

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de : **Master académique**
Spécialité : **Génie Civil**
Option : **Structure**

Thème :

ANALYSE NUMERIQUE ET FIABILISTE DE L'IMPACT D'UN PROJECTILE

Proposé et dirigé par :

M. DEHMOUS Hocine

Présenté par :

ZIDELMAL Abdelhafidh

Promotion : 2015-2016

REMERCIEMENTS

Alhamdulillah : je remercie Dieu de m'avoir donné le courage et la patience

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur DEHMOUS Hocine qui m'a encadré au cours de cette thèse. Son enthousiasme, sa ténacité et surtout son sens du bon travail ont énormément contribué à l'aboutissement de mes travaux. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes vifs remerciements iront aussi aux membres de jury qui me feront l'honneur de juger et d'enrichir ce travail par leur proposition.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Aux deux êtres les plus chères à mon cœur

Mes parents

Pour leur amour, leur sacrifice, leurs conseils et leurs encouragements

A ma tante Nacira, et tantan Hocine

A mes frères : **Abdelaziz, Cherif, Said-ouali** ma sœur **Hakima**

ET toute ma famille

A mes chères amies

Abdelhafidh

Résumé

La gestion du risque constitue actuellement un thème de réflexion majeur. Ainsi, cette étude est consacrée aux impacts de projectiles sur des plaques. La complexité du phénomène mécanique a fait qu'un modèle numérique simplifié d'un projectile sur une plaque a été élaboré sous Abaqus. Ce modèle nous a permis d'analyser le comportement de cette plaque en considérant différentes vitesses, différents angles d'inclinaison et différentes formes du projectile. Pour tenir compte de l'aspect aléatoire de ces phénomènes d'impact, un modèle probabiliste basé sur un modèle mécanique analytique sous matlab a été mis en place. Ainsi, la probabilité de défaillance de notre plaque a été estimée par la méthode de Monté Carlo. Ajouté à cela nous avons réalisé une étude de sensibilité.

Summary

Risk management is currently a major topic of discussion. Thus, this study is devoted to projectile impacts on plates. The complexity of the mechanical phenomenon that a simplified numerical model of a projectile on a plate was developed in Abaqus. This model allowed us to analyze the behavior of the plate considering different speeds, different angles and different shape of the projectile. To reflect the randomness of these impact phenomena, a probabilistic model based on an analytical model mechanical matlab was established. Thus, the probability of failure of our plate was estimated by the method of Monte Carlo. Added to this we conducted a sensitivity study.

TABLE DES MATIERES

<i>Remerciements</i>	<i>i</i>
<i>Dédicace</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xiii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
CHAPITRE 1 LES RISQUES EN GENIE CIVIL	
1. INTRODUCTION	2
2. HISTOIRE DU CONCEPT « RISQUE »	3
3. LA CARACTERISATION DU RISQUE	4
3.1. L’ALEA	5
3.2. L’ENJEU OU ELEMENT EXPOSE :	5
3.3. VULNERABILITE DES ELEMENTS EXPOSE	5
4. LES CATEGORIES DE RISQUE :	6
4.1. LES RISQUES NATURELS :	6
4.1.1. LES INONDATIONS :	6
4.1.2. LES FEUX DE FORET	7
4.1.3. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN	8
4.1.4. LES AVALANCHES	10
4.1.5. LES SEISMES	11
4.1.6. LES VOLCANS	12

4.1.7. LES TEMPETES.....	13
4.2. LES RISQUES TECHNOLOGIQUES :	14
4.2.1. LES RISQUES INDUSTRIELS :	14
4.2.2. LES RUPTURES DE BARRAGE.....	15
4.2.3. LES TRANSPORTS DE MATIERES DANGEREUSES:	16
4.2.4. LES RISQUES NUCLEAIRES.....	18
4.2.5. LES RISQUES BATIMENTAIRES.....	19
4.2.6. LES RISQUE DE RESEAUX.....	19
5. LE RISQUE ZERO N'EXISTE PAS	20
6. GESTION DU RISQUE	21
6.1. DEMARCHE D'UNE ETUDE DE DANGER	21
6.2. ANALYSE DU RISQUE	22
6.3. EVALUATION DU RISQUE.....	23
6.4. ACCEPTABILITE DU RISQUE	24
6.5. REDUCTION DU RISQUE	24
6.6. DEMARCHE POUR L'ANALYSE DES RISQUES	25
6.7. LES METHODES D'ANALYSE DE RISQUE	25
6.8. DOMAINES D'APPLICATION.....	26

CHAPITRE 2 : LE RISQUE INDUSTRIEL

1. PROBLEMATIQUE.....	28
2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ACCIDENTS MAJEUR	30
2.1. ACCIDENT DE FEYZIN, France.....	30
2.2. ACCIDENT DE MEXICO.....	31
2.3. ACCIDENT DE VISHAKHAPATNAM, INDE.....	31
3. IMPORTANCE DE L'ANALYSE DES ACCIDENTS INDUSTRIELS	32
4. FORMALISATION DU PROBLEME.....	33
1.4. CLASSIFICATION D'IMPACTS	37
CONCLUSIONS	39

CHAPITRE 3 ANALYSE PROBABILISTE DE L'IMPACT D'UN PROJECTILE

1. INTRODUCTION	40
2. PRESENTATION DU LOGICIEL ABAQUS	40
3.ÉTAPE DE LA MODELISATION :	44
3.1 CREATION DU MODELE	44
3.2 CREATION DU PROJECTILE	46
3.3 CREATION DES MATERIAUX	47
3.4 AFFECTER LES SECTIONS	48
3.5 ASSEMBLER LE MODELE	50
3.6 DEFINIR LES PAS D'ANALYSE	51
3.6 INTERACTION	52
3.7 APPLICATION DES CONDITIONS AU LIMITE ET DEPLACEMENT	54
3.7.1 L'ENCASTREMENT E LA PLAQUE	54
3.7.2 POUR CREE LE DEPLACEMENT	55
3.8 MAILLAGE DU MODELE	56
3.8.1 MAILLAGE DE LA PLAQUE	56
3.9 CREE ET SOUMETTRE UN TRAVAIL D'ANALYSE	57
3.10 VISUALISATION DES RESULTATS	58

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION DE LA MODELISATION NUMERIQUE

1. INTRODUCTION	59
2. PROJECTILE AVEC UN ANGLE D'INCLINAISON NUL	59
2.1. Vitesse du projectile 50 m/s	59
2.2. 2^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s	61
2.3. 3^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s	63
3. PROJECTILE AVEC UN ANGLE $\alpha = 10^\circ$	65
3.1. Vitesse du projectile 50 m/s	65
3.2. 2^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s	67

3.3. 3 ^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s.....	69
4. PROJECTILE AVEC UN ANGLE $\alpha = 30^\circ$	71
4.1. Vitesse du projectile 50 m/s.....	71
4.2. 2 ^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s.....	73
4.3. 3 ^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s.....	75

CHAPITRE 5 : ANALYSE PROBABILISTE DE L'IMPACTE D'UN PROJECTIL

1. INTRODUCTION.....	81
2. LA FIABILITE	81
3. PROBLEMATIQUE.....	81
4. CHOIX DES VARIABLES ALEATOIRES DE BASE.....	82
5. LES LOIS DE DISTRIBUTION.....	83
6. CHOIX DE LA FONCTION DE PERFORMANCE.....	83
7. INDICATEURS DE FIABILITE.....	84
8. PRINCIPALES APPROCHES POUR TENIR COMPTE DES INCERTITUDES.....	85
9. APPLICATION A L'IMPACT D'UN PROJECILE.....	85
9.1. SIMULATION PROBABILISTE	85
9.2. PRESENTATION DE MATLAB.....	86
9.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE.....	87
9.5. ORGANIGRAMME DE CALCUL.....	87
9.6. CHOIX DES VARIABLES ALEATOIRES	88
9.7. CHOIX DE LA FONCTION D'ETAT LIMITE.....	89
10. RESULTATS DE LA SIMULATION.....	90
10.1. VARIABILITE DES PARAMETRES D'ENTREE.....	90
10.2. VARIABILITE DES PARAMETRES DE SORTIE	92
10.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE.....	93
10.4. ETUDE DE SENSIBILITE.....	94
11. CONCLUSION.....	95

CONCLUSION GENERALE96

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : LES RISQUES EN GENIE CIVIL

Figure1.1 :Evolution des risques selon Beck Ulrich.....	2
Figure 1.2 :Risque industriel majeur	3
Figure1.3 : Risque naturel majeur.....	3
Figure1.4 : Inondation à Alger.....	5
Figure1.5 : Inondation en inde	5
Figure 1.6 : Comment un feu de forêt survient-il	7
Figure 1.7 : Dégât du a un mouvement de terrains	8
Figure 1.8 : Manifestation d'un mouvement de terrain sur le littoral.....	9
Figure1.9 :degats du a la niège	10
Figure1.10 : Caractéristiques des séismes.....	11
Figure 1.11: Coulées boueuses volcaniques.....	11
Figure1.12 : illustration d'un barrage	14
Figure1.13 : Rupture d'un barrage	15
Figure1.14 : manifestation des accidents de T.M.D.....	16
Figure1.15 : manifestation des accidents de T.M.D.....	17
Figure1.16 : Caractéristiques du risque nucléaire	18
Figure1.17 : Dégâts d'un séisme	19
Figure 1.18 : Méthodologie d'une étude de danger (d'après INERIS)	24
Figure1.19 : L'évaluation des risques.....	25

CHAPITRE 2 : EXPLOSIONS INDUSTRIELLES ET ANALYSE DE L'EFFET DOMINO

Figure 2.1 : Accident de Flixborough, UK (1974).....	29
--	----

Figure 2.2 : Accident de Feyzin, France (1966).....	30
Figure 2.3 : Accident de Mexico, Mexique (1984).....	31
Figure 2.4 : accident de Vishakhapatnam, Inde (1997).....	32
Figure 2.5 : Accidents industriels entre 1911 et 1995. [27,15].....	32
Figure 2.6 : Schéma global du suraccident	33
Figure 2.7 : Cycle élémentaire de l'effet domino.....	35
Figure 2.8 : Séquences de l'effet domino	36
Figure 2.9: Modèle mécaniques simples d'un impact à travers un système de masse-ressort	37
Figure 2.10 : Impact mou	38
Figure 2.11 : Impact dur	39

Chapitre 3 ANALYSE NUMERIQUE D'UN IMPACT D'UN PROJECTILE

Figure3.1 : l'interface d'Abaqus.....	42
Figure 3.2 : Illustration de la 1ère étape de la création de la plaque	45
Figure 3.3 : modèle numérique de la plaque	46
Figure 3.4: Illustration de la création du projectile.....	46
Figure 3.5: création du projectile et son pointe de référence.....	47
Figure 3.6 : création des matériaux.....	48
Figure 3.7 : Affichage de la plaque.....	48
Figure 3.8 : Affectation de la section.....	49
Figure 3.8 : la plaque en acier.....	49
Figure3.9 : Assemblage du modèle.....	50
Figure 3.10 : création du point datum.....	50
Figure 3.11 : les étapes de l'assemblage.....	51

Figure 3.12 : création des pas d'analyse.....	51
Figure 3.13 : choix des variables de sortie.....	52
Figure 3.14 : Création de l'interaction.....	52
Figure 3.15 : surface d'interaction.....	53
Figure 3.16 : interaction projectile plaque.....	53
Figure 3.17 : Création des encastremets.....	54
Figure 3.18 : Application de la vitesse initiale.....	55
Figure 3.19 : Choix du maillage.....	56
Figure 3.20 : Maillage de la plaque.....	57
Figure 3.21 : analyse du modèle.....	57
Figure 3.22 : Affichage des résultats.....	58

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure 4.1 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque...	59
Figure 4.2 : Déplacement et déformée de la plaque.....	60
Figure 4.3: Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	61
Figure 4.4 : Déplacement et déformée de la plaque.....	62
Figure 4.5: Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	63
Figure 4.6 : Déplacement et déformée de la plaque.....	64
Figure 4.7 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	65
Figure 4.8 : Déplacement et déformée de la plaque.....	66

Figure 4.9: Contrainte: Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	67
Figure 4.10 : Déplacement et déformée de la plaque.....	68
Figure 4.11 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile Quelconque.....	69
Figure 4.12 : Déplacement et déformée de la plaque.....	70
Figure 4.13 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	71
Figure 4.14 : Déplacement et déformée de la plaque.....	72
Figure 4.15 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	73
Figure 4.16 : Déplacement et déformée de la plaque.....	74
Figure 4.17 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque.....	75
Figure 4.18 : Déplacement et déformée de la plaque.....	76

CHAPITRE 5 : ANALYSE PROBABILISTE DE L'IMPACT D'UN PROJECTILE.

