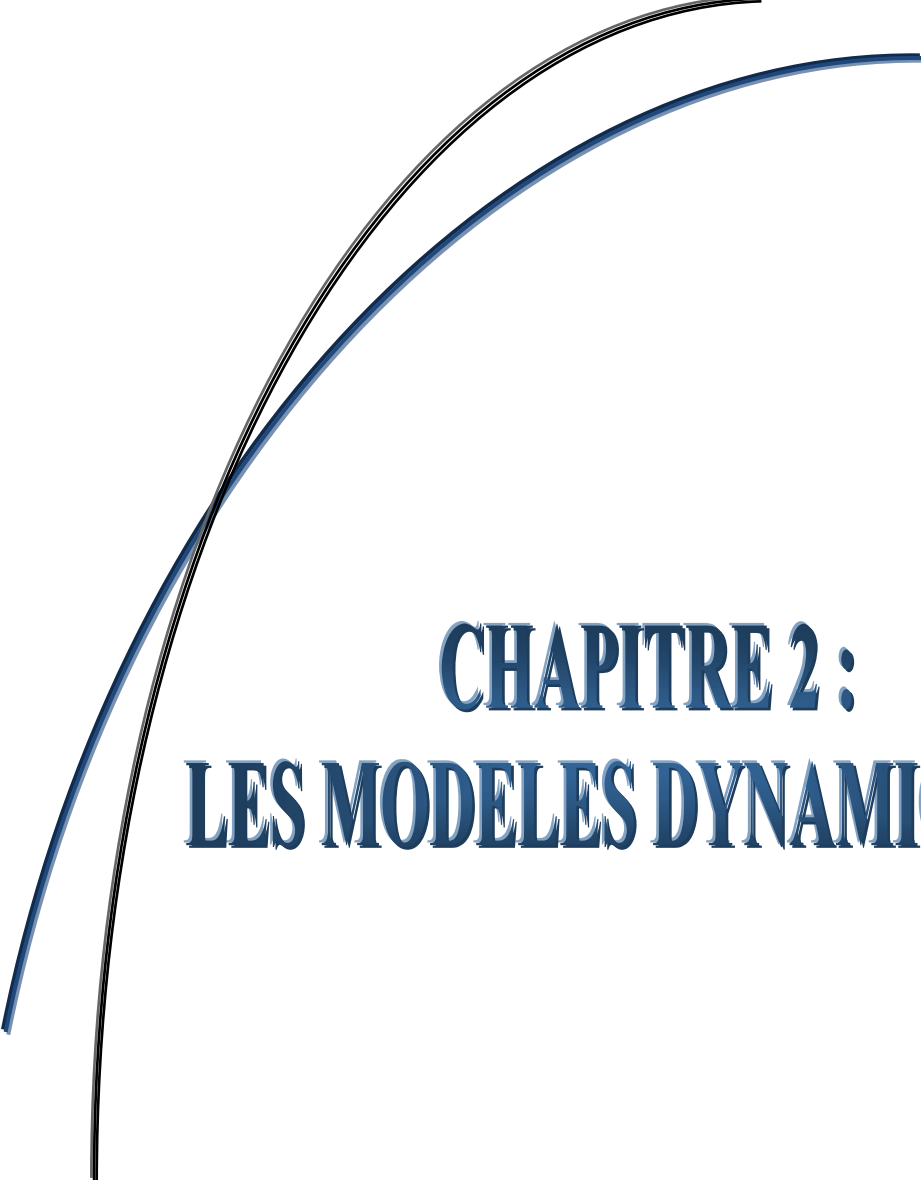
On définit la force d'impact par :

$$F(t) = k_1 [x_1(t) - x_2(t)] \quad (1.15)$$

Sa valeur au cours du temps peut être trouvée en résolvant le système masse-ressort couplé **(1.10)**. Puis, comme dans le cas où les déplacements de la cible sont négligeables, il est possible d'appliquer cette force à un modèle élément fini de la structure en béton. Il reste à vérifier que les déplacements de la cible au droit de l'impact sont analogues à ceux trouvés avec le système masse ressort. Dans un tel processus de calcul chaîné, on constate que la force varie peu en fonction du recul de la cible (ou de sa rigidité), sachant que le projectile est nettement plus souple que la cible. En revanche l'énergie transmise à la structure impactée va fortement dépendre de la raideur de la cible.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre une vue générale sur le comportement dynamique du béton a été présentée ainsi que l'impact dynamique et ses différents effets sur le béton. Dans le deuxième chapitre nous allons nous intéresser aux modèles dynamiques qui peuvent décrire la réponse d'un matériau à une sollicitation mécanique.



CHAPITRE 2 : **LES MODELES DYNAMIQUES**

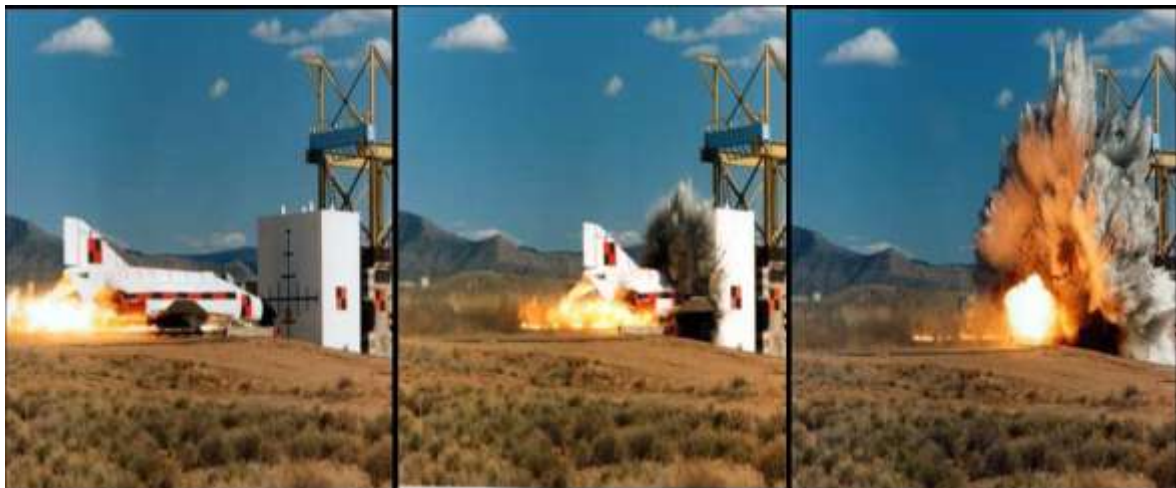
2.1. Introduction

Lors de leur conception, les structures de génie civil assurant la fonction de protection de matériels sensibles sont dimensionnées pour résister à des situations accidentelles mettant en jeu des chargements dynamiques violents (explosions, impacts).

Dans cette catégorie de structures on trouve par exemple la coque avion recouvrant les bâtiments les plus sensibles d'une centrale nucléaire constituée de béton fortement renforcé par des armatures passives et des câbles de précontrainte, elle garantie une protection efficace contre les agressions externes, notamment en cas de chute d'avions militaires ou commerciaux.

Le besoin de prédire le comportement mécanique de ce type de structure et d'évaluer son niveau d'endommagement lors des situations extrêmes nécessite de faire appel à la modélisation numérique avec des modèles matériaux fiables et robustes. En effet, il n'est pas possible de recourir de façon systématique aux essais grandeur nature (**figure 2.1**) à cause de leur coût prohibitif.

Afin d'étudier le comportement des structures en béton, plusieurs programmes de recherche ont été réalisés ces dernières années. On va citer dans ce chapitre quelques modèles dans le cadre de calcul des structures soumises à des chargements dynamiques rapides.



*Figure 2.1: Essai d'impact d'un avion sur un mur en béton armé
(vitesse d'impact 215 m/s)*

2.2. Modèles macroscopiques pour le béton en dynamique

Concernant les lois de comportement s'appliquant à la mécanique, plusieurs modèles sont possibles :

✓ Les modèles analogiques

Ceux qui décrivent, sur la base de comportements élémentaires unidimensionnels (ressort, amortisseur,...), les propriétés uniaxiales des matériaux.

Ces modèles sont généralement simples, cependant le passage à un comportement tridimensionnel est délicat, ce qui en restreint l'utilisation (**GATUINGT, 1999**).

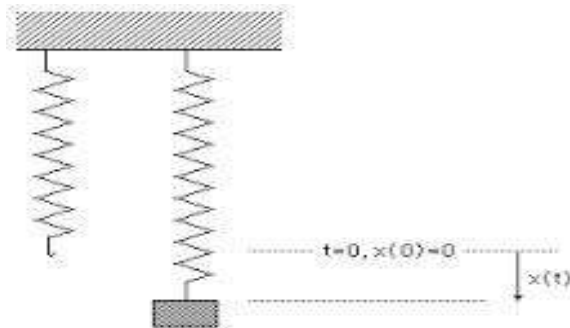


Figure 2.2.système masse ressort

✓ Les modèles de comportement provenant de lissage de courbes expérimentales :

Ces modèles sont performants dans la description des essais qui ont permis leur identification mais ne permettent malheureusement pas une description générale du comportement d'un matériau. En effet, ces modèles de comportement ne s'appuient sur aucune théorie qui permettrait de les étendre à d'autres chargements que ceux qui ont été utilisés pour leur identification.

✓ Les modèles phénoménologiques

Qui décrivent des phénomènes physiques ; qui ont pour objectif, quelque soit le chargement appliqué pourvu que les phénomènes qu'ils modélisent soient actifs, d'être représentatifs du comportement. L'origine physique de ces phénomènes est toujours microscopique (glissement de plans cristallins, fermeture de la porosité, ouverture de micro-fissures, . . .), tandis que la description mathématique qui en est faite peut être soit

"micro", soit "macro" en considérant le milieu comme un milieu continu. Ces modèles sont performants pour la description de multiples phénomènes mais ont, malheureusement, une complexité accrue à mesure que le nombre de phénomènes décrits augmente.

2.3. Modélisation du comportement du béton en dynamique

Lorsqu'on soumet un milieu continu à des sollicitations extérieures (mécaniques et/ou thermiques), il en résulte un changement de sa position et de son état thermomécanique.

Ces changements diffèrent selon le milieu physique que l'on étudie. Les lois de comportement sont les lois qui régissent la réaction du milieu aux sollicitations extérieures et complètent les équations du mouvement (avec leurs conditions initiales) afin de résoudre le problème posé.

2.3.1. Modèles visco-plastiques

La formulation générale d'un modèle de visco-plasticité est définie de façon quasi-identique à celle d'un modèle de plasticité. Seules les règles de détermination du multiplicateur plastique $\dot{\lambda}$ sont modifiées.

En plasticité, l'état de contrainte correspond soit à un état élastique $f(\sigma) < 0$ (à l'intérieur de la surface d'élasticité), soit à un état plastique $f(\sigma) = 0$ (sur la surface d'élasticité). Cela change lorsque l'on prend en compte l'influence de la vitesse de déformation, car tous les points sur ou à l'extérieur de cette surface correspondent au domaine visco-plastique.

$$f(\sigma) = \sigma_v \geq 0. \quad (2.1)$$

D'où :

- ✓ σ_v : la contrainte visqueuse ;
- ✓ $f(\sigma)$: la fonction seuil.

La règle de normalité définit toujours l'évolution temporelle des déformations irréversibles ε^p lorsque l'état de contrainte correspond à un état visco-plastique $f(\sigma) \geq 0$. Le modèle de Norton-Perzyna (**Perzyna, 1966**) donne une expression de la contrainte visqueuse sous la forme :

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (2.2)$$

Avec :

✓ $F =$ potentiel d'évolution pour le cas associé :

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = \langle f/m \rangle^n \text{ si } f \geq 0 \\ \dot{\lambda} = 0 \quad \text{si } f < 0 \end{cases}$$

2.3.2. Modélisation du comportement visco-endommageable

Pour introduire de la viscosité dans des modèles d'endommagement, deux grandes méthodes sont généralement utilisées. La première consiste à faire dépendre la limite d'élasticité (égale au seuil d'endommagement) de la vitesse de déformation. Selon Pontiroli (**Pontiroli, 1995**), pour un chargement en quasi-statique, ce seuil d'endommagement reste constant ($k = k_0$), alors qu'en dynamique la formulation du seuil $k = k_{dyn}$ dépend de la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$.

La deuxième méthode, plus couramment utilisée, est à l'image des modèles de visco-plasticité. La loi d'évolution de l'endommagement est modifiée afin d'autoriser les états de charge à l'extérieur de la surface seuil. Pour reproduire l'effet de vitesse, une loi visqueuse sous la forme :

$$D_v = D_v(\dot{\varepsilon}_{eq}) \quad (2.3)$$

Elle est introduite dans la fonction critère de la manière suivante (**Leroux, 2012**) :

$$\begin{cases} f = g(\varepsilon_{eq}) - D < 0 & \text{Élasticité} \\ f = g(\varepsilon_{eq}) - D = D_v \geq 0 & \text{Visco-endommagement} \end{cases}$$

Avec :

✓ ε_{eq} : déformation équivalente ;

✓ $D_v = m\dot{D}^{1/n}$; m et n sont des paramètres de viscosité.