Figure 5.1: Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité.....	84
Figure 5.2 : Illustration de la méthode de Monte-Carlo.....	85
Figure 5.3 : Représentation de l'interface Matlab.....	86
Figure 5.4 : Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance d'une plaque.....	87
Figure 5.6 : Illustration du modèle analytique.....	88
Figure 5.7 : Histogramme de la contrainte ultime du matériau.....	91
Figure 5.8 : Histogramme de la déformation ultime du matériau.....	91
Figure 5.9 : Histogramme de la vitesse du projectile.....	92
Figure 5.10 : Histogramme de l'angle d'inclinaison du projectile.....	92
Figure 5.11 : Histogramme de la hauteur de pénétration du projectile.....	93

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : liste détaillée des différents risques.....	20
Tableau 1.2 : les principales méthodes d'analyse des risques dans le domaine des risques accidentels.....	27
Tableau 4.1 : contrainte de van Miss.	77
Tableau 4.2 : déplacement de la plaque.....	78
Tableau 4.3 : déplacement de la plaque U3.....	79
Tableau 5.1 : Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres.....	89
Tableau 5.2: Evolution de la probabilité de défaillance en fonction de la vitesse et de l'angle D'inclinaison.....	93
Tableau 5.3 : Etude de sensibilité par rapport à la moyenne.....	94
Tableau 5.4: Etude de sensibilité par rapport à l'écart type.....	94

INTRODUCTION GENERALE

Le risque est au cœur de la vie, il constitue un thème de réflexion majeur, un objet d'étude complexe et pluridisciplinaire, c'est une notion qui se développe et qui devient complexe au cours du temps et qui demande des modes et des mesures de traitement bien déterminés.

La plupart des sites industriels abritent des équipements et des réservoirs sous pression. Pour des raisons diverses, ils peuvent être endommagés et même éclater. Cette explosion peut engendrer de nombreux projectiles. Au cours de leur vol, ces derniers peuvent impacter d'autres équipements, tels que des réservoirs sous pression ou d'autres installations sensibles. Si une des cibles impactées subit une ruine mécanique, elle peut exploser et générer une nouvelle série de projectiles.

A travers cette description, on constate qu'en plus de la complexité du phénomène mécanique s'ajoute l'aspect aléatoire de ces phénomènes d'impact. C'est pourquoi dans le cadre de cette étude on s'intéresse à l'analyse mécanique et probabiliste de l'impact d'un projectile sur une plaque.

Dans un premier temps une modélisation numérique est proposée. Ensuite, un modèle probabiliste est mis en place en considérant un modèle analytique qui permet l'analyse de l'effet de l'impact.

CHAPITRE 1

LES RISQUES EN GENIE CIVIL

1. INTRODUCTION

Le risque est au cœur de la vie de notre société et de son organisation, il constitue un thème de réflexion majeur, un objet d'étude complexe et pluridisciplinaire, c'est une notion qui se développe et se complexifie au cours du temps et qui demande des modes et des mesures de traitement bien déterminés.

Dans ce contexte, l'étude de ce concept, au cours de ce premier chapitre, sera une priorité intrinsèque, ce chapitre propose en premier lieu une présentation spécifique du concept risque de sa définition pluridisciplinaire, à travers de nombreuses disciplines, jusqu'à ses dimensions ; sociale, spéciale et légale. Ensuite, il aborde les différentes méthodes de traitement qui existe dans le monde en vue de la réduction de ses conséquences sur les personnes, les biens et L'environnement.

2. HISTOIRE DU CONCEPT « RISQUE »

Le terme de « risque » est apparu bien plutôt dans la langue française, dès 1663, employait dans le domaine du commerce maritime. Auparavant, le risque tel que nous l'entendons aujourd'hui était remplacé par le terme « danger », apparu dans la langue française dès le 14^{ème} siècle. Cette évolution de la terminologie du risque est liée à son appréhension et à sa perception par l'homme au cours de l'histoire. Comme le soulignent Fabiani et Theys [10], l'histoire du risque se décompose en trois périodes : De l'antiquité à 1755, du milieu du 18^{ème} siècle au début du 20^{ème} siècle et de 1900 à nos jours. De l'antiquité au milieu du 18^{ème} siècle, les hommes disposent peu de connaissances techniques et par conséquent, ils expliquaient les phénomènes catastrophiques (séismes, inondations, épidémies...) qu'ils subissent comme des colères et des châtements divins, en réponse

à des péchés commis par les hommes sur terre. Durant la deuxième période (1755-début du 20^{ème} siècle), qui coïncide avec la révolution industrielle d'où l'apparition des dangers a eu lieu, l'homme et la société sont devenus de plus en plus capable à intervenir pour limiter les catastrophes, ils cherchaient les causes des accidents et comprenaient les catastrophes et des mesures de préventions sont alors développées. La troisième période de l'histoire du risque, de 1900 à nos jours, est marquée par une diversification des menaces d'origine anthropique avec l'introduction de nouvelles énergies (pétrole, électricité), de nouvelles technologies et le développement des modes de transport. Pour y faire face à les éviter, les autorités nationales et internationales ont mis des mesures de prévention et multiplient les textes de loi réglementant les activités et l'aménagement urbain. Ainsi la perception des risques a évolué au cours de l'histoire, parallèlement à l'évolution des connaissances.

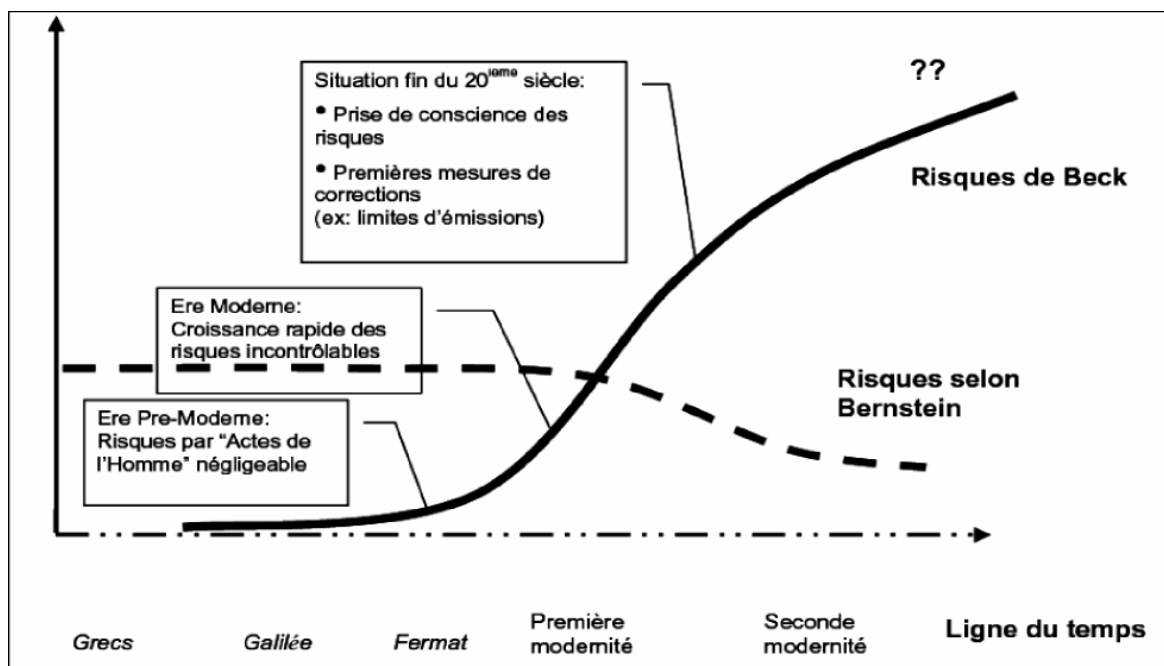


Figure 1.1 : Evolution des risques selon Beck Ulrich

3. LA CARACTERISATION DU RISQUE

Le risque se définit par la probabilité de survenue d'un événement potentiellement néfaste (l'aléa) et par la gravité de ses conséquences (enjeux). C'est la combinaison d'enjeux soumis à un aléa. On le trouve ainsi traduit de façon simple en termes mathématiques :

Risque = Aléa (événement) x Vulnérabilité (enjeux) ou encore :

Risque = Probabilité x gravité

Risques = Aléas x Vulnérabilité x Valeur.

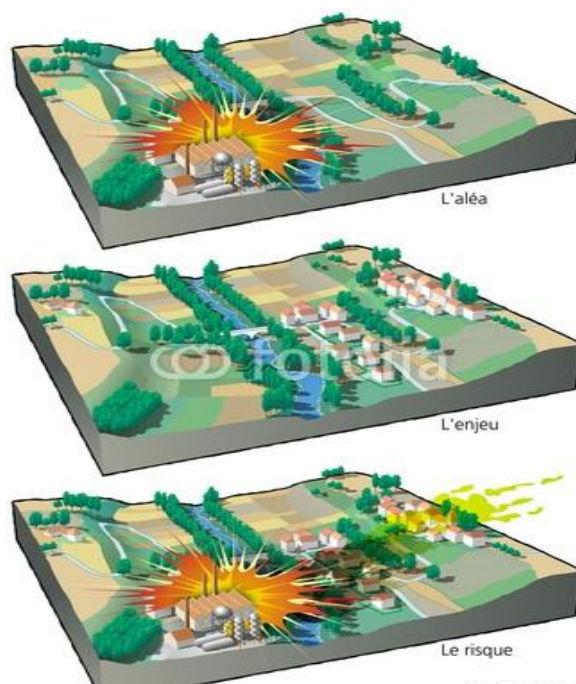


Figure 1.2 : Risque industriel majeur

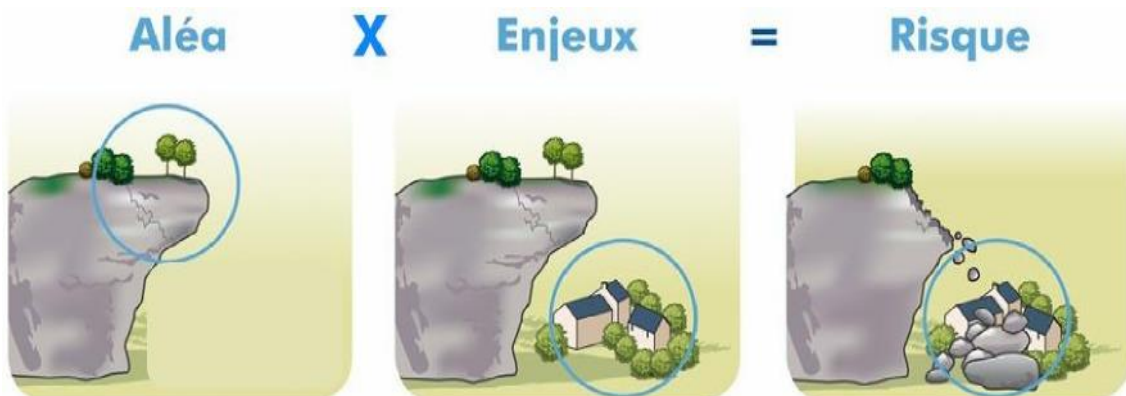


Figure 1.3 : Risque naturel majeur

3.1. L'ALEA

L'aléa est le phénomène destructeur observé indépendamment de l'enjeu exposé, il est caractérisé par une probabilité d'occurrence. Trois composantes essentielles forment l'aléa : L'intensité, la probabilité et la période de référence.