2.3.2.1. Exemple d'un modèle visco-endommageable avec prise en compte de l'effet de vitesse (Modèle de J.F.Dubé)

Ce modèle développé par Dubé (**Dubé, 2005**) est tiré du modèle de comportement du béton tridimensionnel écrit par (**C. La Borderie, 1991**). Ce modèle de comportement est développé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles.

Pour les problèmes courants de mécanique, on travaille soit avec le potentiel de Helmholtz Ψ soit avec celui de Gibbs χ .

Ces deux potentiels sont différents par les variables utilisées :

✓ $\Psi = \Psi(\varepsilon, D, z)$ Helmotz ;

✓ $\chi = \chi(\sigma, D, z)$ Gibbs ;

Le comportement est élastique endommageable à caractère unilatéral, piloté par deux variables d'endommagement scalaires d_t et d_c . On peut résumer le modèle par l'expression suivante :

$$\epsilon = \underbrace{\frac{\sigma^+}{E_0(1-d_t)} + \frac{\sigma^-}{E_0(1-d_c)} + \frac{\nu}{E_0}(\sigma - (Tr\sigma))}_{\text{« Déformation élastique du matériau endommagé »}} + \underbrace{\frac{\beta_t d_t}{E_0(1-d_t)} \frac{\partial g}{\partial \sigma} + \frac{\beta_c d_c}{E_0(1-d_c)}}_{\text{« déformation anélastique »}} \quad (2.4)$$

« Déformation élastique du matériau endommagé » + « déformation anélastique »

D'où :

- ✓ E_0 : le module d'Young initial ;
- ✓ ν : le coefficient de Poisson ;
- ✓ σ^+ et σ^- : sont respectivement le tenseur des contraintes positif et le tenseur des contraintes négatif (composé par les termes positifs de la diagonale pour l'un et négatifs pour l'autre, dans le repère principal) ;
- ✓ d_t et d_c : sont respectivement les variables d'endommagement en traction et compression, piloté par les taux de restitution d'énergie Y_t et Y_c définis ci-dessous ;
- ✓ β_t et β_c : sont des constantes ;
- ✓ $g(\sigma)$: une fonction qui gère la refermeture des fissures.

Le taux de restitution d'énergie relatifs à la partie positive et négative du tenseur de contrainte principale sont :

$$Y_t = \frac{\partial \chi}{\partial d_t} = \frac{\sigma^+ : \sigma^+ + 2\beta_t g(\sigma)}{2E_0(1-d_t)^2} \text{ et } Y_c = \frac{\partial \chi}{\partial d_c} = \frac{\sigma^- : \sigma^- + 2\beta_c Tr(\sigma)}{2E_0(1-d_c)^2} \quad (2.5)$$

D'où :

$$\chi = \frac{\sigma^+ : \sigma^+}{E_0(1-d_t)} + \frac{\sigma^- : \sigma^-}{E_0(1-d_c)} + \frac{\nu}{E_0} (\sigma : \sigma - (Tr \sigma^2)) + \frac{\beta_t d_t}{E_0(1-d_t)} g(\sigma) + \frac{\beta_c d_c}{E_0(1-d_c)} Tr(\sigma) + G(Z_t) + G(Z_c) \quad (2.6)$$

L'évolution de l'écrouissage est définie par :

$$Z_i = \frac{\partial \chi}{\partial Z_i} = \frac{1}{A_i} \left(\frac{-Z_i}{(1+Z_i)} \right)^{1/B_i}; (i = t, c) \quad (2.7)$$

✓ A_i et B_i : sont des paramètres du matériau ;

L'effet de la vitesse de chargement peut être introduit dans l'évolution de l'endommagement, selon les équations :

$$\varepsilon = \rho \frac{\partial \chi}{\partial \sigma} \quad \text{ou} \quad \sigma = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon} \quad (2.8)$$

$$Y = \rho \frac{\partial \chi}{\partial D} \quad \text{ou} \quad Y = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial D} \quad (2.9)$$

Les évolutions des variables d'endommagement et d'écrouissage sont définies à partir de la fonction seuil : $F_i = Y_i - Z_i - Y_{0i}$ d'où Y_{0i} est le seuil initial, par :

$$\begin{cases} \dot{d}_i = \dot{\lambda}_i \frac{\partial F_i}{\partial Y_i} = \dot{\lambda}_i \\ \dot{z}_i = \dot{\lambda}_i \frac{\partial F_i}{\partial Z_i} = -\dot{\lambda}_i \end{cases} \quad (2.10)$$

Alors on tire : $\dot{d}_i = -\dot{z}_i$

Avec :

✓ $\dot{\lambda}_i$: le multiplicateur d'endommagement : $\dot{\lambda}_i = \left(\frac{(Y_i - Z_i - Y_{0i})^{n_i}}{m_i} \right)$;

D'où :

✓ m_i et n_i : des paramètres du modèle fonctions du matériau, $i = t$ ou c .

D est donc solution d'une équation différentielle dont la solution n'est pas triviale et qui est résolue numériquement :

$$\dot{D}_i = \left(\frac{(Y_i(D_i, \sigma) - Z_i(D_i) - Y_{0i})}{m_i} \right)^{n_i} \quad (2.11)$$

La dissipation est définie par :

$$\phi = \frac{\partial \chi}{\partial D} \dot{D} + \frac{\partial \chi}{\partial z} \dot{z} \quad (2.12)$$

D'où :

$$\checkmark \quad \phi = Y\dot{D} + Z\dot{z} = \dot{D}(Y - Z) ;$$

$\dot{D}$ est par définition positif ou nul donc le produit $\dot{D}(Y - Z)$ est positif ou nul.

2.3.3. Modèles visco-plastiques visco-endommageables

Après avoir présenté les modèles visco-plastiques et les modèles visco-endommageables séparément, le couplage entre ces 2 types de modèle est défini au travers de la loi de comportement développée par **(Gatuingt, 1999)** pour des applications d'impact sur des structures en béton. La partie visco-endommagement fait intervenir un endommagement de compression et un endommagement de traction. Elle permet de représenter de façon réaliste le comportement en compression simple tout en conservant une bonne description de ce qui se passe en traction.

La partie visco-plasticité, elle permet de représenter les déformations irréversibles alors que l'effet de vitesse permet de prendre en compte le phénomène d'augmentation de la résistance en compression triaxiale (phénomène de compaction en dynamique).

Concernant la partie visco-endommagement, la loi de comportement utilisée est une loi élastovisco- endommageable faisant intervenir un endommagement scalaire D. La loi d'élasticité s'écrit :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} = K(\Phi)tr\varepsilon^e 1 + 2G(\Phi)\varepsilon^{eD} \quad (2.13)$$

Avec :

$$\checkmark \quad \varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^p ;$$

D'où :

- ✓ $\varepsilon, \varepsilon^e, \varepsilon^p$ et ε^{eD} : sont respectivement les déformations totale, élastique, plastique et élastique déviatorique.
- ✓ $K(\Phi)$, $G(\Phi)$: respectivement le module de compressibilité et le module de cisaillement, permettant ainsi de prendre en compte la porosité du matériau.

L'endommagement D est formulé avec une combinaison linéaire d'un endommagement de compression D_c et un endommagement de traction D_t :

$$D = \alpha_c D_c + \alpha_t D_t \quad (2.14)$$

D'où :

- ✓ α_c et α_t : sont des fonctions de type de chargement.

A partir des travaux de Mazars et La Borderie (**Mazars, 1984**) et (**La Borderie, 1991**), les fonctions seuils d'endommagement sont écrites en fonction de ε^e :

$$f_D^{t,c}(\hat{\varepsilon}^e) = \hat{\varepsilon}^e - k_0 - \frac{1}{a_{t,c}} \left(\frac{D_{t,c}}{1-D_{t,c}} \right)^{1/b_{t,c}} \text{ et } \hat{\varepsilon}^e = \sqrt{\langle \varepsilon^e \rangle_+ : \langle \varepsilon^e \rangle_+} \quad (2.15)$$

Avec :

- ✓ $\hat{\varepsilon}^e$: la déformation équivalente élastique ;
- ✓ k_0 : le seuil initial d'endommagement ;
- ✓ a_c, a_t, b_c et b_t : sont des paramètres matériaux ;

L'effet de vitesse dans les deux lois d'évolution de l'endommagement (compression et traction) est basé sur le modèle visco-endommageable développé par Dubé en 1994 (**Dubé, 1994**). La forme de ces lois est la suivante :

$$\dot{D}_{t,c} = \left\langle \frac{f_D^{t,c}(\hat{\varepsilon}^e)}{m_{D_{t,c}}} \right\rangle_+^{n_{D_{t,c}}} = \left\langle \frac{\hat{\varepsilon}^e - k_0 - \frac{1}{a_{t,c}} \left(\frac{D_{t,c}}{1-D_{t,c}} \right)^{1/b_{t,c}}}{m_{D_{t,c}}} \right\rangle_+^{n_{D_{t,c}}} \quad (2.16)$$

Avec :

- ✓ $n_{D_t}, n_{D_c}, m_{D_t}$ et m_{D_c} : les quatre paramètres matériau permettant de donner la vitesse de déformation.

2.4. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la représentation de quelques modèles qui décrivent le comportement de béton sous des chargements dynamiques rapides. Nous avons proposé quelques rappels sur les bases des modèles de comportement, suivis d'une revue de modèles de comportement du béton, dont certains sont particulièrement adaptés aux sollicitations dynamiques.

Nous pouvons donc dire que représenter un comportement consiste à traduire, mathématiquement et le plus fidèlement possible, la réponse d'un matériau à une sollicitation mécanique.



CHAPITRE 3 : IMPACT D'AVION SUR UNE ENCEINTE DE CONFINEMENT

3.1. Introduction

Lors de la conception d'ouvrages sensibles tels que les centrales nucléaires, on se doit de prendre en compte différents aspects relatifs à la sûreté. Les premiers risques que l'on peut citer sont les accidents internes tels que les risques de fuites radioactives, de ruptures de tuyauteries, d'explosions internes...etc. En effet aujourd'hui de nouveaux scénarios doivent être pris en compte, comme par exemple : l'accident survenu le 28 juillet 1945, ce jour là un bombardier de type B-25 avait percuté accidentellement et pour cause de mauvaise visibilité, le plus haut gratte ciel de NEW YORK à l'époque, l'Empire State Building aussi le détournement d'un avion de ligne et sa chute sur un bâtiment à l'instar des événements dramatiques qui se sont déroulés à New York le 11 septembre 2001(**Figure 3.1**) (**Bertrand MAUREL, 2008**).

Le contexte de l'étude présentée dans ce chapitre s'articule autour de cette problématique de l'impact d'avion sur une enceinte de confinement. On présente dans la première partie ; le rôle et les divers types d'enceintes de confinements .Ensuite ; on indique les matériaux nécessaires pour la construction de l'enceinte .Enfin ; on cite les caractérisations des impacts d'avions et les règles fondamentales de la sûreté applicables aux installations nucléaires ainsi les conséquences éventuelles d'une chute d'avion sur une centrale nucléaire.

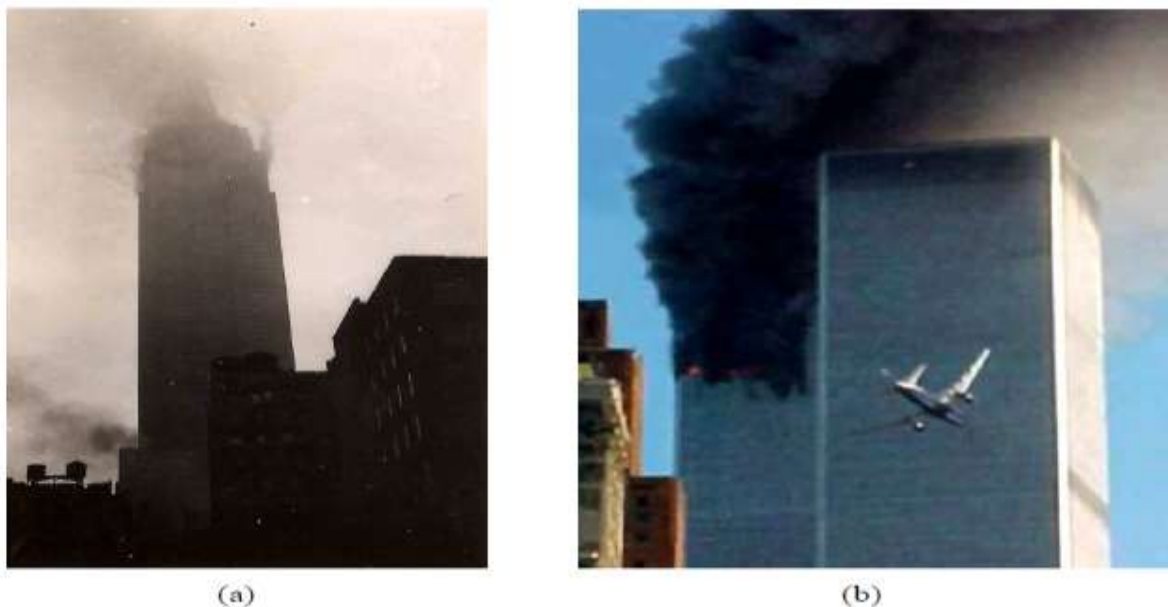


Figure 3.1 :a) Empire State building en feu après l'impact d'un boeing b25 (juillet 1945)-b) Attentats du World Trade Center (septembre2001)) (Bertrand MAUREL, 2008)

3.2. Aspect et rôle structural des enceintes de confinement

Depuis la catastrophe du 11 septembre 2001, les concepteurs de bâtiments à risque comme les centrales nucléaires intègrent à leur cahier des charges le risque de chute d'avion de ligne. Les structures étudiées dans le cadre de la collaboration avec EDF et R&D concernent donc plutôt les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Dans le cas des réacteurs nucléaires, trois « barrières » successives ont été retenues à la conception:

- ✓ La première barrière, constituée par les gaines des éléments combustibles,
- ✓ La deuxième barrière, constituée par l'enveloppe du circuit primaire,
- ✓ L'enceinte de confinement est la troisième et dernière barrière de sécurité du réacteur. Elle est conçue pour limiter les fuites d'éléments radioactifs dans l'environnement en cas d'accident majeur.