Dans le contexte des risques technologiques, ou plus largement des risques d'origine anthropique, le terme aléa est peu souvent employé à cause de son caractère aléatoire.

3.2. L'ENJEU OU ELEMENT EXPOSE :

Enjeux ou éléments exposés correspondent à la population, aux bâtiments et autres infrastructures humaines (réseau de communication, réseau de transports...), aux activités humaines (économiques, de loisirs, de service...) et au patrimoine culturel et environnemental (monuments, paysages, biodiversité...). Il existe une triple composante d'enjeux : Humaine, socio-économique, environnementale.

3.3. VULNERABILITE DES ELEMENTS EXPOSES :

La vulnérabilité est la sensibilité plus ou moins forte d'un enjeu à un aléa donné. Elle exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un événement sur les enjeux, des préjudices humains aux dommages matériels. La vulnérabilité diffère selon la nature de l'élément exposé (la nature d'un bâtiment n'est celle d'un axe de réseau de communication). En outre, il n'y a pas une vulnérabilité intrinsèque, mais bien une vulnérabilité par nature d'aléa.

Plusieurs types de vulnérabilité ont été identifiés tels que la vulnérabilité physique ou technique, la fonctionnelle, sociale, biophysique ou des lieux...etc.. La vulnérabilité des éléments exposés est influencée par différents facteurs.

Facteurs structurels :

Facteurs sociodémographiques et économiques : structure et mobilité de la population (densité, rythme de croissance, activité professionnelle etc.), renouvellement de la population, origine démographique et migrations, ...etc. ;

Facteurs socioculturels : cognitifs, éducatifs, perceptifs ; connaissances acquises et expériences des sinistres vécus, perception du risque par l'individu et le groupe ;

Facteurs physiques, techniques et fonctionnels : extension et qualité du bâti et des infrastructures, structure, accessibilité et disponibilité des secours.

- **Facteurs géographiques et conjoncturels :**

Facteurs géographiques : paramètres spatio-temporels de l'aléa ;

Facteurs conjoncturels : dysfonctionnements urbains et techniques imprévisibles.

4. LES CATEGORIES DE RISQUE :

4.1. LES RISQUES NATURELS :

4.1.1. LES INONDATIONS :

a- Définition : Une inondation est une submersion plus ou moins rapide d'une zone, avec des hauteurs d'eau variables ; elle est provoquée par des pluies importantes.



Figure 1.4 : Inondation à Alger



Figure 1.5 : Inondation en inde

b- Comment se manifeste une inondation ?

Une inondation peut être le fait :

- Soit de ruissellements localisés lors d'épisodes orageux (ex. : Nîmes) ;
- Soit de stagnations en plaine, suite à des pluies étalées et durables ;
- Soit de débordements de fleuves ou de rivières en crue (ex. : Vaison-la-Romaine) ; soit de remontées de nappes phréatiques.

c- Les facteurs aggravants des inondations

L'ampleur de l'inondation est fonction de :

- l'intensité et la durée des précipitations ;
- l'importance de la surface et de la pente du bassin versant ;
- la couverture végétale et la capacité d'absorption du sol ;
- le mauvais entretien de certains cours d'eau et de certains ouvrages hydrauliques ;
- la présence d'obstacles à la circulation des eaux.

Elle peut être aggravée à la sortie de l'hiver par la fonte des neiges.

De manière générale, on déplore aujourd'hui que les inondations soient des phénomènes plus fréquents et plus dommageables. De fait, la répétition et l'aggravation des inondations sont dues à l'accroissement de la population urbaine et l'extension des constructions sur les plaines alluviales (bas des versants, lits majeurs des cours d'eaux voire lits moyens). Celle-ci a été encouragée par la mise en place d'aménagements de protection et les bas prix des terrains. Cette nouvelle disposition à la fois créé l'objet du risque (population et infrastructures exposées) et modifié ses conditions (modification des sols, favorisation du ruissellement).

4.1.2. LES FEUX DE FORET

a- Définition : Les feux de forêts sont des incendies qui se déclarent et se propagent sur une surface d'au moins 1 hectare de forêt, de maquis, ou de garrigue.

b- Comment un feu de forêt survient-il ?

Pour se déclencher et progresser, le feu a besoin des trois conditions suivantes :

- Une source de chaleur (flamme, étincelle) : très souvent, l'homme est à l'origine des feux de forêts par imprudence (travaux agricoles et forestiers, cigarettes, barbecues, dépôts d'ordures...) accident ou malveillance ;
- Un apport d'oxygène : le vent active la combustion ;
- Un combustible (végétation) : le risque de feu est davantage lié à l'état de la forêt (sécheresse, disposition des différentes strates, état d'entretien, densité, relief...) qu'à l'essence forestière elle-même (chênes, conifères...)

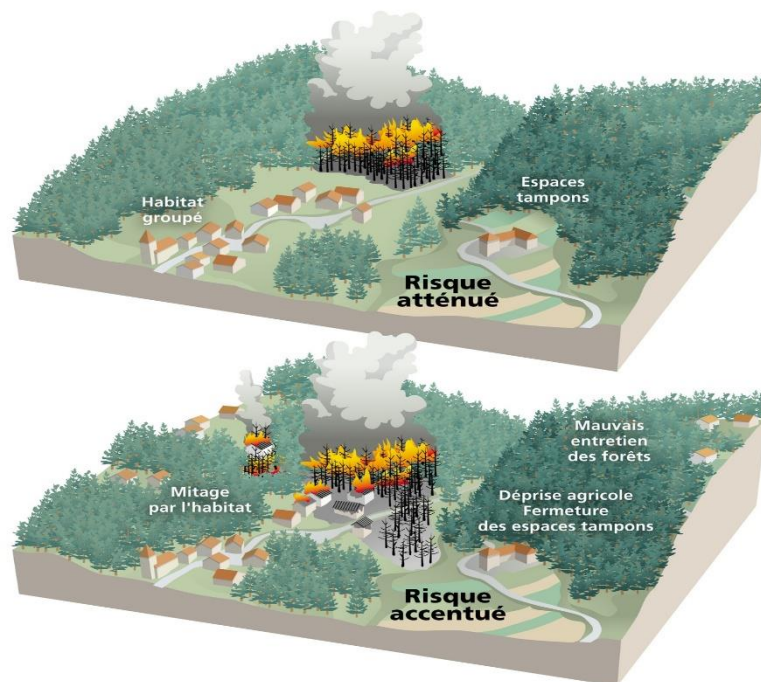


Figure 1.6 : Comment un feu de forêt survient-il

4.1.3. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

a- Définition : Un mouvement de terrain est un déplacement plus ou moins brutal du sol. Il est fonction de la nature et de la disposition des couches géologiques. Il est dû à des processus lents de dissolution ou d'érosion favorisés par l'action de l'eau et de l'homme. Les mouvements de terrain peuvent se traduire par des chutes de blocs, des éboulements en masse ou des glissements de terrain.



Figure 1.7: Dégât dû à un mouvement de terrains

b- Comment les mouvements de terrain se manifestent-ils ?

Les mouvements de terrain peuvent être successifs à :

b-1- En plaine

- Un affaissement plus ou moins brutal de cavités souterraines naturelles ou artificielles (mines, carrières...),
- Des phénomènes de gonflement ou de retrait liés aux changements d'humidité de sols argileux (à l'origine de fissurations du bâti),
- Un tassement des sols compressibles (vase, tourbe, argile...) par surexploitation ;

b-2- En montagne

- Des glissements de terrain par rupture d'un versant instable,
- Des écroulements et chutes de blocs,
- Des coulées boueuses et torrentielles ;

b-3- Sur le littoral

- Des glissements ou écroulements sur les côtes à falaises,
- Une érosion sur les côtes basses sableuses

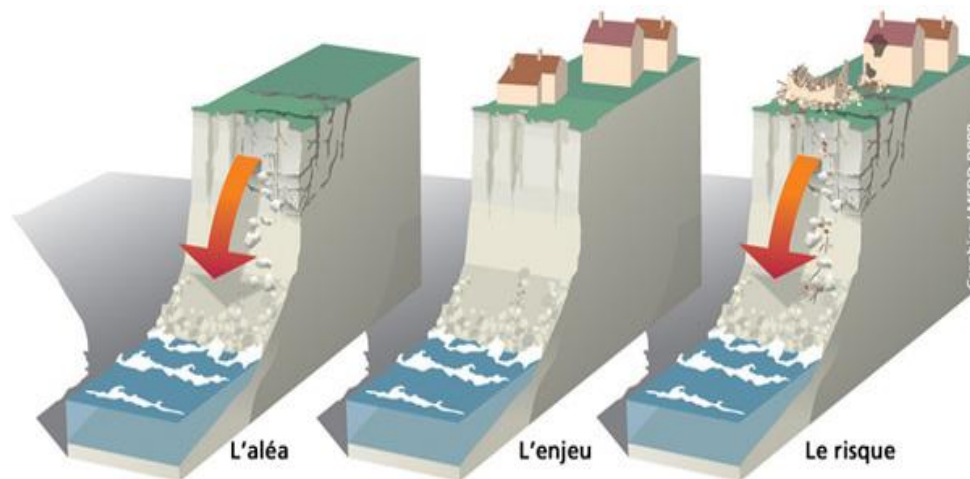


Figure 1.8 : Manifestation d'un mouvement de terrain sur le littoral

4.1.4. LES AVALANCHES

On distingue trois types d'avalanches:

a-1 Les avalanches de poudreuses :

Elles sont le résultat de dévalement de couches épaisses et peu cohérentes de neige issues de fortes précipitations neigeuses ;

a-2 Les avalanches de type "plaque à vent" :

Il s'agit de neiges plus ou moins récentes qui forment un manteau "mille feuilles" pouvant être emporté par le simple passage d'un skieur ;

a-3 Les avalanches de neige humide :

Elles proviennent du redoux et de la fonte des neiges du printemps, les pluies infiltrent le manteau neigeux provoquant ainsi des coulées de neige dans des couloirs.

b- Les menaces de la neige :

D'une manière plus générale, la neige provoque des nuisances sur plusieurs plans bien distincts :

- La viabilité hivernale : la neige menace la praticabilité des routes ;
- La surcharge imposée : la neige peut causer des dégâts aux bâtiments et aux équipements divers en provoquant une surcharge ;
- Les avalanches.



Figure 1.9: Degats du a la niège

c)- Les entités menacées se répartissent en 4 catégories :

- Les lieux habités,
- Les voies de communication,
- Les domaines skiabiles,
- Les aménagements industriels (barrages, lignes électriques, etc.).