Il existe des enceintes de confinement de formes différentes, mais ces formes ne sont pas due au hasard, elles sont en fonction de la force à répartir pour soutenir au mieux la construction en cas de problème.

Les dimensions de ce type de bâtiment sont de l'ordre de 60-70m de hauteur sur 50m de diamètre (**Figure 3.2**). Les bâtiments réacteurs sont généralement composés de deux enceintes en béton armé, une enceinte interne étanche en béton précontraint et l'enceinte extérieure dédiée à la protection contre les impacts et chocs externes. L'épaisseur de ces enceintes peut atteindre 70 à 90 cm. Ces bâtiments sont le plus souvent cylindriques avec un dôme mais les géométries peuvent être assez différentes (**Figure 3.3**).

Comme on peut le remarquer sur **les Figures 3.2 et 3.3**, les tailles et les géométries des enceintes de confinement varient d'une centrale à une autre. Cependant, les dimensions des enceintes sont toujours très importantes par rapport à l'épaisseur des murs. De ce fait, ces bâtiments sont souvent assimilés à des structures minces et donc représentés classiquement par des coques.

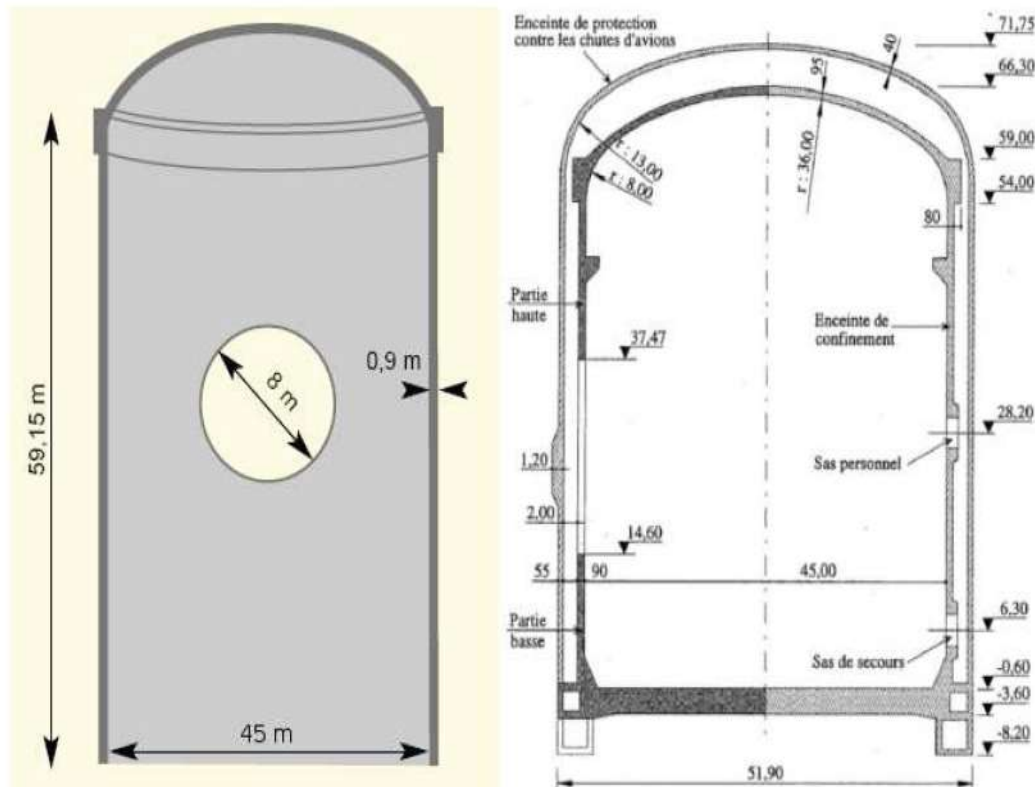


Figure 3.2 : Dimensions du bâtiment réacteur de Flamanville (à gauche) et des enceintes d'un réacteur REP(réacteur à eau pressurisée) 1300MWe (à droite)

(Jessica ROUSSEAU, 2009)

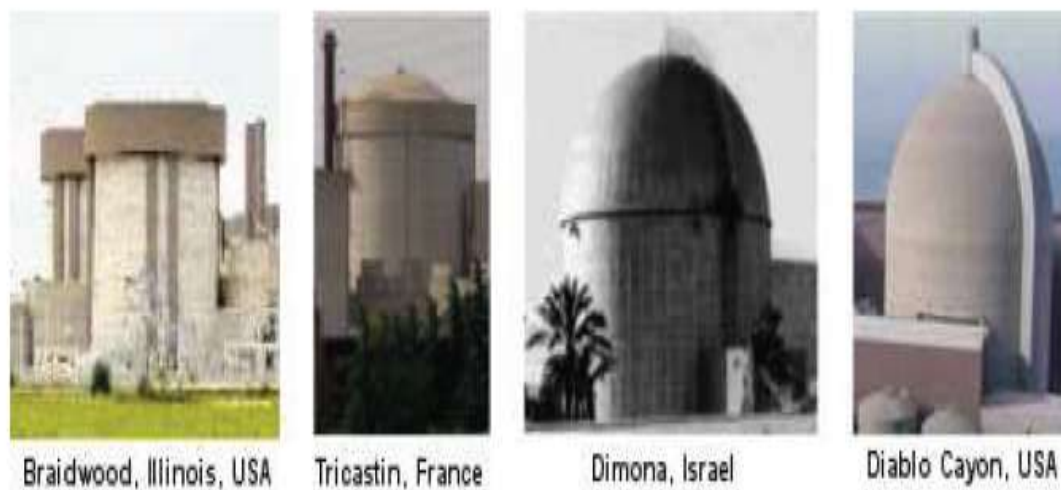


Figure 3.3 : Différentes géométries d'enceintes de confinement

(Jessica ROUSSEAU, 2009)

3.2.1. Les divers types d'enceintes de confinements

3.2.1.1. Les enceintes à paroi unique du palier 900 MWe

Les enceintes de confinement du projet REP 900 sont composées principalement d'un bâtiment cylindrique en béton précontraint de 37 m de diamètre et de 59 m de hauteur.

L'épaisseur de la paroi de la jupe cylindrique est de 0,90 m, celle du dôme de 0,80 m. Le radier d'une épaisseur de 3,50 m est en béton armé (**figure 3.4**).

Ce bâtiment contient les structures internes en béton armé de supportage des principaux équipements tels que le réacteur, les générateurs de vapeur, les pompes primaires, la piscine de chargement et de déchargement du combustible, etc. Ces matériels sont introduits dans le bâtiment par un orifice de 7,40 m de diamètre disposé au niveau du plancher de service à + 20 m par l'intermédiaire d'un portique de manutention extérieur. À l'intérieur, en console, sur la face interne de l'enceinte, un pont d 3 500 KN permet leur mise en place (**Jean-Louis Costaz, 1997**).

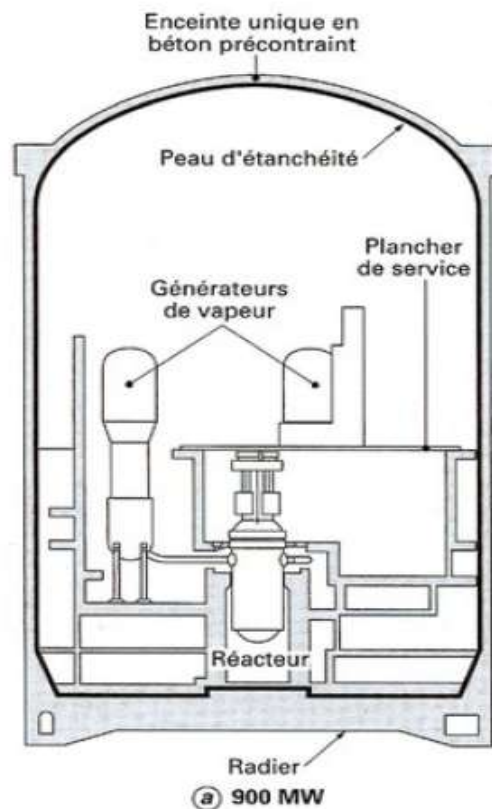


Figure 3.4 : schéma de l'enceinte à paroi unique (Jean-Louis Costaz 1997)

3.2.1.2. Les enceintes à double paroi des paliers 1300 MWe et 1450 MWe(N4)

La paroi interne (120 cm d'épaisseur pour le cylindre et 82 cm pour le dôme) est en béton précontraint et n'est pas recouverte d'une peau d'étanchéité. La plus grande partie des fuites est récupérée dans l'espace entre parois (également appelé espace annulaire, ou EEE) maintenu en dépression par un système de ventilation et filtration appelé EDE. La paroi externe en béton armé (55 cm d'épaisseur pour le cylindre et 40 cm pour le dôme) a pour fonction de créer l'espace annulaire et d'apporter la protection nécessaire vis-à-vis des agressions externes. La relative étanchéité de la paroi interne est vérifiée lors des épreuves de l'enceinte. Dans ces conditions d'essai, le taux de fuite est normalement limité à 1 % par jour de la masse d'air contenue dans l'enceinte, sans que puisse être faite une corrélation précise entre la valeur réelle et la limite réglementaire.

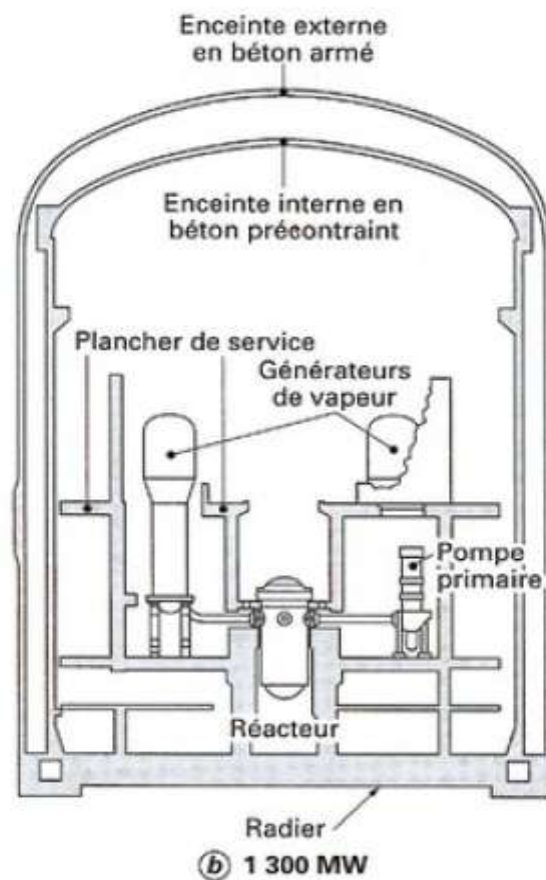


Figure 3.5 : schéma de l'enceinte à double paroi (Jean-Louis Costaz , 1997)

3.2.2. Le rôle de l'enceinte de confinement

La fonction de l'enceinte de confinement doit être analysée suivant quatre critères :

- ✓ Sa capacité à assurer le confinement, en fonctionnement normal, pour limiter les rejets radioactifs au quotidien à pression normale de fonctionnement (en légère dépression).
- ✓ Sa capacité à assurer le confinement, en fonctionnement accidentel, avec une montée en pression de l'enceinte pendant toute la durée de l'accident.
- ✓ Sa capacité à garder ses caractéristiques de résistance dans le temps (vieillessement).
- ✓ Sa capacité à résister mécaniquement à une agression physique extérieure.

Pour les enceintes de type 900 MWe, qui sont constituées d'une seule paroi en béton précontraint : cette paroi assure la résistance mécanique vis-à-vis de la pression de l'accident le plus sévère pris en compte à la conception et l'intégrité de la structure vis-à-vis d'une agression externe. L'étanchéité est, quant à elle, assurée par une peau métallique de faible épaisseur située sur la face interne de la paroi en béton.

Pour les enceintes de type 1300 MWe et 1450 MWe, qui sont constituées de deux parois : la paroi interne en béton précontraint et la paroi externe en béton armé, l'étanchéité est assurée par la paroi interne et le système de ventilation (EDE) qui collecte dans l'espace interpariétal les fuites éventuelles provenant de l'intérieur de l'enceinte ; la résistance aux agressions externes est principalement assurée par la paroi externe (**Grégory MULLER, 2008**).