4.1.5. LES SEISMES

a- Définition : Un séisme est une fracture brutale des roches en profondeur créant des failles dans le sol ou en surface et se traduisant par des vibrations du sol transmises aux bâtiments. Les dégâts observés sont fonction de l'amplitude, de la durée et de la fréquence des vibrations.

b- Caractéristiques des séismes :

Un séisme est caractérisé par:

- Son foyer (hypocentre) : c'est le point de départ du séisme, c'est à dire la région de la faille d'où partent les ondes sismiques (à plusieurs kilomètres en profondeur) ;
- Sa magnitude (Échelle de Richter de 1 à 9) : unique pour un même séisme, elle mesure l'énergie libérée par celui-ci ;
- Son intensité (Échelle MSK de I à XII) : variable selon les lieux en fonction, par exemple, de la distance par rapport au foyer ou de la nature du sol, elle mesure les dégâts provoqués en un lieu donné ;

- La fréquence et la durée des vibrations : ces deux paramètres ont une incidence fondamentale sur les effets en surface ;
- La faille provoquée (verticale ou inclinée) : elle peut se propager en surface

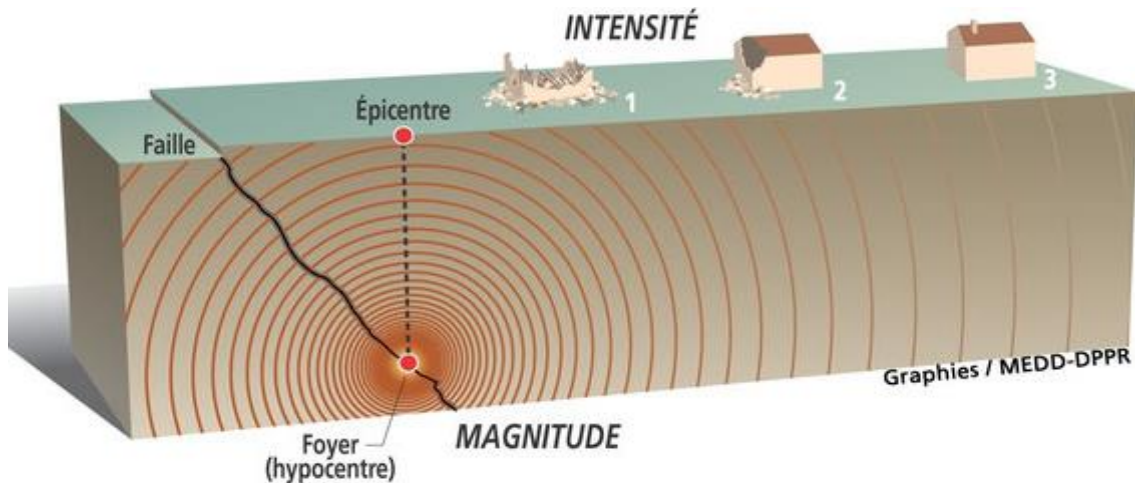


Figure 1.10 : Caractéristiques des séismes

4.1.6. LES VOLCANS

a- **Définition** : Un volcan est une ouverture mettant en la surface du globe avec les profondeurs, permettant a des matériaux terrestre de venir en surface (sous forme de laves, gaz). Ce phénomène est intermittent, les phases d'émission alternant avec des phases de sommeil qui peuvent être très longues (jusqu'à plusieurs centaines d'années): le volcan est dit vivant.



Figure 1.11: Coulées boueuses volcaniques

Un volcan est considéré comme éteint si le temps écoulé depuis sa dernière éruption est très supérieur à la moyenne des périodes de sommeil passées : cela ne veut pas dire qu'il ne puisse se réveiller un jour.

b- Les différents types d'éruptions volcaniques :

Il existe plusieurs sortes d'éruptions :

- Les éruptions magmatiques : le magma, roche fondue contenant des gaz dissous, monte à la surface où il se sépare en lave et en gaz,
- Les éruptions phréatiques : libération soudaine d'une grande quantité de vapeur d'eau, à pression et température élevées, provoquant l'éjection de matériaux de toutes tailles (blocs et poussières),
- Les éruptions phréatomagmatiques : elles sont dues à la rencontre du magma ascendant avec une nappe phréatique ou une eau superficielle (lac, cours d'eau...) le magma sort en même temps que l'eau,
- Les lahars : coulées boueuses volcaniques,
- Les éruptions gazeuses carboniques.

4.1.7. LES TEMPETES

a- Définition : Les tempêtes constituent une catégorie de vents violents, par l'échelle de "Saffir-Simpson". Physiquement, elles sont le résultat de l'interaction d'une petite perturbation véhiculée au sein d'un courant de vent violent et glacé, et d'un tourbillon de la basse atmosphère alimenté en eau et en chaleur par l'océan. Sur le littoral, une tempête peut se manifester en plus des effets dus aux vents violents eux-mêmes par un effet de destruction par les vagues des ouvrages de protection (digues) et des bâtiments proches du front de mer, ainsi que par un effet d'inondation par accumulation des eaux et éventuellement remontée d'eau dans les réseaux pluviaux.

4.2. LES RISQUES TECHNOLOGIQUES :

4.2.1. LES RISQUES INDUSTRIELS :

a- Définition : Le risque industriel peut se définir comme tout événement accidentel se produisant sur un site industriel et entraînant des conséquences immédiates graves pour les populations avoisinantes, les biens ou l'environnement. Sont donc concernées toutes les activités nécessitant des quantités d'énergie ou de produits suffisamment importants pour qu'en cas de dysfonctionnement, la libération intempestive de ces énergies ou produits aient des conséquences au-delà de l'enceinte de l'usine. Afin d'en limiter la survenue et les conséquences, les établissements les plus dangereux sont soumis à une réglementation stricte et à des contrôles réguliers.

b- Les manifestations du risque industriel

Certaines entreprises, de par les produits qu'elles fabriquent ou qu'elles stockent, peuvent présenter :

- **Un risque d'incendie (effet de chaleur) :**

Ce risque peut entraîner brûlures et asphyxie, suite à l'inflammation des produits : soit au contact d'autres produits, soit au contact d'une flamme ou d'un point chaud.

- **Un risque d'explosion (projectiles et effet de souffle) :**

Ce risque peut entraîner des traumatismes directs ou par l'onde de choc ; il est dû :

- Soit à la libération brutale de gaz,
- Soit au mélange de certains produits,
- Soit à la présence de produits explosifs.

- **Un risque de pollution :**

De l'air (nuage toxique) : c'est le risque le plus grave pour les populations éloignées du site ; Du sol ou de l'eau. La toxicité des produits dangereux peut se révéler par inhalation (en les respirant), par ingestion (en les avalant) ou par contact (en les touchant). Parfois, plusieurs de ces risques sont combinés pour une même usine.

4.2.2. LES RUPTURES DE BARRAGE

a- Définition d'un barrage : Un barrage est un ouvrage naturel ou artificiel, généralement établie en travers d'une vallée, transforment en réservoir d'eau un site naturel approprié. Si la hauteur est supérieure ou égale a 20 m et le retenue d'eau supérieur à 15 million de m³ il est appelé "grand barrage".

Un barrage est un ouvrage naturel ou artificiel, généralement établi en travers d'une vallée, transformant en réservoir d'eau un site naturel approprié. Si la hauteur est supérieure ou égale à 20 m et la retenue d'eau supérieure à 15 millions de m³, il est appelé "grand barrage".

Les barrages servent principalement à la régulation des cours d'eau, à l'alimentation en eau des villes, à l'irrigation des cultures, au soutien d'étiage, à la production d'énergie électrique et au tourisme et aux loisirs.

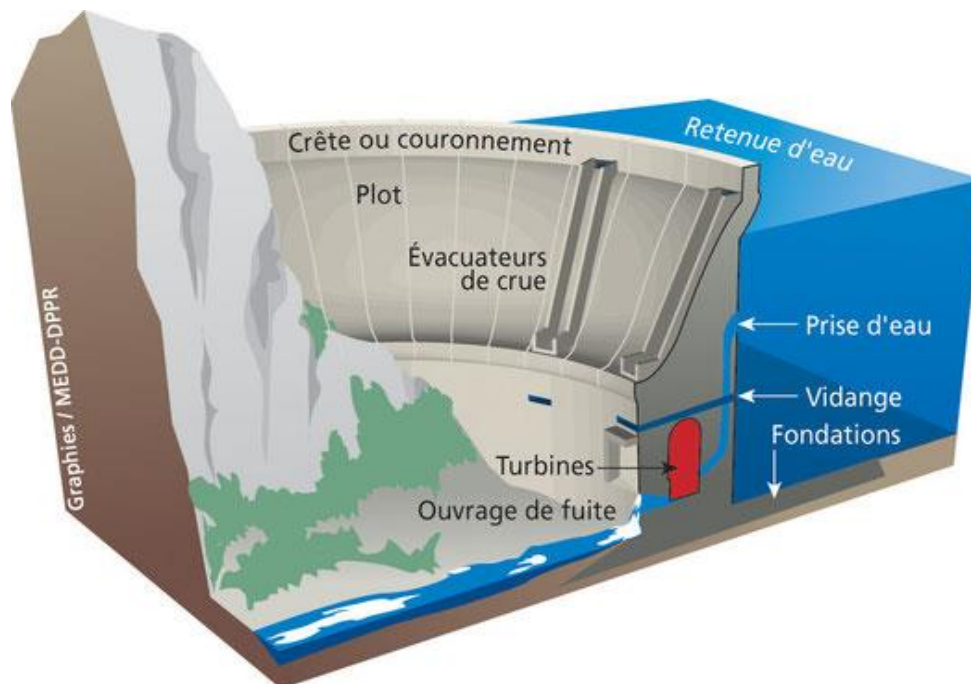


Figure 1.12: Illustration d'un barrage

b- Le risque de rupture de barrage :

Le risque de rupture brusque et imprévue est aujourd'hui extrêmes faible ; la situation de rupture pourrait plutôt venir de l'évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage. Une rupture progressive laisserait le temps de mettre en place la procédure d'alerte et de secours des populations.

En revanche, une rupture partielle ou totale brusque produirait une onde de submersion très destructrice dont les caractéristiques (hauteur, vitesse, horaire de passage...) ont été étudiées en tout point de la vallée. Dans cette zone et plus particulièrement dans la zone "du quart d'heure" (zone dans laquelle l'onde mettrait moins d'un quart d'heure pour arriver), des plans de secours et d'alerte ont été établis dès le projet de construction du barrage. Il convient enfin de noter que les séismes n'ont jamais provoqué de dégâts sérieux sur des barrages, qu'ils soient en remblai ou en maçonnerie ; cette observation s'est à nouveau confirmée lors des récents séismes d'Arménie en 1988 et de Californie en 1989.

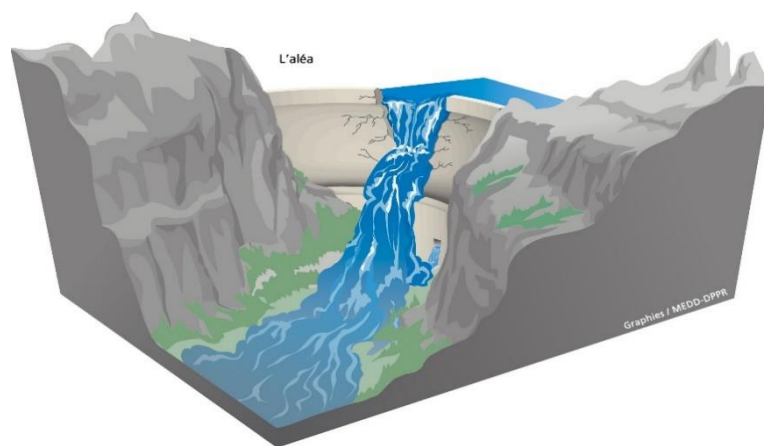


Figure 1.13: Rupture d'un barrage

c- Les facteurs menaçant l'ouvrage sont:

- Les accidents géologiques dont le poids de l'eau retenue en est parfois la cause (ex: glissements de terrain),
- La perturbation du fonctionnement de la rivière (crues moins fréquentes surprenant les riverains),
- La libération potentielle de la quantité d'eau retenue.