3.3. Les matériaux constituant l'enceinte de confinement

La qualité et la durabilité du béton armé ainsi que la précontrainte sont primordiales dans la réalisation d'ouvrages nucléaires et nécessitent un savoir-faire spécifique.

3.3.1. Caractérisation du béton

L'emploi des bétons à haute performance se justifie pour toutes les constructions fortement sollicités et notamment pour les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire), on utilise des ciments à grande résistance (classe 42,5 ou 52,5), ou mieux encore des ciments à grande résistance au jeune âge (classe 42,5 R et 52,5 R), le dosage varie de 400 à plus de 600kg/m³.

Le béton assure à la fois la fonction de résistance et d'étanchéité. Il convient donc de soigner particulièrement sa composition (compacité) et sa mise en œuvre. Une attention spéciale doit être fournie au niveau des reprises de bétonnage (tous les 2,40 m). Une procédure de traitement de ces reprises a été établie et ces joints de reprise ne constituent plus des points faibles vis-à-vis de l'étanchéité. Un dispositif de contrôle et d'injection éventuelle a été utilisé sur toutes les enceintes

Dans le cas de la nouvelle génération de centrales (EPR), pour la première fois, une exigence sur la valeur du module d'Young a été imposée à $E = 39$ GPa pour garantir un niveau de déformations différées faible. Cette valeur est issue du retour d'expérience sur les mesures effectuées sur les enceintes du parc en exploitation.

3.3.2. Caractérisation de la précontrainte

Le béton, armé ou précontraint, est le matériau de référence utilisé pour la construction des ouvrages nucléaires. Dans le cas des enceintes de confinement, le béton armé précontraint est prévu pour remplir un rôle structural et de confinement (**Nanthilde REVIRON, 2009**). La précontrainte de l'enceinte de confinement constitue l'élément majeur du dimensionnement de la paroi. Le dimensionnement de principe de cette précontrainte reste assez simple, car il résulte fondamentalement d'un équilibre de force en section courante de la paroi cylindrique et du dôme, entre les actions externes et la capacité de résistance apportée par un câble. Dans le mode de réalisation des centrales nucléaires, la précontrainte par post tension est utilisable et elle s'applique sur le béton déjà durci. Les forces de précontraintes sont généralement créées par des câbles circulant librement dans la structure, mis en tension à partir de leurs extrémités par des vérins prenant appui sur la structure elle-même. La mise en tension du câble n'est effectuée qu'après que le béton est coulé et suffisamment durci pour pouvoir résister à l'effort de précontrainte, les zones qui nécessitent la précontrainte sont les points singuliers tels que les sas d'entrée, les goussets, etc...

La précontrainte des enceintes est réalisée à l'aide de câbles 19 T 15, système Freyssinet, d'une capacité de 3 000 KN utiles environ. Ces câbles sont constitués de 19 torons de 15 mm de diamètre en acier haute résistance de 1 860 MPa. On trouve trois types de câbles:

- ✓ Les câbles verticaux de la jupe, rectilignes en partie courante, déviés au niveau des différentes traversées ;

- ✓ Les câbles horizontaux de la jupe, d'une longueur égale aux $3/4$ de la circonférence, ancrés sur 4 nervures verticales ; ces câbles sont aussi déviés au niveau des différentes traversées ;
- ✓ Les câbles de dôme, répartis eux-mêmes en trois familles décalées entre elles de 120° .

3.4. Le risque de chute d'avion

Le 11 septembre 2001, une date qui a marqué un tournant dans la motivation, le modus opérande et l'échelle des conséquences d'un acte terroriste. Face à ce problème, certains peuvent penser que la chute d'un avion est un événement qui dépasse tout ce à quoi on peut s'attendre. Depuis cette catastrophe les concepteurs de bâtiments à risque comme les centrales nucléaires intègrent à leur cahier des charges le risque de chute d'avion de ligne.

3.4.1. Caractérisation des impacts d'avions (Jessica Rousseau, 2009)

Les impacts sont généralement classés selon le type de projectile. Un projectile rigide (missile) n'aura pas le même effet qu'un projectile déformable (avion). Pour ce qui nous intéresse, un avion militaire n'aura pas les mêmes effets qu'un avion commercial. La répartition des masses, les vitesses et les rigidités sont très différentes. Un Boeing 737 de ligne classique peut atteindre une masse de 75t et vole à une vitesse de croisière de 900km/h alors qu'un Mirage 2000 ne pèse pas plus de 25t et atteint des vitesses de l'ordre de 2000km/h. Les effets sur les structures impactées peuvent donc être très différents.

La Figure 3.6(b) montre des évaluations des fonctions de chargement lors d'impacts de différents avions. On peut voir que les durées d'impact sont très différentes ainsi que la forme de la fonction. L'impact d'un avion de ligne type Boeing peut être décomposé en plusieurs phases. Une première phase assez longue concerne l'écrasement du fuselage. Puis les ailes et les moteurs, plus massifs et plus rigides, impactent et donnent un pic de chargement. La fonction de chargement pour l'avion militaire est plus courte sans différenciation des phases car les masses sont plutôt concentrées autour des moteurs. A priori, l'épaisseur de la cible (le bâtiment) la rend plus rigide que le projectile (l'avion). Par conséquent, on peut penser que l'avion se déforme ou s'écrase au contact d'une cible rigide. Cette cible peut tout de même subir des dommages ou être perforée.

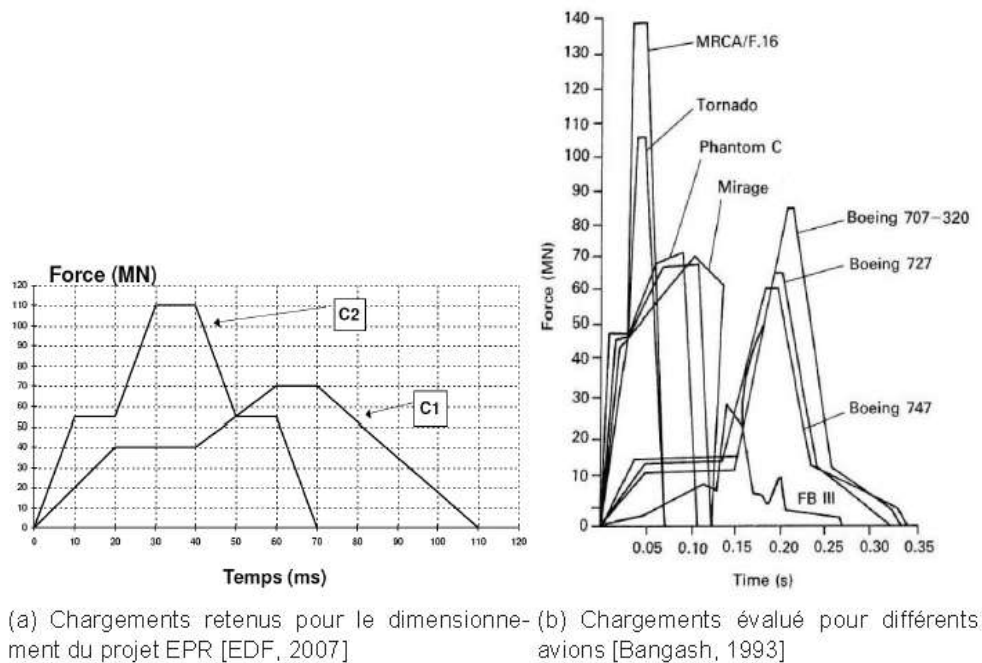


Figure 3.6 : Fonctions de chargement d'impacts d'avions

L'estimation des fonctions de chargement est le plus fréquemment effectuée par la méthode développée par Riera. Elle a été spécialement conçue pour évaluer le chargement dû à l'impact d'un projectile déformable sur une cible très rigide. La **Figure 3.7** montre un exemple d'évaluation de la force d'impact d'un Phantom F4-F à une vitesse de 130m/s.

Pour des raisons évidentes de coût et de taille, il n'existe que très peu de références expérimentales à l'échelle 1 d'impact d'avion. Le laboratoire américain (SANDIA Von) a réalisé un impact d'un Phantom F4 lancé à 215m/s sur un bloc massif en béton armé instrumentée. Les forces engendrées par le choc ont été évaluées à partir de données mesurées sur l'avion (**Figure 3.8(b)**). On peut voir que l'expérience confirme l'hypothèse de l'écrasement de l'avion contre la cible (**Figure 3.8(a)**).

Sur la **Figure 3.8(b)**, on peut remarquer que les fonctions de chargement évaluées à l'aide des données expérimentales sont très proches de celles calculées avec les formules de Riera. La **Figure 3.6(a)** montre les chargements retenus pour dimensionner les bâtiments du projet EPR [EDF, 2007] au risque de chute d'avion. La courbe C2 est plutôt représentative d'un impact d'avion militaire et sert à étudier la tenue de la cible à la perforation locale. La courbe C1 sert plutôt à étudier l'effet des vibrations induites dans la structure.

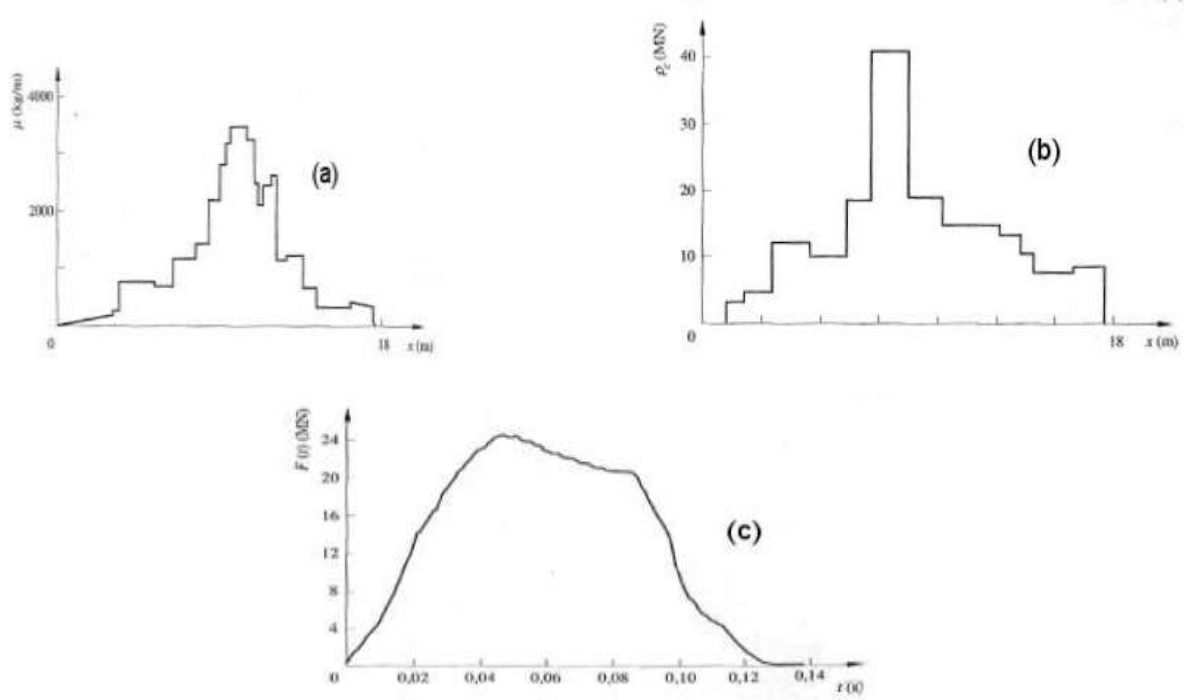


Figure 3.7 : Fonctions utilisées pour évaluer la force de choc d'un Phantom F4-F:

(a) Répartition des masses, (b) Force de flambage plastique, (c) Force de choc

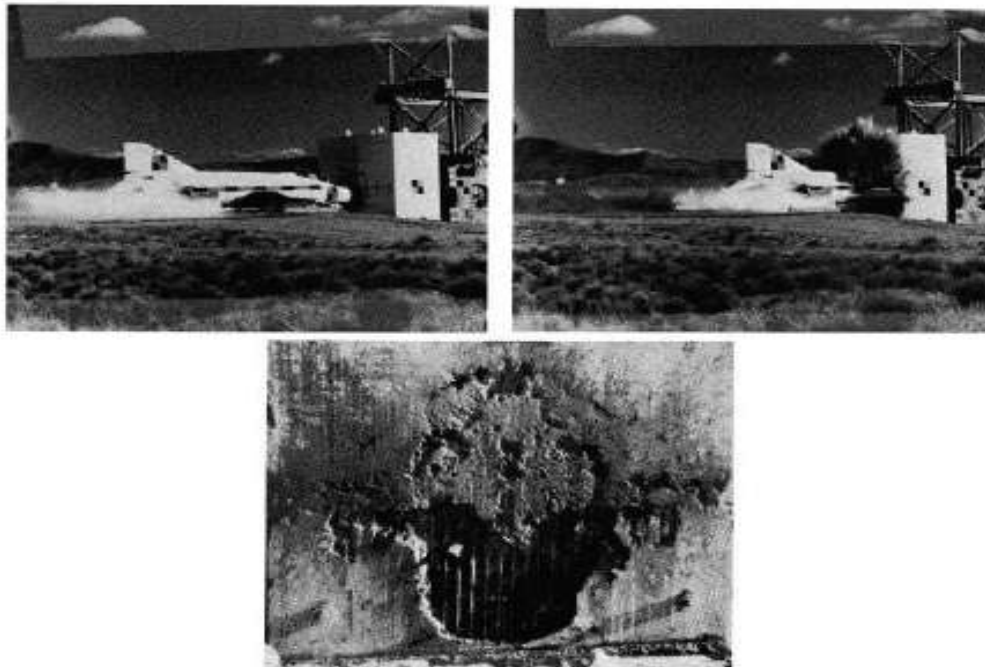


Figure 3.8(a) : Photos de l'essai du laboratoire Sandia (Jessica Rousseau, 2009)