4.2.3. LES TRANSPORTS DE MATIERES DANGEREUSES:

a- Définition : Le risque de transport de matière dangereuse est consécutif à un accident se produisant lors du transport, par voie routier, ferroviaire, aérienne, d'eau ou par canalisation, de matières dangereuses. Il peut entraîner des conséquences graves pour la population, les biens ou l'environnement. Les produits dangereux sont nombreux ; ils peuvent être inflammables, toxiques, explosifs, corrosifs ou radioactifs.

b- La manifestation des accidents de T.M.D:

Les principaux dangers liés aux T.M.D. sont:

- L'explosion occasionnée par un choc avec étincelle, par le mélange de produits avec des risques de traumatisme direct ou par l'onde de choc,
- L'incendie à la suite d'un choc, d'un échauffement ou d'une fuite avec des risques de brûlures et d'asphyxie,
- La dispersion dans l'air (nuage toxique), l'eau et le sol de produits dangereux avec risques d'intoxication par inhalation, par ingestion ou par contact, sans oublier les risques pour l'environnement (animaux et végétaux) du fait de la pollution du sol ou de l'eau (contamination).

Ces manifestations peuvent être associées.

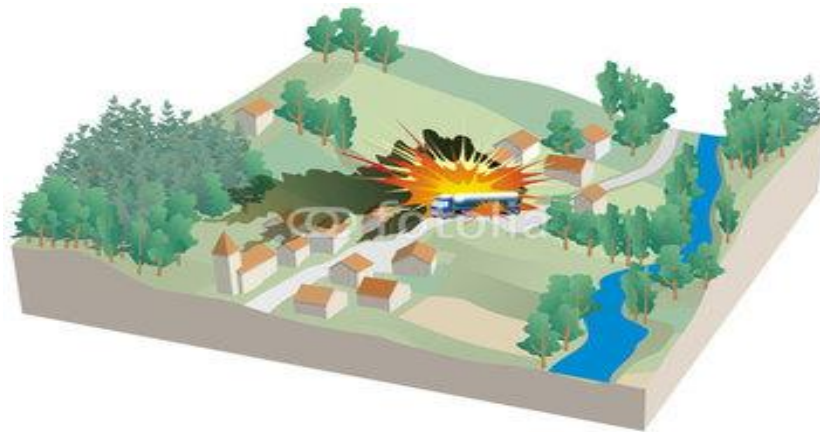


Figure 1.14 : Manifestation des accidents de T.M.D

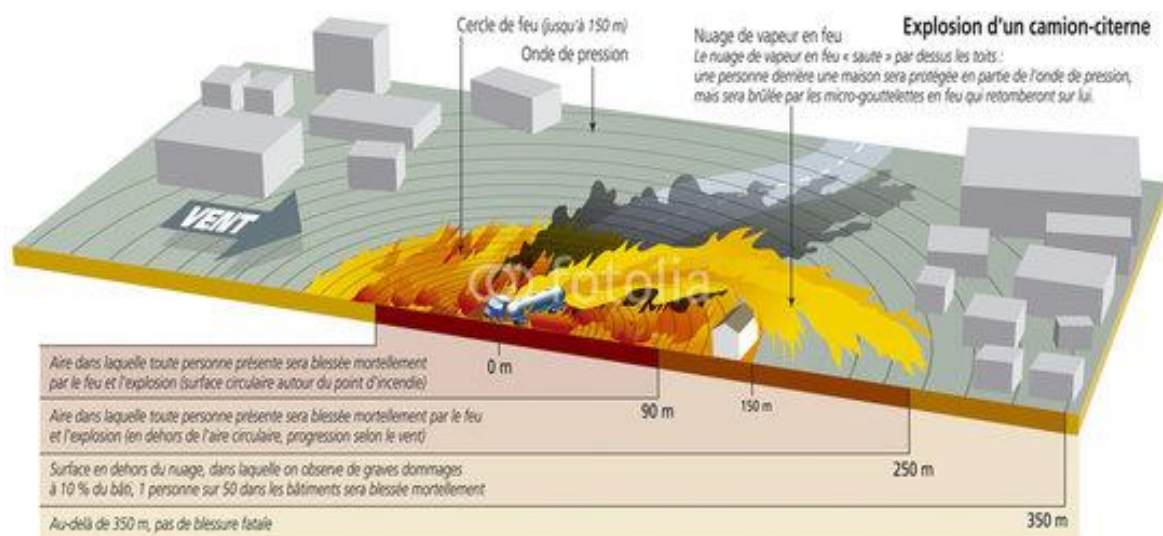


Figure 1.15 : Manifestation des accidents de T.M.D

4.2.4. LES RISQUES NUCLEAIRES

a- Définition : Le risque nucléaire est un événement accidentel mettant en jeu des matières radioactives (classiquement dans les centrales nucléaires), avec des risques d'irradiation ou de contamination pour le personnel, les populations avoisinantes, les biens ou l'environnement. Le risque nucléaire majeur est fusion de cœur d'une centrale nucléaire.

b- Caractéristiques du risque nucléaire :

En cas d'accident majeur, les risques sont de deux ordres:

- Risques d'irradiation par une source radioactive : en France, ce risque ne concerne que le personnel de la centrale ;
- Risque de contamination par les poussières radioactives dans l'air respiré (nuage) ou déposées sur le sol (aliments frais, objets).
- Les conséquences pour l'individu sont fonction de la dose absorbée (durée d'exposition, proximité de la source radioactive...). On se protège de l'irradiation par des écrans (plomb, métal) et de la contamination par le confinement.

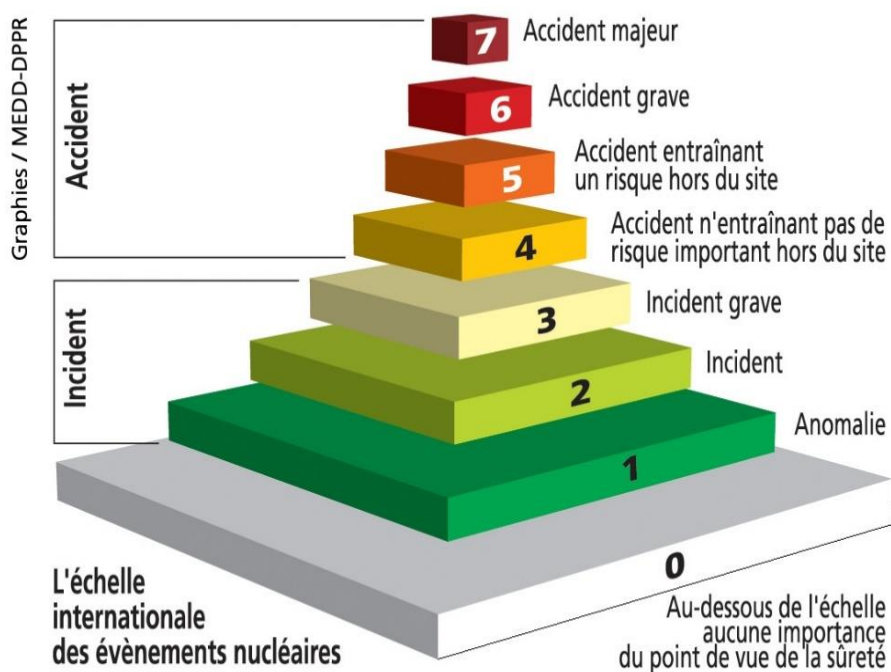


Figure 1.16 : Caractéristiques du risque nucléaire

4.2.5. LES RISQUES BATIMENTAIRES

Il peut s'agir de menace de ruines ou de risque plus diffus tels que les risque d'amiante, de feux de bâtiment, de rejets toxique, de sols polluées, etc. Actuellement, les villes se reconstruisent sur elles-mêmes plus qu'elles ne s'étendent. Les problèmes d'aménagement sont essentiellement posés par les terrains les moins chers en particulier les friches urbaines (classiquement résultant d'usines laissées à l'abandon). Leur conversion est coûteuse : démolition, dépollution, redécoupage des îlots, création d'équipements, etc. De tels terrains, qu'ils soient à l'abandon ou en cours de réhabilitation présentent des menaces pour les parcelles avoisinantes.



Figure 1.17: Dégâts d'un séisme

4.2.6. LES RISQUES DE RESEAUX

L'exploitation de réseaux technique (eau, électricité, gaz) en milieu urbain pose plusieurs problèmes de sécurité liée au confinement, aux interactions avec l'environnement et les populations, à la prévention, etc. Les risques induits peuvent être directement dus à des défauts de conception et d'implantation, ou à des défaillances dans la maintenance et l'exploitation. Par ailleurs, l'indisponibilité provisoire d'un réseau (d'énergie, de transport ou de communication) est susceptible de paralyser les parties du territoire dont le

fonctionnement est tributaire de ce réseau. Les dommages en chaîne provoqués par ces perturbations sont souvent du même ordre de grandeur que les dommages occasionnés directement par l'action physique du phénomène.

Les risques de réseaux sont plus amplement traités dans le chapitre qui leur est consacré à la fin de cet ouvrage.

Catégorie de risque		Risque
Risques naturels		Inondation
		Feux de forêt
		Mouvement de terre
		Avalanches
		Séisme
		Volcans
		Cyclone tempêtes
Risque technologique		Risques industriels
		Risque de rupture de barrage
		Risque de transport de matière dangereuse
		Risque nucléaire
Risque urbains	Risque de Bâtimentaires	Menace de ruine
		Risque diffus (chantier matériaux)
	Risque de réseaux	Transport
		Communication
		Energie (gaz, électricité, eau ...)
	Risque de société	Menaces pour la tranquillité publique, la sécurité des personnes
Menaces pour la sécurité des biens		
Risque sanitaire et environnementaux		Toxicité, pollution
		Maladies épidémies
		Risque alimentaire

Tableau 1 : Liste détaillée des différents risques

5. LE RISQUE ZERO N'EXISTE PAS

Dans les sociétés occidentales, la population éprouve généralement un sentiment de sécurité envers les ouvrages dans lesquels elle vit et travaille. Ce sentiment résulte du fait qu'une grande part des risques susceptibles d'affecter les ouvrages ont été correctement anticipés et traités par les ingénieurs. Les règles employées pour la conception et la construction assurent le plus souvent une sécurité effective. Les risques ne sont alors perçus que lorsque surviennent des accidents ou des défaillances spectaculaires.

Certaines catastrophes ont eu un large retentissement (la rupture du Pont de Tacoma, l'effondrement des tours jumelles du World Trade Center, l'écroulement de la tribune du stade Furiani à Bastia). Plus récemment, l'effondrement du Terminal E de Roissy ou la défaillance brutale du pont autoroutier de Minneapolis sur le Mississippi nous ont rappelé que les ingénieurs ne sont pas infaillibles et que ces phénomènes spectaculaires peuvent affecter aussi bien des ouvrages anciens que des ouvrages neufs.

Ces événements sont très différents, par leur nature aussi bien que par leurs causes ou leurs conséquences. Des défaillances moins exceptionnelles ou des accidents, plus ou moins graves, se produisent régulièrement, et suscitent souvent un écho bien moindre. L'échantillon de 10 nouvelles rassemblées ci-dessous couvre, à titre d'illustration, l'année 2007, sans viser à l'exhaustivité.

6. GESTION DU RISQUE

La gestion du risque est un processus itératif qui suit les étapes suivantes:

- Identification des sources de danger
- Evaluation des risques
- Mettre en place des mesures d'urgence
- Déterminer si le risque a été réduit
- Faire une analyse coût-bénéfices
- Mettre en place les mesures de réduction à un niveau aussi bas que raisonnablement praticable (ALARP ; As Low as Reasonably practicable).

6.1. DEMARCHE D'UNE ETUDE DE DANGER

L'enchaînement de ces différentes phases d'une étude de danger est décrit de manière schématique dans **la Figure1.18**. Ci-dessous.

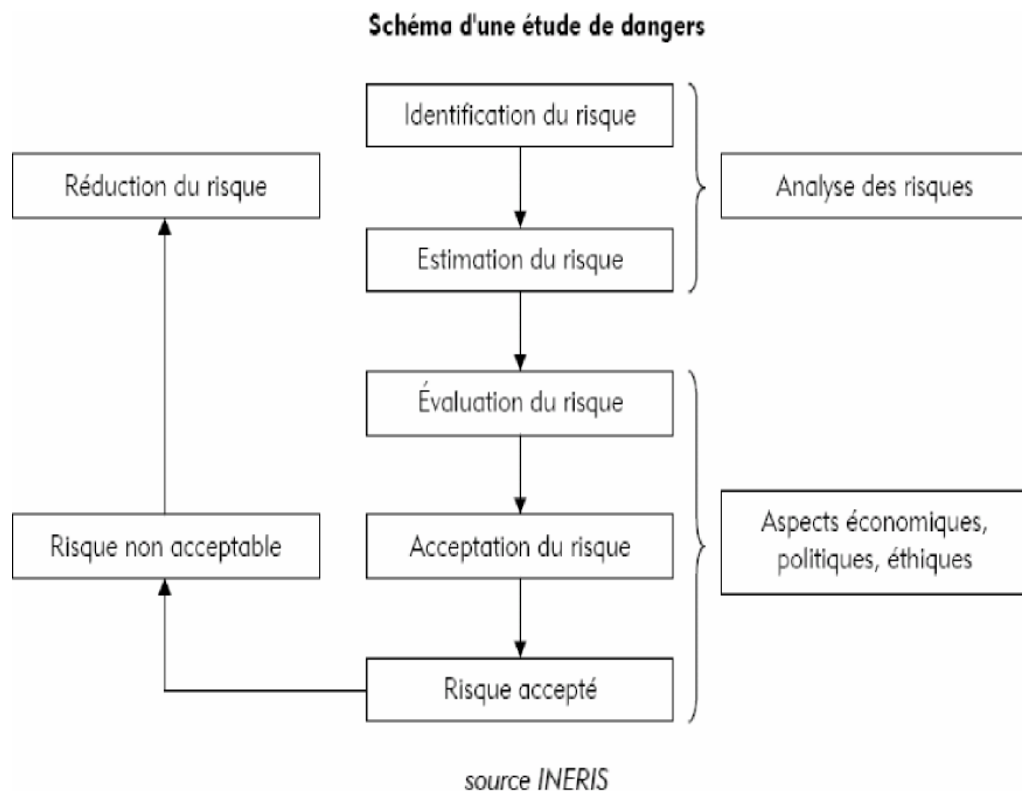


Figure 18 : Méthodologie d'une étude de danger [10]

6.2. ANALYSE DU RISQUE

L'analyse du risque est définie comme (l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque). L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens. Dans un second temps, l'analyse des risques permet de mettre en lumière les barrières de sécurité existantes en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (barrières de prévention) ou d'en limiter les conséquences (barrières de protection). Consécutivement à cette identification, il s'agit enfin d'estimer les risques en vue de hiérarchiser les risques identifiés au cours de l'analyse et de pouvoir comparer ultérieurement ce niveau de risque à un niveau jugé acceptable. Il est entendu que l'acceptation du risque est subordonnée à la définition préalable de critères d'acceptabilité du risque.

6.3. EVALUATION DU RISQUE

L'évaluation du risque désigne une procédure fondée sur l'analyse du risque pour décider si le niveau ALARP est atteint en comparant le niveau de risque estimé à un niveau jugé acceptable ou tolérable dans le cadre ALARP. Le processus de l'évaluation des risques comporte :

- L'identification des dangers.
- La compréhension de la nature de ces dangers.
- L'évaluation des conséquences (à court et à long terme).
- L'évaluation de la probabilité de leur occurrence.
- L'évaluation des risques consiste en un ensemble d'étapes qui sont illustrées

dans la figure suivante :

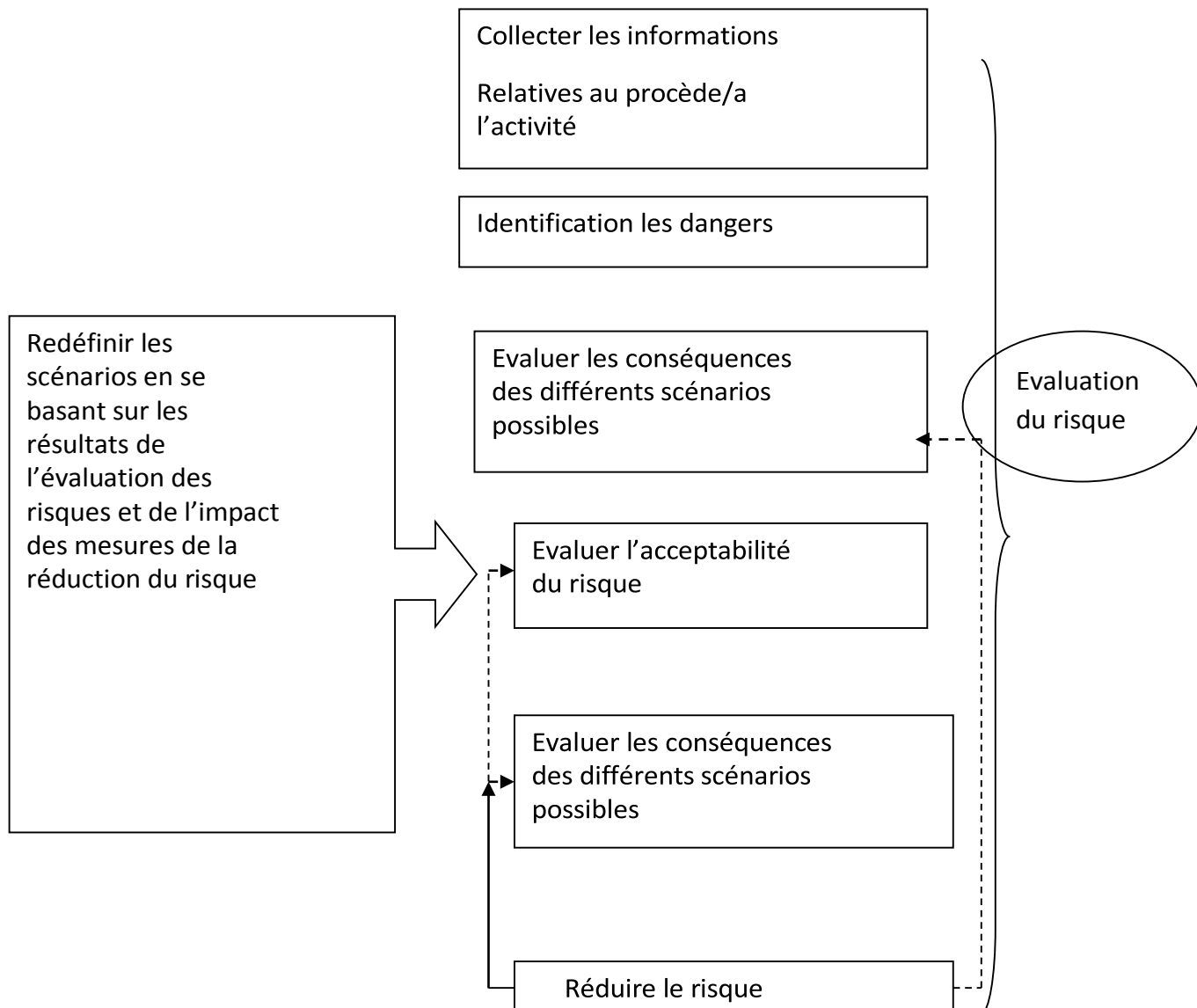


Figure1.19. L'évaluation des risques [10]

6.4. ACCEPTABILITE DU RISQUE :

La définition de critères d'acceptabilité du risque est une étape-clé dans le processus de gestion du risque dans la mesure où elle va motiver la nécessité de considérer de nouvelles mesures de réduction du risque et rétroactivement, influencer les façons de mener l'analyse et l'évaluation des risques. En jugeant la tolérabilité au risque, il est suggéré d'appliquer un certain nombre de critères, en particulier, l'hygiène, sécurité et environnement(HSE)

Le risque individuel des travailleurs dépassant la limite de 10^{-3} par an, est considéré intolérable. S'il n'y a pas d'amélioration de la réduction du risque d'une manière fondamentale, les opérations ne peuvent continuer que s'il n'y a aucune autre solution alternative et les travailleurs sont bien informés des risques encourus et bien formés pour ce type d'activité

Sans préjudice pour ce qui précède, le risque individuel pour tout travailleur compris entre 10^{-3} et 10^{-6} /an est considéré tolérable s'il est démontré que le risque est aussi bas que raisonnablement praticable (ALARP : voir ci-dessous).

Si le risque individuel pour tout travailleur est inférieur à 10^{-6} par an ; celui-ci est jugé largement acceptable donc il n'y a pas lieu de considérer de plus amples améliorations sous réserve que les précautions de sécurité restent maintenues à leur niveau (amélioration continue).

Le risque individuel pour toute personne civile (en dehors du personnel de l'entreprise), est considéré intolérable s'il est supérieur à 10^{-4} par an, largement acceptable s'il est inférieur à 10^{-7} par an et devrait être réduit ALARP entre ces deux valeurs.

6.5. REDUCTION DU RISQUE

La réduction ou maîtrise du risque comprend l'ensemble des mesures, actions, et dispositions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier lorsque celui-ci est jugé intolérable.

De manière générale, les mesures de maîtrise/réduction du risque concernent :

- **La prévention** : c'est-à-dire la réduction de la probabilité d'occurrence de la situation de danger à l'origine du dommage.
- **La protection** : c'est-à-dire limiter la gravité du dommage considéré. Notons que, suivant cette définition, l'intervention pourra être considérée comme un moyen de protection.

6.6. DEMARCHE POUR L'ANALYSE DES RISQUES

Cette démarche se décompose généralement en plusieurs étapes : Une étape préliminaire pour définir clairement le cadre de l'analyse des risques : Définition du système à étudier et des objectifs à atteindre. Une étape consistant en la collecte des données pour mener le travail d'analyse de manière efficace : Recueil des informations indispensables à l'analyse des risques. Une étape consistant en un choix judicieux du ou des outils d'analyses et éventuellement d'une matrice de risque avec échelle de cotation des risques et une grille de criticité : Définition de la démarche à adopter. Et enfin une équipe pluridisciplinaire composée de spécialistes pour mener à bien l'ensemble des tâches : Mise en œuvre de l'analyse de risques dans le cadre d'un groupe de travail.