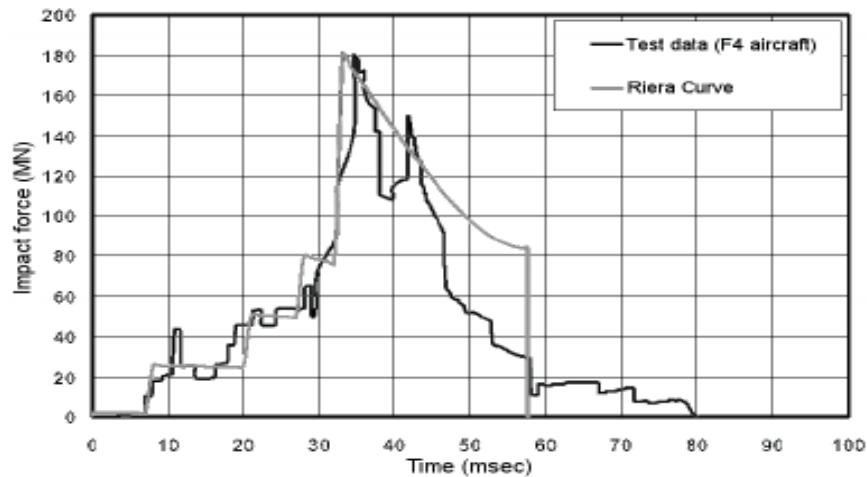


Figure 3.8(b) : Chargement évalué pour la cible et le projectile

Figure 3.8 : Impact d'un Phantom F4 sur un mur en béton armé

Comme on pourrait le pressentir, il existe très peu d'essais en vraie grandeur pour les impacts qui nous intéressent. Cependant, la modélisation choisie infinie devra être confrontée à des essais expérimentaux représentatifs. Les essais expérimentaux existants concernant surtout des impacts sur dalles en béton armé.

Dans un premier temps (années 70), les essais concernaient surtout des projectiles très rigides comme des missiles. On peut citer en particulier les essais CEA-EDF et des quels ressortent des formules de prédiction de la pénétration d'un missile. Ensuite, l'industrie nucléaire a commencé à étudier les phénomènes de perforation dus à des projectiles susceptibles d'impacter une enceinte de l'extérieur (missiles, impact d'avion). Les projectiles utilisés pour les essais sont donc devenus moins rigides afin de se déformer au contact de la cible pour se rapprocher de l'impact d'avion.

Les projectiles utilisés pour les essais expérimentaux ont donc évolué vers des projectiles plus déformables projetés à des vitesses plus moins importantes. Ici, il convient de citer les essais réalisés à Meppen en Allemagne. Il s'agit de tubes en acier projetés sur des dalles en béton armé pour différentes vitesses d'impact afin de mieux connaître le comportement des dalles sous ce type de chargement.

Au fil des années, les chercheurs ont utilisés des projectiles de plus en plus représentatifs d'avions. Par exemple, les essais de ont été réalisés avec des moteurs d'avions à taille réelle. D'autres se sont intéressés à différencier les impacts de projectiles déformables et de projectiles durs.

On peut trouver dans la thèse (**Koechlin, 2007**) une liste très complète des essais expérimentaux d'impacts sur dalle en béton armé en proposant aussi un classement de ces essais afin de déterminer les essais les plus représentatifs d'un impact d'avion. Il les répartit en deux groupes : les chocs mous et les chocs durs. Le choc mou est classiquement décrit comme l'impact d'un projectile qui s'écrase sur une cible rigide et est représentatif a priori d'un impact d'avion. Le choc dur peut caractériser à la fois un projectile rigide qui pénètre dans une cible (perforation) ou un rebond (choc élastique). Une analyse basée sur les travaux de Riera présentés précédemment lui permet de définir une limite entre le choc mou et le choc dur. L'équation (3.1) donne cette limite en fonction de « σ_p » la contrainte de rupture du projectile, « σ_c » la contrainte de rupture de la cible, « ρ_p » la masse volumique du projectile, V_0 la vitesse du projectile. Ainsi pour une résistance du projectile faible par rapport à la cible et/ou une vitesse faible, le choc est mou.

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} + \frac{\rho_p V_0^2}{\sigma_c} = 1 \quad (3.1)$$

3.4.2. Les règles de sûreté applicables aux installations nucléaires (**John Large et Associates, 2011**)

Les attentats du 11 septembre 2001 contre le World Trade Center et le Pentagone ont abattu aussi les procédures classiques d'évaluation du risque. Dans le cas des installations nucléaires, il apparaît clairement que l'approche internationale, résumée par deux Règles Fondamentales de Sûreté (RFS) applicables aux réacteurs et aux autres installations, est caduque : celle-ci se base sur un raisonnement probabiliste où un risque très grave mais très peu probable est admis comme « acceptable ».

Les centrales nucléaires du monde entier ne sont pas protégées, du point de vue de la technique de leur construction civile, contre l'impact d'actes de guerre et d'attaques terroristes provenant de l'espace aérien. Il n'est pas possible de réaliser dans les centrales nucléaires actuellement en service des améliorations techniques qui garantiraient une protection à 100%. Contre les conséquences d'une attaque terroriste de la nature de celle dont a fait l'objet le World Trade Center. Si l'une des centrales nucléaires subissait une telle attaque, on ne peut pas exclure qu'en cas d'impact direct d'un bloc moteur sur le bâtiment réacteur – quelle que soit la conception de ce bâtiment –, les assemblages combustibles dans la piscine du combustible ou le système de refroidissement primaire soient touchés et qu'il en résulte une libération de matières radioactives.

Le dimensionnement des installations nucléaires face aux risques d'écrasement d'un avion est basé sur deux règles fondamentales de sûreté (RFS), édictées par l'autorité de sûreté, applicables à la « prise en compte des risques liés aux chutes d'avion » :

- ✓ **Règle N° I.2.a du 5 août 1980**, applicable aux « tranches nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression » ;
- ✓ **Règle N° I.1.a du 7 octobre 1992**, applicable aux « installations nucléaires de base autres que les réacteurs, à l'exception des installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs ».

Avant les dates de publication de ces RFS, aucune spécification d'ordre réglementaire n'existait pour la prise en compte particulière de ce risque dans la conception des installations correspondantes, ce qui exclut de fait la plupart des installations existantes hors réacteurs – dont les installations de La Hague – créées avant l'entrée en vigueur de la RFS. Les calculs de probabilité en vigueur, basés sur les prescriptions de ces RFS, sont présentés dans **le tableau 3.1** ci-dessous pour les réacteurs nucléaires. Le risque de chute d'un avion commercial (c'est-à-dire de masse supérieure à 5,7 tonnes) ou d'un avion militaire est jugé inférieur au seuil des risques suffisamment probables pour devoir être considéré comme « chutes d'aéronefs plausibles », seul objet de ces règles, selon les termes de la RFS N° I.1.a.

Tableau 3.1 : Probabilités retenues pour la prise en compte des chutes d'avion dans la conception des installations nucléaires

<i>Famille</i>	<i>Vol/an générale</i>	<i>Probabilité d'accident /vol</i>	<i>Probabilité d'impact /an/tranche/fonction de sureté</i>
Aviation commerciale	700.000	$<10^{-6}$	$<10^{-8}$
Aviation militaire	500.000	10^{-6}	10^{-7}
Aviation générale	2.000.000	10^{-4}	$Qq10^{-6}$

Pour dimensionner les installations par rapport au seul risque pris en compte, celui d'une chute d'aéronef de l'aviation générale (c'est-à-dire de masse inférieure à 5,7 tonnes), les RFS définissent deux types d'avions « jugés représentatifs » : un CESSNA 210 monomoteur de 1,5 tonne (moteur à hélice) et un LEAR JET 23 bimoteur de 5,7 tonnes (biréacteur), tous deux supposés heurter les installations à une vitesse de 100 m/s².

Valeurs caractéristiques :

Les deux avions de référence sont les suivants :

- ✓ **Référence Lear Jet 23** : bimoteur de 5 700 kg environ, ayant une surface d'impact de 12 m² (soit un rectangle dont le grand côté est toujours horizontal : $h = 1,2$ m, $L = 10$ m) ;
- ✓ **Référence Cessna 210** : monomoteur de 1 500 kg environ, ayant une surface d'impact de 4 m² (soit un rectangle dont le grand côté est toujours horizontal : $h = 0,5$ m, $L = 8$ m).

La vitesse d'impact de ces deux avions est prise égale à 100 m/s. Pour chaque avion, le chargement à prendre en compte est représenté par une force en fonction du temps définie sur la **figure 3.9**. Cette force est uniformément répartie sur la surface d'impact de l'avion. Le moteur du Cessna est situé à l'avant : il a une masse de 200 kg et sa surface d'impact est de 0,5 m². Ce moteur est considéré comme un projectile dur indépendant.

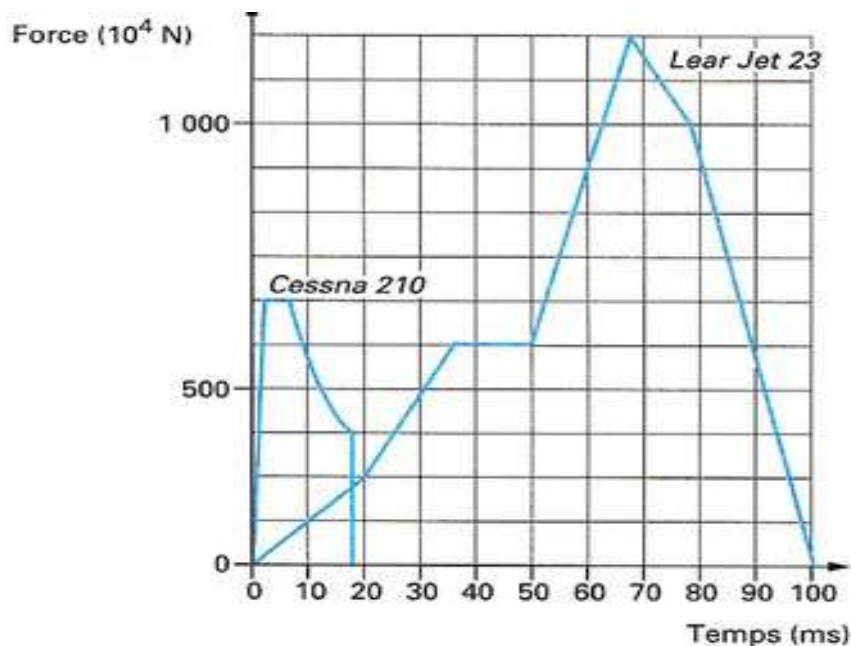


Figure 3.9 : Force d'impact des avions Lear Jet et Cessna

3.4.2.1. L'évaluation de la résistance des installations

De nombreuses déclarations d'experts très divers confirment l'impossibilité de garantir la résistance d'une construction. La Direction de la sûreté des installations nucléaires (DSIN), dans un communiqué publié le 13 septembre 2001 en fin de journée confirme que le cas d'une chute volontaire d'avion commercial n'est pas pris en compte.

Le ton se veut malgré tout rassurant sur l'impact potentiel d'un tel acte :

« S'agissant de la chute d'un avion de grande taille, l'impact sur la sûreté d'une installation Nucléaire dépendrait de multiples paramètres et pas seulement de la masse de l'avion. Même si elles ne sont pas construites pour résister sans dommages à un tel choc, les centrales nucléaires offriraient une bonne capacité de résistance grâce notamment à leurs enceintes de confinement en béton armé. »

Des calculs très basiques sur l'énergie cinétique de différents types d'avion en fonction de leurs caractéristiques en vol montrent pourtant que le choc serait d'un tout autre ordre de grandeur : l'ampleur du choc causé par un avion de ligne serait plusieurs centaines, voir plusieurs milliers de fois supérieure à celle prise en compte dans les RFS (**voir tableau3.2**) et donc dans le dimensionnement d'installations nucléaires en France. De plus, aux effets du choc s'ajouteraient les effets liés à l'explosion et à la combustion des quantités énormes de carburant transportées par ces appareils.