6.7. LES METHODES D'ANALYSE DE RISQUE

Différentes techniques pour une identification qualitative et/ou quantitative des dangers et une analyse de risques qualitative sont largement répandues. Il s'agit en fait de choisir la technique ou combinaison de techniques la mieux adaptée pour répondre aux objectifs fixés. Pour la réalisation de cette tâche, il s'agira également de définir le groupe de travail qui participera à la réflexion et, le cas échéant, de fixer des échelles de cotation des risques et une grille de criticité. Parmi les techniques les plus fréquemment utilisés nous citerons:

- Contrôle de sécurité (Security review)
- Safety auditing
- L'Analyse Préliminaire des Risques (APR),
- L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC),
- L'Analyse des risques sur schémas type HAZOP ou « What-if ? »,
- L'Analyse par arbre des défaillances,
- L'Analyse par arbre d'évènements,
- Le Nœud Papillon,
- L'analyse des causes/conséquences
- Méthode d'analyse HAZOP

Il existe deux grands types de démarches en vue d'analyser les risques :

La démarche inductive et la démarche déductive. Dans une approche inductive, une défaillance ou une combinaison de défaillances est à l'origine de l'analyse. Il s'agit

alors d'identifier les conséquences de cette ou ces défaillances sur le système ou son environnement. On dit généralement que l'on part des causes pour identifier les effets. Les principales méthodes inductives utilisées dans le domaine des risques accidentels sont :

L'Analyse Préliminaire des Risques, l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC), HAZOP, l'analyse par arbre d'évènement.

A l'inverse, dans une approche déductive, le système est supposé défaillant et l'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état. On part alors des effets pour remonter aux causes. L'arbre des défaillances constitue une des principales méthodes déductives.

6.8. Domaines d'application:

Les méthodes d'analyse des risques doivent être choisies en fonction des caractéristiques des installations à étudier et du niveau de détail recherché. Ainsi, il est possible de différencier les méthodes telles que l'**APR** réservée à une analyse (en surface) des risques ou à des installations peu complexes et les méthodes dédiées à une analyse plus détaillée et généralement centrée sur des systèmes thermo hydrauliques, comme **HAZOP**.

Ces différentes informations sont synthétisées dans le Tableau 1.2, pour les principales méthodes d'analyse des risques dans le domaine des risques accidentels.

Désignation de la méthode	Principe de la méthode
Analyse Préliminaire des Risques (APR)	Identification et évaluation des risques de manière préliminaire à l'utilisation de méthodes d'analyse plus précises ou sur un système peu complexe adapté à la conception d'installations nouvelles.
Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)	Méthode inductive qui analyse les conséquences d'une défaillance élémentaire sur un système technique.
Hazard and Operability study (HAZOP)	Utilisée surtout pour les systèmes thermo hydrauliques, cette méthode permet d'étudier à priori les conséquences d'écarts locaux de fonctionnement (paramètres tels que T
Arbre de Défaillances	Schéma logique arborescent qui permet de relier par une méthode déductive l'événement indésirable aux événements élémentaires susceptibles de l'entraîner.
Arbre d'Evénements	Schéma logique arborescent qui permet de relier par une méthode inductive l'événement initiateur aux événements élémentaires susceptibles de l'entraîner.

Tableau 1.2 : Les méthodes d'analyse des risques [10]

CHAPITRE 2

LE RISQUE INDUSTRIEL

1. PROBLEMATIQUE

Un site industriel abrite diverses installations sous pression, notamment des réservoirs contenant des gaz ou des liquides. L'analyse des accidents passés montre que les réservoirs remplis de gaz peuvent exploser à cause d'une ou plusieurs raisons combinées suivantes :

- Le feu, la cause la plus fréquente, diminue la capacité des équipements à résister à la pression interne. Simultanément, il y a une élévation de la pression et de la température des fluides internes, ce qui peut entraîner un changement de phase brutal. La combinaison de ces deux effets peut engendrer l'apparition de fissures.
- Une surpression peut aussi endommager les installations.
- Une agression mécanique extérieure par un projectile peut perforer la cible ou générer des ondes de choc dans le réservoir impacté et conduire à une rupture de celui-ci.
- La corrosion et la fatigue peuvent également causer la rupture des équipements.

Dans tous les cas, si la fissure se propage plus rapidement que la fuite des fluides, le réservoir explose et peut générer des fragments comme le montre la Figure 1. Toutefois, certaines explosions ne génèrent aucun fragment.



Figure 2.1: Accident de Flixborough, UK (1974) [27].

Des fragments sont projetés aux alentours et peuvent impacter des installations voisines au cours de leur mouvement. Ils peuvent pénétrer ces installations partiellement ou les perforer entièrement lors de l'impact. Si l'équipement impacté est un réservoir sous pression, il est possible qu'il explose et génère une nouvelle série de projectiles. Ces derniers peuvent, à leur tour, constituer des menaces pour les installations voisines. Ils peuvent impacter d'autres réservoirs et générer des explosions. Il peut y avoir un enchaînement de processus catastrophiques successifs : c'est ce qu'on appelle l'effet domino ou le sur accident. L'accidentologie montre que ce phénomène peut être à l'origine d'un grand nombre de rupture d'installations et causer de nombreuses victimes, comme ce fut le cas à Mexico City en 1984 où 650 personnes ont péri [27].

Tout d'abord, l'importance de l'analyse des accidents industriels est montrée en examinant trois accidents passés :

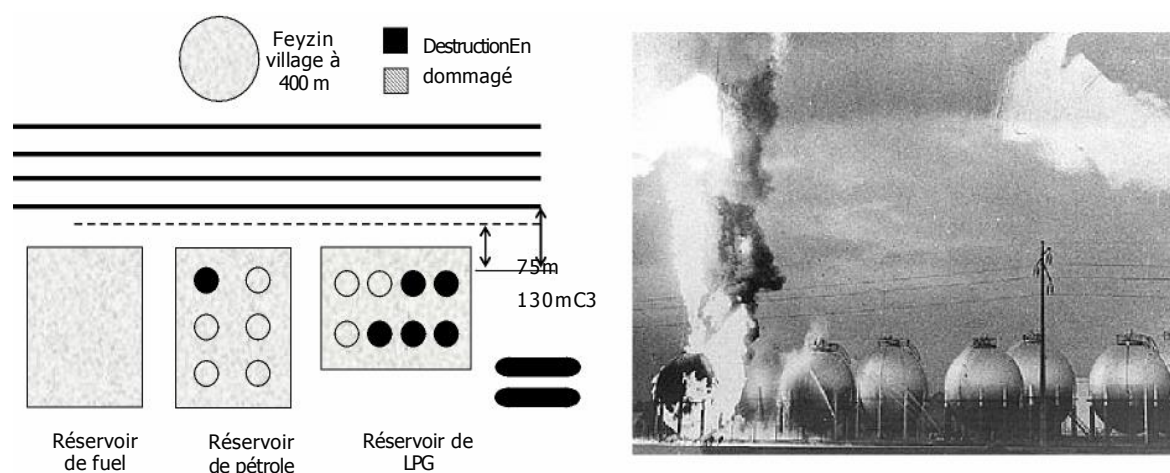
- L'accident de Feyzin, France en 1966,
- L'accident de Mexico, Mexique en 1984,
- L'accident de Vishakhapatnam, Inde en 1997.

Cette analyse sert à développer une approche globale en contribution à l'analyse du risque d'effet domino.

2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ACCIDENTS MAJEUR

2.1. ACCIDENT DE FEYZIN, France

En janvier 1966, ce site disposait de quatre sphères de propane de 1200 m³, de quatre sphères de butane de 2000 m³, d'un réservoir cylindrique horizontal de butane, d'un autre de propane et des réservoirs de GPL comme le montre la Figure 2.



(a) Disposition du site de stockage de GPL;

(b) Explosions des réservoirs sphériques.

Figure 2.2: Accident de Feyzin, France (1966) [27]

Malheureusement, le 04 janvier, à 7h15, une mauvaise manœuvre provoqua une fuite de gaz dans une enceinte sphérique de propane donnant naissance à une nappe gazeuse de 1,5 m de hauteur qui se propagea jusqu'à l'autoroute, où le passage de véhicules enclencha l'allumage de la nappe. Une demi-heure plus tard, une seconde sphère de propane explosa par BLEVE et provoqua l'ouverture d'une troisième sphère (sans BLEVE). Au total, onze réservoirs furent détruits et des projectiles s'éparpillèrent sur 800 mètres autour du site. L'accident causa la mort de 18 personnes et en blessa 84. On retrouva des débris jusqu'aux alentours de Vienne située à 18kilomètres de Feyzin: 1475 constructions furent affectées.

2.2. ACCIDENT DE MEXICO

A 5h30 environ le 19 novembre 1984, un accident majeur est survenu à San Juan Ixhuatepec, Mexico, Mexique. Un feu et une série d'explosions ont complètement détruit un site industriel de stockage de GPL. Ce site abritait quatre sphères de GPL d'un volume unitaire de 1600 m³, deux sphères de 2400 m³ et quarante-huit réservoirs cylindriques horizontaux de 36 m³ à 270 m³.

La cause de départ de l'accident est la rupture d'une canalisation (de 200 mm de diamètre) lors du remplissage d'un réservoir. Le fluide s'est alors enflammé donnant naissance à un nuage de fumée, qui se propagea sur le site et ses alentours. Rapidement, une grosse explosion eut lieu provoquant la rupture de type BLEVE de deux petites sphères, ce qui généra une boule de feu. Les deux autres petites sphères ont été détruites. Les fragments des réservoirs sphériques ont été éparpillés sur 590 mètres autour du site. Parmi les réservoirs cylindriques, quatre d'entre eux sont demeurés sur leur support alors que onze sont tombés de celui-ci. Les fragments des trente-trois autres ont été projetés sur une distance allant jusqu'à 1,2 kilomètres, voir la Figure 1.3. Cet accident blessa 7000 personnes et provoqua la mort de 650 autres. 39000 personnes durent être évacuées [Holden P.L., 1988 ; INERIS, 2002a].



(a) Réservoirs sphériques



(b) Réservoirs cylindriques

Figure 2.3: Accident de Mexico, Mexique (1984) [27].

2.3. ACCIDENT DE VISHAKHAPATNAM, INDE

Le 14 septembre 1997, dans une raffinerie de la Hindustan Petroleum Corporation Limited à Vishakhapatnam, Inde, l'explosion d'un réservoir provoqua une série d'accidents majeurs. A 6h40, en raison de la corrosion, un des réservoirs sphériques remplis de GPL se rompit, s'enflamma puis explosa. Cette explosion ébranla entièrement la ville. D'autres explosions suivirent et le feu se propagea sur tout le site.

Au total, vingt-cinq réservoirs furent endommagés et dix-neuf bâtiments s'effondrèrent. Cet accident provoqua la mort de soixante personnes et entraîna plus de quinze millions de dollars de dégâts matériels. Cet accident est réputé être l'un des événements les plus catastrophiques des industries chimiques dans le monde.