Tableau 3.2 : Evaluation de l'énergie libérée par la chute de différents types d'avions

Type Avion	Masse (tonnes)	Vitesse (m/s)	Energie cinétique(Mj)	Energie/Cessna	Energie/Lear jet	Carburant (litres)
Aviation générale						
Cessna 210	1.5	100	7.5	X1,0	X0,3	~350
Lear Jet 23	5.7	100	28.5	X3,8	X1,0	~1500
Aviation commerciale						
Boeing747	397	252.8	12.680	X1.690,7	X444,9	216.840
Boeing767	179	236.1	4.994	X665,9	X175,2	90.770
Airbus 320	77	243.9	2.289	X305,3	X80,3	29.660
Airbus380	560	261.7	19.177	X2.2556,9	X672,9	310.00

3.4.3. Conséquences éventuelles d'une chute d'avion sur une centrale nucléaire

Un impact direct sur un confinement : pourrait provoquer des fissures sur le confinement et/ou des systèmes et éléments de sûreté clés, générant des risques de rejets radioactifs au niveau de la centrale nucléaire, du combustible usé et/ou d'autres matières et substances radioactives.

La chute d'un avion de ligne sur une centrale nucléaire pourrait mettre en échec les contre-mesures prévues, empêchant ainsi la mise en œuvre effective des mesures immédiates d'atténuation et entraînant une situation chaotique qui pourrait déboucher sur des conséquences radiologiques catastrophiques.

3.5. Conclusion

L'impact d'avion sur une centrale en béton armé est un risque danger. En premier lieu parce qu'il s'agit des dommages causées par un contact violent entre deux corps. Les résolutions issues de ce phénomène dépendent de l'intensité des actions mécaniques mises en jeu dans le choc qui implique une sollicitation très forte de chacune des deux structures. Il en résulte des phénomènes mécaniques non-linéaires.

CHAPITRE 4 :
APPLICATION A LA SIMULATION
DE L'ENCEINTE DE CONFINEMENT

4.1. Introduction

L'objectif de ce dernier chapitre est de montrer la faisabilité de la simulation d'un impact d'avion sur une structure en béton armé de type enceinte de confinement.

Dans la première partie de ce chapitre on présente la géométrie et le ferrailage de la centrale. Ensuite; on passe à la simulation numérique de la centrale qui est soumise à l'impact de deux avions : « cessna 210 » et « lear jet 23 » en utilisant le modèle dyna-LMT de Fabrice Gatuingt afin d'obtenir les résultats concernant : l'endommagement, les ouvertures de fissures, la déformation plastique des armatures et le déplacement vertical du sommet du dôme.

4.2. Géométrie et ferrailage de la centrale

4.2.1. Géométrie

La centrale nucléaire considérée est en béton armé de 29.6 m de hauteur, composée principalement de trois parties :

- ✓ Le dôme qui présente la partie supérieure de la centrale de rayon 14m, d'épaisseur variable (0.36m d'épaisseur au niveau du sommet et 1m au niveau d'appuis).
- ✓ La paroi de la jupe cylindrique de 0.6m d'épaisseur, de hauteur 24.6m, de rayon intérieur 14 m et extérieur 14.6 m.
- ✓ La ceinture torique qui se trouve entre le dôme et la jupe d'une hauteur de 1m, de rayon intérieur 14 m et extérieur 15m.

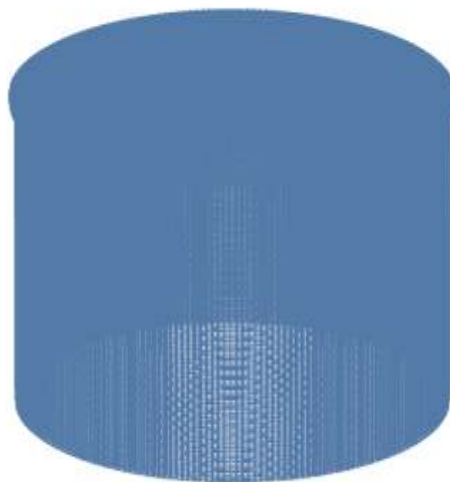


Figure 4.1 : Géométrie de la centrale nucléaire

4.2.2. Ferrailage

- ✓ Le dôme : est ferrailé par deux lits des armatures radiales, ainsi que deux lits d'armature ortho radiales :
 - Le nombre d'armatures ortho radiales par lits est 100 armatures.
 - Le nombre d'armatures radiales par lits est 220 armatures.
- ✓ La ceinture torique : est ferrailée par six nappes de cerces longitudinales disposées le long de son volume.
- ✓ La jupe : est ferrailée par des nappes d'armatures transversales disposées le long de son volume, ainsi que des cerces longitudinales.

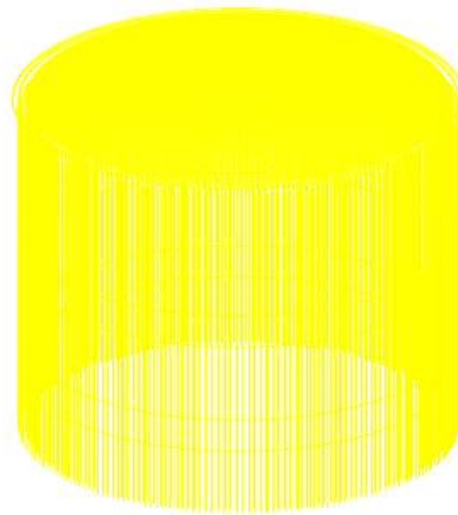


Figure 4.2 : Ferrailage de la centrale nucléaire

4.3. Le modèle dynamique Dyna-LMT

Le modèle dynamique créé par Fabrice Gatuingt, est un modèle de visco-endommagement qui fait intervenir un endommagement de compression et un endommagement de traction afin d'avoir un comportement de compression simple réaliste tout en conservant une bonne description de ce qui se passe en traction.

Suite aux travaux réalisés par Dubé en 1994, F.Gatuingt a utilisé un modèle visqueux pour introduire un effet de vitesse dans l'évolution de l'endommagement.

4.3.1. Description du modèle

En se basant sur le modèle de comportement élastique visco-endommageable suivant :

$$\sigma_{ij} = (1 - D)[K_{ijkl} \varepsilon_{mm}^e \delta_{kl} + 2G_{ijkl} (\varepsilon_{kl}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{mm}^e \delta_{kl})] \quad (4.1)$$

Avec :

- ✓ K_{ijkl} : module de compressibilité du matériau ;
- ✓ G_{ijkl} : module de cisaillement du matériau.

La formule d'évolution de la vitesse d'endommagement est :

$$\dot{D} = \left(\frac{\langle F_D(\tilde{\varepsilon}^e) \rangle}{m_D} \right)^{n_D} \quad (4.2)$$

Avec :

- ✓ $F_D(\tilde{\varepsilon}^e)$: la fonction seuil d'endommagement ;
- ✓ m_D et n_D : paramètres des matériaux.

Cette fonction seuil d'endommagement, découle des travaux de thèse de La Borderie (**La Borderie, 1991**) qui relie l'évolution de l'endommagement au taux de dissipation d'énergie de la contrainte. Afin de conserver une évolution de l'endommagement qui soit pilotée par les déformations, la nouvelle forme de la fonction seuil devient :

$$F_D(\tilde{\varepsilon}^e) = \tilde{\varepsilon}^e - \varepsilon_{D0} - \frac{1}{a} \left(\frac{D}{1-D} \right)^{(1/b)} \quad (4.3)$$

Avec :

- ✓ $\tilde{\varepsilon}^e$: la déformation équivalente élastique ;
- ✓ ε_{D0} : le seuil initial d'endommagement ;
- ✓ a et b : paramètres des matériaux ;

L'endommagement n'évoluera que sous l'effet de déformations positives (c'est-à-dire sous l'effet de déformations d'extension). Cette fonction seuil permet de respecter les lois de la thermodynamique.

Pour les modèles d'endommagements, la dissipation est caractérisée par :

$$Y\dot{D} \geq 0 \quad (4.4)$$

Le couplage entre un endommagement de compression et un endommagement de traction se définit par :

$$D = \alpha_c D_c + \alpha_t D_t \quad (4.5)$$

Avec :

- ✓ D_c : l'endommagement de compression ;
- ✓ D_t : l'endommagement de traction ;

Tandis que α_c et α_t sont des paramètres tels que :

- ✓ $\alpha_c = 0$: en cas de traction pure ;
- ✓ $\alpha_t = 0$: en cas de compression pure ;
- ✓ $\alpha_c + \alpha_t = 1$: en cas de combinaison ;

A partir de là, F Guatuingt a défini deux types d'endommagements différents, un de traction et un autre de compression, dont les évolutions seront gérées par les équations suivantes :

$$\dot{D}_c = \left(\frac{\langle \tilde{\varepsilon}^e - \varepsilon_{D0} - \frac{1}{a_c} \left(\frac{D_t}{1-D_t} \right)^{1/b_c} \rangle}{m_{D_c}} \right)^{n_{D_c}} \quad (4.6)$$

et

$$\dot{D}_t = \left(\frac{\langle \tilde{\varepsilon}^e - \varepsilon_{D0} - \frac{1}{a_t} \left(\frac{D_c}{1-D_c} \right)^{1/b_t} \rangle}{m_{D_t}} \right)^{n_{D_t}} \quad (4.7)$$

4.3.2. L'introduction de l'effet de vitesse

Tant qu'il existe une dépendance à la vitesse de chargement du comportement sphérique du béton, il sera important de prendre en compte la vitesse de déformation dans l'évolution des déformations plastiques. F. Gatuingt (**Gatuingt, 1999**) dans ses travaux a adopté une forme visco-plastique du modèle de Gurson associée au modèle de comportement suivant :

$$\sigma_{ij} = [K_{ijkl} \varepsilon_{mm}^e \delta_{kl} + 2G_{ijkl} \left(\varepsilon_{kl}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{mm}^e \delta_{kl} \right)] \quad (4.8)$$

L'évolution des déformations plastiques sera la suivante :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_{NT}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.9)$$

Selon la thèse de Gatuingt , Colantonio et Stainier ont proposé une forme viscoplastique de l'évolution des déformations plastiques équivalentes de la matrice pour la fonction seuil de Gurson modifiée. Cette formulation s'appuie sur une écriture du multiplicateur plastique qui prend en compte l'endommagement de la manière suivante :

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{(1-d)} \left\langle \frac{F_{NT}}{m_{vp}} \right\rangle^{n_{vp}} \quad (4.10)$$

Où « d » représente l'endommagement correspondant à la fois à la création de vides, leur augmentation et leur coalescence.

Le multiplicateur plastique en fonction de la porosité peut s'écrire sous la forme originale suivante :

$$\dot{\lambda} = \frac{f^*}{(1-f^*)} \left\langle \frac{F_{NT}}{m_{vp}} \right\rangle^{n_{vp}} \quad (4.11)$$

Avec :

- ✓ f^* : représente la porosité ;
- ✓ m_{vp} et n_{vp} : paramètres des matériaux ;

Afin d'étudier les paramètres d'évolution sur la réponse du modèle viscoplastique et ceux influant sur le comportement de la matrice sans les vides, la surface seuil utilisée par Gatuingt est celle de Gurson modifiée. Elle est décrite de la manière suivante :

$$F_{NT}(\sigma_{ij}, \sigma_M, f^*) = \frac{3J_2}{\sigma_M^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{I_1}{2\sigma_M}\right) - (1 + (q_3 f^*)^2) = 0 \quad (4.12)$$

Avec :

- ✓ σ_M : est celle-ci sans vide la contrainte dans la matrice si on considère celle-ci sans vide ;
- ✓ f^* : représente la porosité du matériau ;
- ✓ q_1, q_2, q_3 : sont des paramètres scalaires du critère.

4.3.3. Les paramètres du modèle dynamique Dyna-LMT

Le tableau ci-dessous présente les paramètres du modèles Dyna-LMT :

Tableau 4.1 : Les paramètres du modèle dynamique DYNA-LMT

XN	Exposant du seuil de viscoplasticité	15
NVP	Paramètre de la viscoplasticité de type Perzyna	1,5
MVP	Paramètre de la viscoplasticité de type Perzyna	1.10^{-2}
F0	Porosité initiale du béton	0,3
Q1	Paramètre du critère de Gurson modifié par Needleman et Tvergaard	0,5
Q2	Paramètre du critère de Gurson modifié par Needleman et Tvergaard	0,5
Q3	Paramètre du critère de Gurson modifié par Needleman et Tvergaard	0,5
SGM0	Résistance de la matrice cimentaire sans les pores	70.10^6 pa
K	Influence l'évolution de la porosité	15
MDT	Paramètre de viscosité de l'endommagement de Traction	$0,5.10^{-4}$
NDT	Paramètre de viscosité de l'endommagement de Traction	5
MDC	Paramètre de viscosité de l'endommagement de Compression	$0,5.10^{-3}$
NDC	Paramètre de viscosité de l'endommagement de Compression	20
ED0	Seuil en déformation pour la traction	1.10^{-4}
AC	Paramètre pour la compression	3000
BT	Paramètre pour la traction	1,6
BC	Paramètre pour la compression	4

4.4. Description de la simulation numérique

Le problème étudié est un impact entre la centrale nucléaire et l'avion dont la force d'impact est uniformément répartie au sommet du dôme.

Les calculs sont réalisés par éléments finis utilisant le logiciel Cast3M version 2011. On a commencé par la simulation en 3D mais vu les moyens incongrus pour le calcul on est passé en mode axisymétrique. Nous avons utilisé la procédure PASAPAS qui est l'opérateur principal de calculs non linéaires de Cast3M (**Annexe A**).

Pour chaque avion, le chargement à prendre en compte est représenté par une force en fonction du temps définie sur la **figure 4.3**. Cette force est uniformément répartie sur la surface d'impact de l'avion. La vitesse d'impact de ces deux avions est prise égale à 100 m/s.

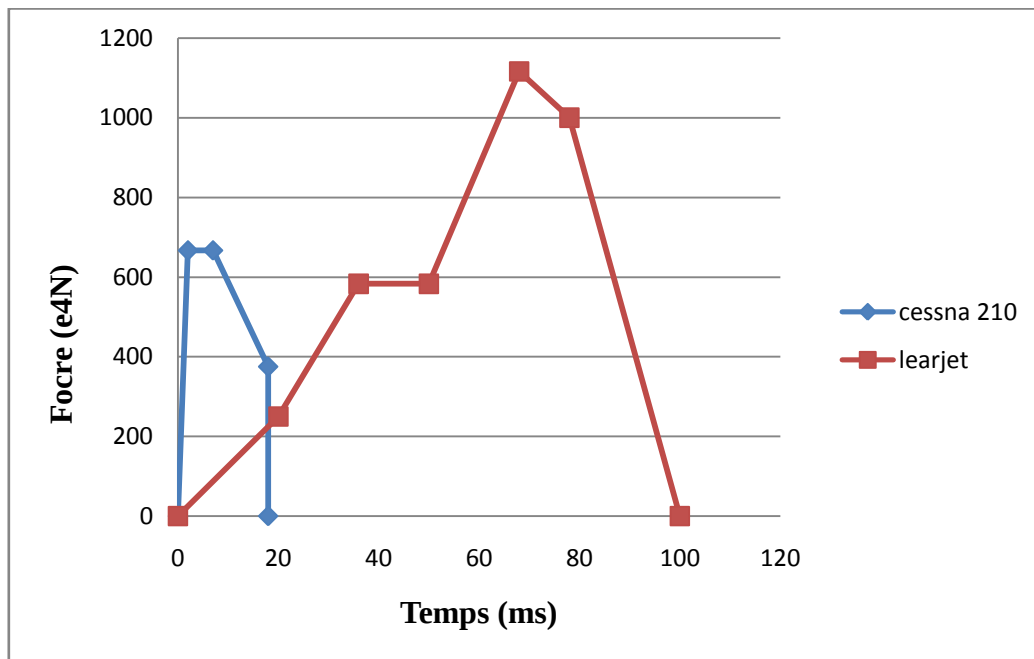


Figure 4.3 : Force d'impact des avions Lear Jet 23 et Cessna 210

Les conditions aux limites sont décrites dans la figure suivante :

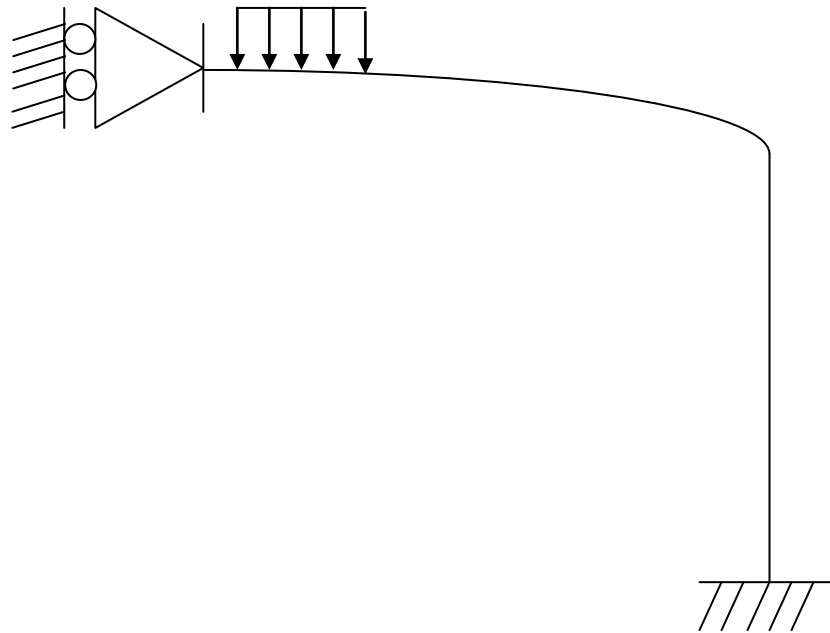


Figure 4.4 : Condition aux limites et chargement

Pour simplifier le problème qui est symétrique autour des trois axes, on réalise le calcul en 2D en ne maillant qu'une portion d'un cercle, en mode axisymétrique afin de réduire le temps de calcul.

Pour la simulation, on a modélisé la coque avec une épaisseur de : $ep1=1$ cm.

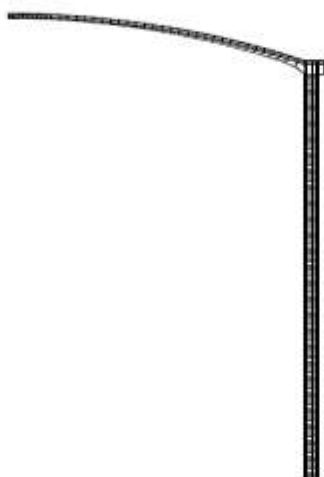


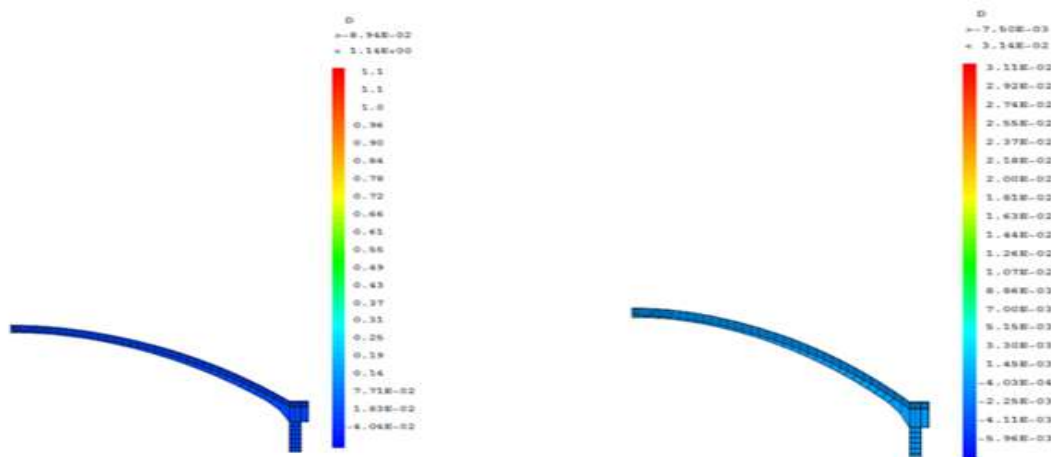
Figure 4.5 : Centrale Nucléaire en axisymétrique

Par définition, un accident nucléaire majeur est imprévisible. Personne ne construirait une centrale nucléaire sans prendre les meilleures mesures de sécurité, notamment dans l'éventualité de la chute d'un avion, et surtout dans celle d'un avion délibérément précipité contre la centrale. La chute d'un aéronef sur un édifice est un événement complexe qui implique de multiples forces et entraîne diverses réactions de la structure

L'origine du risque vient du fait qu'au cours d'un accident grave, l'enceinte de confinement peut être soumise à plusieurs types de sollicitations qui dépassent sa pression de dimensionnement. Ces pressions sont accompagnées par des phénomènes mécaniques non-linéaires pour le projectile (flambage, déplacement...) ainsi pour la cible (plasticité, endommagement, vibrations, déformation ...).

4.5. Les résultats de la simulation

4.5.1. L'endommagement



a) Avion Lear jet23

b) Avion Cessna 210

Figure 4.6 : L'endommagement sous l'effet de chute des deux avions Cessna 210 et learjet23

D'après la **figure 4.6**, on remarque que la valeur d'endommagement de la surface d'impact est de l'ordre '0', c.à.d qu'on a un état stable et sain. Donc on peut constater que le modèle dynamique proposé est capable de bien prédire l'état d'endommagement.

4.5.2. Les ouvertures des fissures

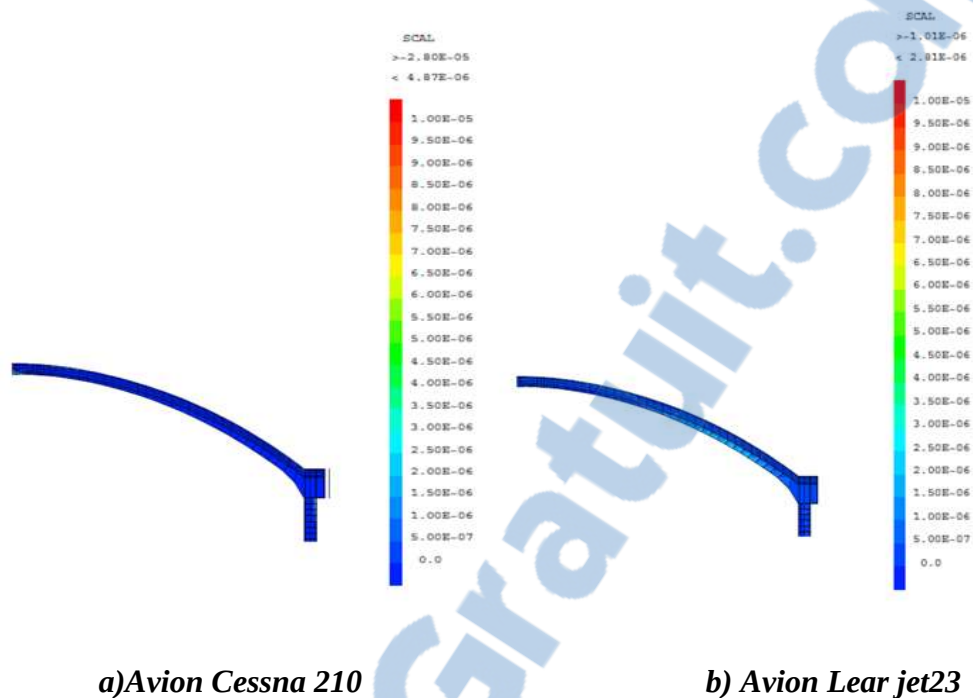


Figure 4.7 : Les ouvertures des fissures sous l'impact de chute de des deux avions Cessna 210 et learjet23

Il existe un très faible risque qu'une fissure apparaisse dans l'ouvrage de confinement et ça se remarque à travers **la figure 4.7**, les résultats obtenus semblent logiques dans les deux cas (Lear jet23 et Cessna210) et on aura seulement un éclatement du béton d'enrobage. Pour évaluer l'état de fissuration on a utilisé la procédure d'ouverture de fissure «OUVFISS» développé par matallah et al (**Matallah et al, 2009**).

4.5.3. Déformation des aciers



Figure4.8 : Déformation sous l'effet d'impact de l'avion Cessna 210



Figure4.9 : Déformation Sous l'effet d'impact de l'avion Lear jet23

Sous l'impact des deux avions, on remarque qu'on a le même scénario : une absence de déformation ou de plastification des aciers d'armatures radiales ou orthoradiales.

4.5.4. Déplacement vertical du sommet du dôme

Le sommet du dôme est caractérisé par le point le plus haut, l'évolution du déplacement en fonction de temps est illustrée dans la figure ci-dessous :

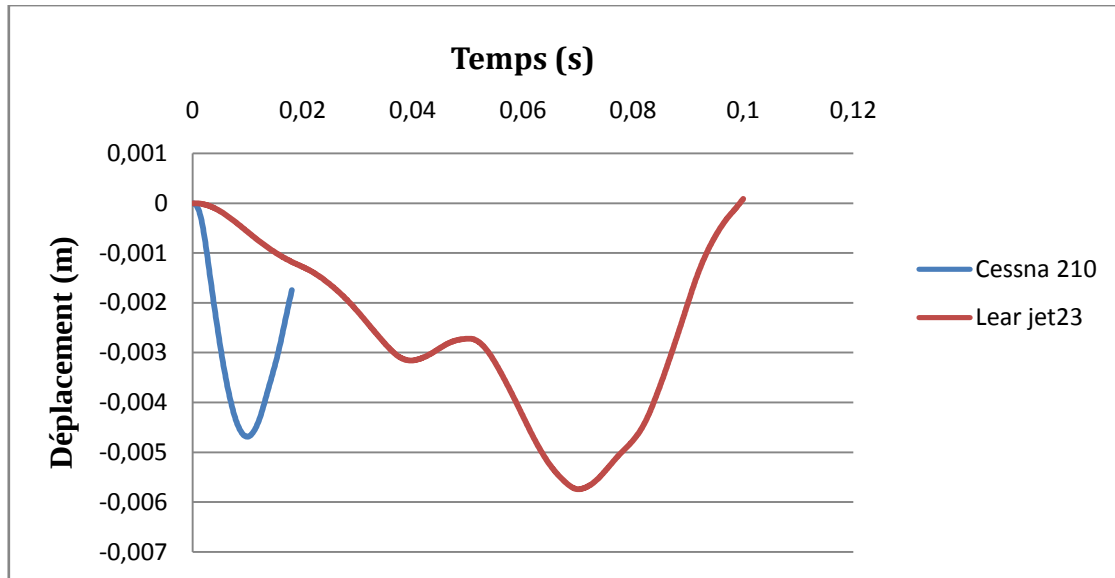


Figure4.10 : Le déplacement vertical du sommet du dôme pour $e_p=10$ mm

D'après la figure on remarque que l'enceinte de confinement a subi un déplacement maximal de 4,7 mm sous l'impact de l'avion cessna210 et de 5,7 mm sous l'impact de l'avion Lear jet23. Ces deux impacts ont engendré de faibles déplacements, on tire que le risque de l'apparition d'une fissure est très faible.

Nous avons pu caractériser le comportement de l'enceinte de confinement en dynamique rapide suite au modèle de visco-endommagement Dyna-LMT .Ce choc génère une réflexion d'ondes. Cette propagation d'ondes permet d'engendrer ainsi une sollicitation dynamique en traction du dôme dans sa partie supérieure et autre en compression sur sa partie inférieure. Il s'agit d'un choc dur avec une vitesse d'impact importante (100m/s) et un temps très court. Finalement ce modèle nous a permis de simuler correctement notre structure et de mettre en évidence un effet de vitesse sur le comportement dynamique du béton ceci dans le but de conserver une certaine efficacité pour un calcul dynamique non-linéaire.

4.6. Conclusion

L'objectif de ce travail était de simuler une enceinte de confinement en béton armé sous effet d'impact de deux avions « Cessna210 » et « Lear Jet23 » qui sont proposés par RFS, pour se faire on a utilisé le modèle DYNA-LMT de F.Gatuigt, ce dernier est un modèle de visco-endommagement qui fait intervenir un endommagement de compression et un endommagement de traction afin d'avoir un comportement de compression simple réaliste tout en conservant une bonne description de ce qui se passe en traction.



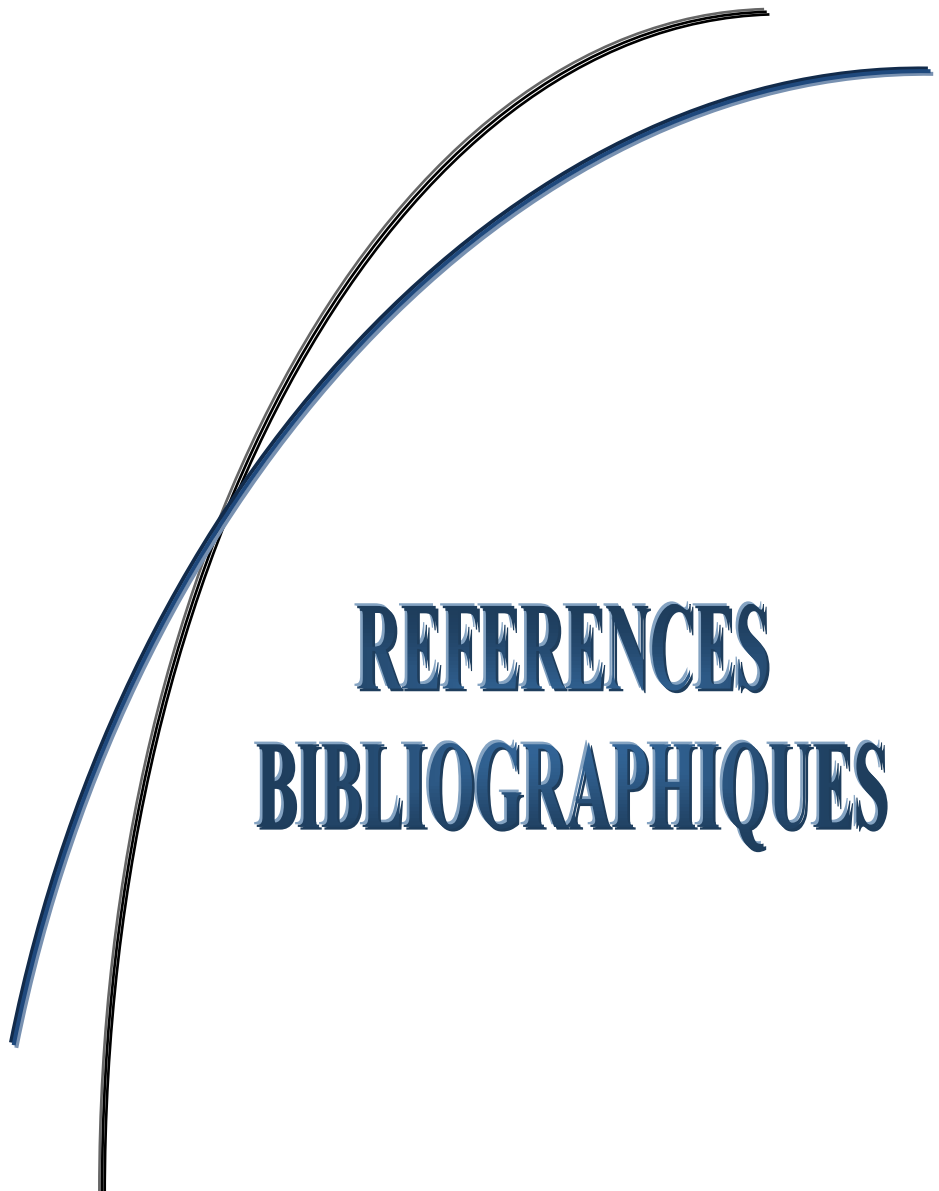
CONCLUSION GENERALE

La chute d'avion sur une structure de protection en béton armé est un phénomène complexe. Tout d'abord parce qu'il s'agit d'un choc, c'est-à-dire d'un contact violent entre deux corps, phénomène dynamique toujours difficile à étudier en raison de sa brièveté. Mais également à cause de la nature très différente des deux solides : l'un est une structure composite de géométrie variable, relativement molle, se déplaçant à vitesse élevée, et non dimensionnée pour résister à l'écrasement, l'autre est une structure en béton armé, avec toute la complexité que représente l'hétérogénéité et le caractère composite d'un tel matériau dans son association de l'acier et du béton. L'intensité des actions mécaniques en jeu dans le choc implique une sollicitation très forte de chacune des deux structures. Il en résulte des phénomènes mécaniques non-linéaires aussi variés dans le projectile (flambage, grands déplacements) que dans la cible (multifissuration, plasticité, endommagement, perforation, vibrations).

La simulation concernait une application particulière : le comportement d'une enceinte de confinement soumise à un effet d'impact de deux avions "Cessna 210" et "LearJet 23", en utilisant le modèle DYNA-LMT. Les simulations numériques ont montré que ce modèle nous a permis de simuler correctement notre structure et de mettre en évidence un effet de vitesse sur le comportement dynamique du béton ceci dans le but de conserver une certaine efficacité pour un calcul dynamique non-linéaire avec un gain considérable en temps de calcul.

Les perspectives

- ✓ Les résultats des applications présentés dans le Chapitre quatre montrent les possibilités offertes de simuler une structure de même grandeur que l'enceinte de confinement avec le model DYNA-LMT.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

BERTHOLLET.A. Modélisation du mécanisme de fluage tertiaire par observation de l'effet de vitesse sur le comportement du béton. URGC Structures. INSA de Lyon, 34, avenue des Arts, 69621 Villeurbanne Cedex.

BISCHOFF.P.H et PERRY.S.H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates. Materials and Structures, 1991, Vol. 24 n°6, 1991.

BRARA.A. Etude expérimentale de la traction dynamique du béton par écaillage. Thèse de doctorat, Soutenue en Octobre 1999, Université de Metz.

COSTAZ.J.L .Confinement enceintes 10 avril. 1997. ISBNB3290.

DUBE.J.F. Modélisation simplifiée et comportement visco-endommageable des structures en béton. Thèse de doctorat, Soutenue en Décembre 1994, Ecole normale supérieure de Cachan.

DUBE.J.F. Identification des paramètres d'un modèle de comportement pour les structures en béton. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, novembre 2005, Université Montpellier II, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5.

Eibl.J. Soft and hard impact, Proc. FIP Congress, The Concrete Society, Concrete for hazard protection, Edinburgh, Scotland, sept. 1987, pp. 175-186.

GATUINGT.F. Prévion de la rupture des ouvrages en béton sollicités en dynamique rapide. Thèse de doctorat, Soutenue en décembre 1999, L'école normale supérieure de Cachan.

KOECHLIN.P. Modèle de comportement membrane-flexion et critère de perforation pour l'analyse de structures minces en béton armé sous choc mou. Thèse de Doctorat, Soutenue le 11 janvier 2007, Université Pierre et Marie Curie – Paris V.

LA BORDERIE.C. Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable: Modélisation et Application à l'analyse de structures en béton. Thèse de doctorat, Soutenue en Mai 1991, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

LARGE.J et Associates. La vulnérabilité des centrales nucléaires françaises aux chutes d'avion. Edition ed. : Consulting engineers, London, 12 novembre 2011. ISBN R3205-A1.

LEROUX.A. Modèle multiaxial d'endommagement anisotrope : Gestion numérique de la rupture et application à la ruine de structures en béton armé sous impacts. Thèse de doctorat, Soutenue en novembre 2012, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

MATALLAH.M et al. Apractical method to estimate crack opening in concrete structures. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009.

MAUREL.B. Modélisation par la méthode SPH de l'impact d'un réservoir rempli de fluide. Thèse de doctorat, Soutenue en 23 janvier 2008, LaMCoS-UMR CNRS 5514-INSA de LYON 20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex (France).

MAZARS.J. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structures. Thèse de doctorat, Soutenue en 1984. Université Paris6.

MULLER.G. Evaluation de la sensibilisation de la population face à la menace nucléaire et concomitamment du rôle du pharmacien lors de la distribution des comprimés d'iode. Thèse de doctorat, Soutenue le 4 juillet 2008, Université Henri Poincare-Nancy 1, Faculté de pharmacie.

NISTOR.I. Identification expérimentale et simulation numérique de l'endommagement en dynamique rapide : application aux structures aéronautiques .Thèse de Doctorat, Soutenue le 17 novembre 2005, l'Institut National Polytechnique de Toulouse et l'Académie Technique Militaire de Bucarest.

PERZYNA.P. "Fundamental problems in viscoplasticity, Advances in applied mechanics".1966, vol. 9, pp. 935-950.

PONTIROLI. C. Comportement au souffle des structures en béton armé. Thèse de doctorat, Soutenue en 1995, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

REVIRON.R. Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression. Thèse de doctorat, Soutenue le 09 mars 2009, Ecole Normale Supérieure de Cachan, ENS Cachan / CNRS / UPMC / PRES UniverSud Paris 61, avenue du Président Wilson, F-94235 CACHAN CEDEX, France.

Riera .J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces, Nuclear Engineering and Design, Vol. 8, 1968, pp. 415-426.

ROUSSEAU.J. Modélisation numérique du comportement dynamique des structures sous impact sévère avec un couplage éléments discrets / éléments finis. Thèse de Doctorat, Soutenue en 10 juillet 2009, Université Joseph Fourier - Grenoble I. 200pg.

SHIU.W. Impact de missiles rigides sur structures en béton armé : analyse par la méthode des éléments discrets. Thèse de Doctorat, Soutenue le 2 octobre 2008, Université Joseph Fourier - Grenoble I.

VU.X.D. Vulnérabilité des ouvrages en béton sous impact : Caractérisation, modélisation, et validation. Thèse de doctorat, Soutenue en Septembre 2013, Université de Grenoble.



ANNEXES

Annexe A : Notions générales concernant Cast3M

Introduction :

Cast3M est un code de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis (E.F) et la modélisation en mécanique des fluides. Il présente un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul proprement dites, mais également des fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et de traitement des résultats (post-processeur).

Cast3M permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statique et dynamique (extraction de valeurs propres), des problèmes de thermique, des problèmes non linéaires (comportements, grands déplacements, grandes déformations, contact, frottement...), des problèmes dynamiques « pas-à-pas » selon un schéma implicite, la ruine des structures , problèmes couplant calculs fluides et structuraux, etc.

Remarques générales concernant Cast3M :

- ✓ Cast3M, contrairement à de nombreux codes de calcul, ne fonctionne pas en « boîte noire » ; il donne à l'utilisateur la connaissance du problème effectivement posé et des méthodes employées pour le résoudre. Il comprend un ensemble de processus élémentaires (bibliothèque d'opérateurs) que l'utilisateur peut enchaîner pour définir et résoudre ses problèmes. Afin d'illustrer son fonctionnement, on définit parfois Cast3M comme le « Matlab des éléments finis ».
- ✓ Cast3M possède un langage de commande constitué d'une série d'opérateurs permettant à l'utilisateur de manipuler les données et les résultats sous forme d'objets en leur donnant des noms : c'est le langage Gibiane. L'utilisateur peut construire un environnement adapté à des applications spécifiques en écrivant des procédures en Gibiane.
- ✓ Le langage Gibiane possède d'ailleurs tous les attributs d'un langage informatique orienté objet : typage dynamique des données, expressions conditionnelles, expressions répétitives, traitement des exceptions, récursivité, possibilité d'écrire des procédures, etc. De plus, aux objets classiquement disponibles dans les langages

informatiques usuels (entier, flottant, table.) vient s'ajouter une bibliothèque d'objets propres à la modélisation par éléments finis : maillage, modèle, rigidité, ce qui permet à Gibiane d'être à la fois un langage de programmation et de modélisation.