Figure 2.4 : Accident de Vishakhapatnam, Inde (1997) [27]

3. IMPORTANCE DE L'ANALYSE DES ACCIDENTS INDUSTRIELS :

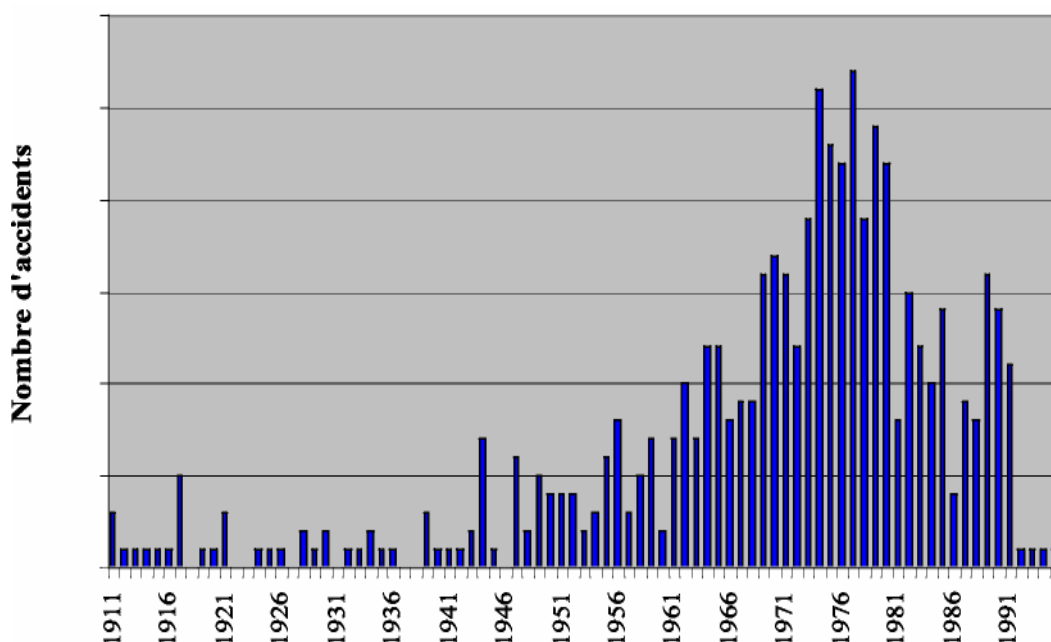


Figure 2.5 : Accidents industriels entre 1911 et 1995. [27,15]

Les rapports sur les accidents passés ont dénombré 67 accidents majeurs entre 1951 et 1984 tandis que 551 ont été rapportés pour la période de 1911 à 1995. Le nombre d'accidents a augmenté avec la modernisation industrielle atteignant son maximum dans les années 70 comme le montre la Figure 1.5. Malgré une réduction significative des accidents depuis 1980, les conséquences des accidents ont tendance à s'aggraver : l'accident de Mexico en est un exemple caractéristique. C'est pour ces raisons qu'une approche globale permettant d'estimer le risque d'effet domino est risqué.

4. FORMALISATION DU PROBLEME

L'effet domino, dû à une explosion initiale dans les sites industriels, est considéré comme une série d'explosions de réservoirs, l'une entraînant une autre. Autrement dit, c'est un ensemble d'enchaînement d'explosions. Les diverses séquences de l'effet domino sont illustrées par la Figure 1.6.

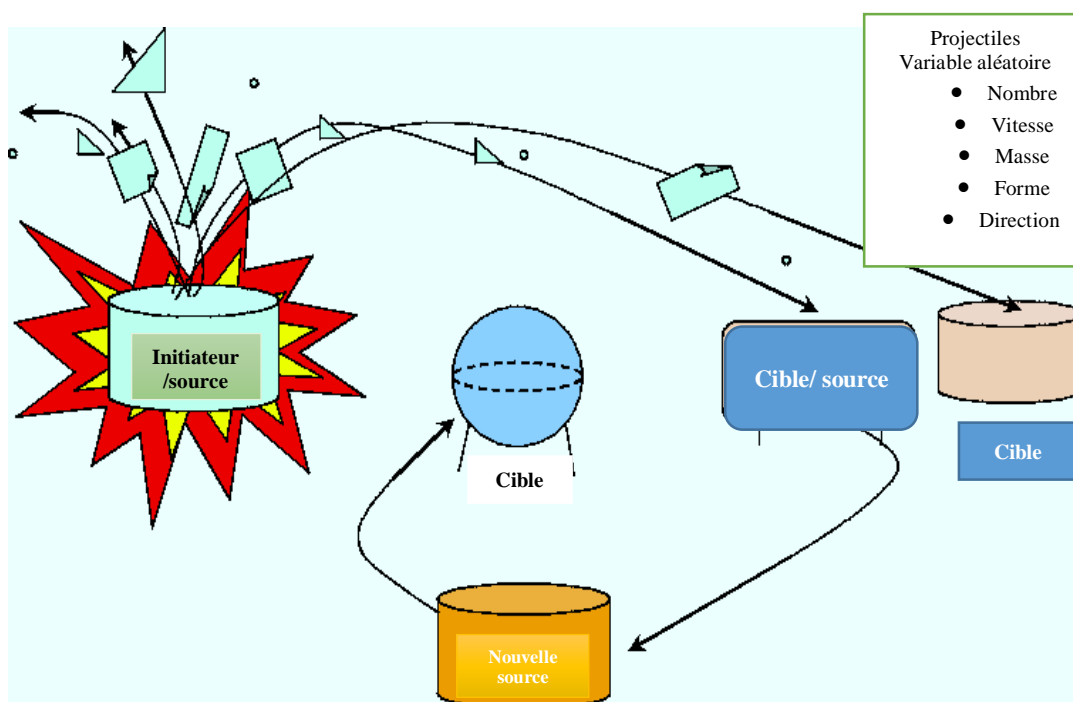


Figure 2.6 : Schéma global du suraccident [27]

D'une part, l'explosion d'un réservoir peut être due à des explosions antérieures d'un ou plusieurs autres réservoirs. Les projectiles engendrés par l'explosion de ces derniers peuvent impacter simultanément le réservoir et causer son explosion. D'autre part, les projectiles générés par l'explosion d'un seul réservoir peuvent constituer également des menaces pour un ou plusieurs réservoirs voisins et causer leur explosion.

En vue d'évaluer le risque d'effet domino, chaque explosion est considérée comme un sous problème supposé indépendant des autres. Tenant compte de cette hypothèse, l'effet domino peut alors se décomposer en cycles :

- Cycle 1, dit événement initial, où le 1er ensemble de projectiles est engendré par l'explosion initiale,
- Cycle 2, dit 2^{ème} événement, dans lequel le réservoir impacté par le 1er ensemble de projectiles explose et génère un 2^{ème} ensemble de projectiles,
- Cycle n, dit n^{ème} événement, où le réservoir impacté par l'ensemble des projectiles antérieurs explose et génère un n^{ème} ensemble de projectiles.
- Le risque d'effet domino est alors une combinaison des risques des sous problèmes considérés.

L'analyse de l'effet domino requiert toutefois la description détaillée de chaque événement ou cycle. Un cycle élémentaire de l'effet domino est détaillé dans la figure 1.7. L'analyse de ce cycle élémentaire nécessite une analyse fine de trois termes essentiels, à savoir le terme **source** (à l'origine de la première explosion ou génération de la première série de projectiles), le terme **trajectoire** et possibilité d'impact éventuel des projectiles (détermination des angles, des vitesses et des positions à tout instant sur la trajectoire pendant le déplacement depuis la source) et enfin le terme **cible** (conditions d'impact et d'interaction entre le projectile et la cible)

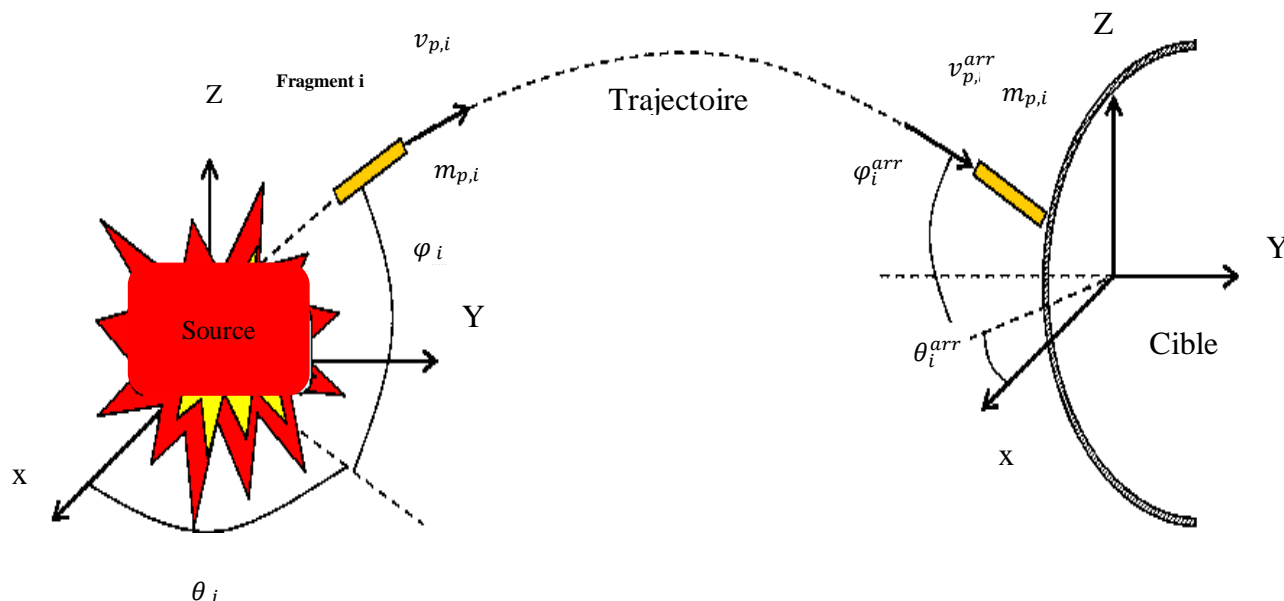


Figure 2.7. Cycle élémentaire de l'effet domino [27]

Chaque branche élémentaire de l'effet domino s'appuie sur les séquences suivantes :

- La génération de fragments à la suite de l'explosion initiale du réservoir : La surpression, la surchauffe d'un réservoir ou une agression mécanique extérieure (impact d'un fragment, par exemple) sur un réservoir peuvent le faire exploser. Cette explosion peut générer des fragments : Les caractéristiques des fragments, dénommées termes sources, désignent leur nombre, leur forme, leur masse, leur vitesse de départ ainsi que leurs angles de départ.
- L'impact de projectiles sur d'autres installations voisines : Certains fragments sont projetés dans l'espace. Ces fragments peuvent impacter des installations voisines au cours de leur mouvement. Selon les caractéristiques de départ du projectile, la trajectoire est décrite en fonction des effets combinés de l'inertie, de la gravitation et de l'aérodynamique. Les mouvements de translation et de rotation sont pris en compte.
- Le dommage des installations sous l'agression mécanique des projectiles lors de l'impact : Après avoir impacté les installations voisines, les projectiles peuvent les pénétrer partiellement ou les perforer entièrement. dépendant des propriétés des cibles impactées ainsi que des projectiles lors de l'impact.

Des modèles mécaniques sont développés afin d'analyser l'interaction entre les projectiles et les cibles impactées.

- Le suraccident : Suivant l'état de la cible (par exemple son niveau de remplissage dans le cas de réservoirs de gaz sous pression) et son état d'endommagement après impact, une explosion pourrait survenir dans l'élément impacté, ce qui induit l'effet domino. Un endommagement de la cible n'induit pas toujours une explosion. La probabilité de suraccident P_{cycle} se déduit donc des probabilités précédentes et de la probabilité de génération d'une nouvelle série de projectiles selon l'état de la cible après impact P_{propa}

$$P_{cycle} = (P_{cycle} * P_{imp} * P_{rup}) * P_{propa} \quad [16]$$

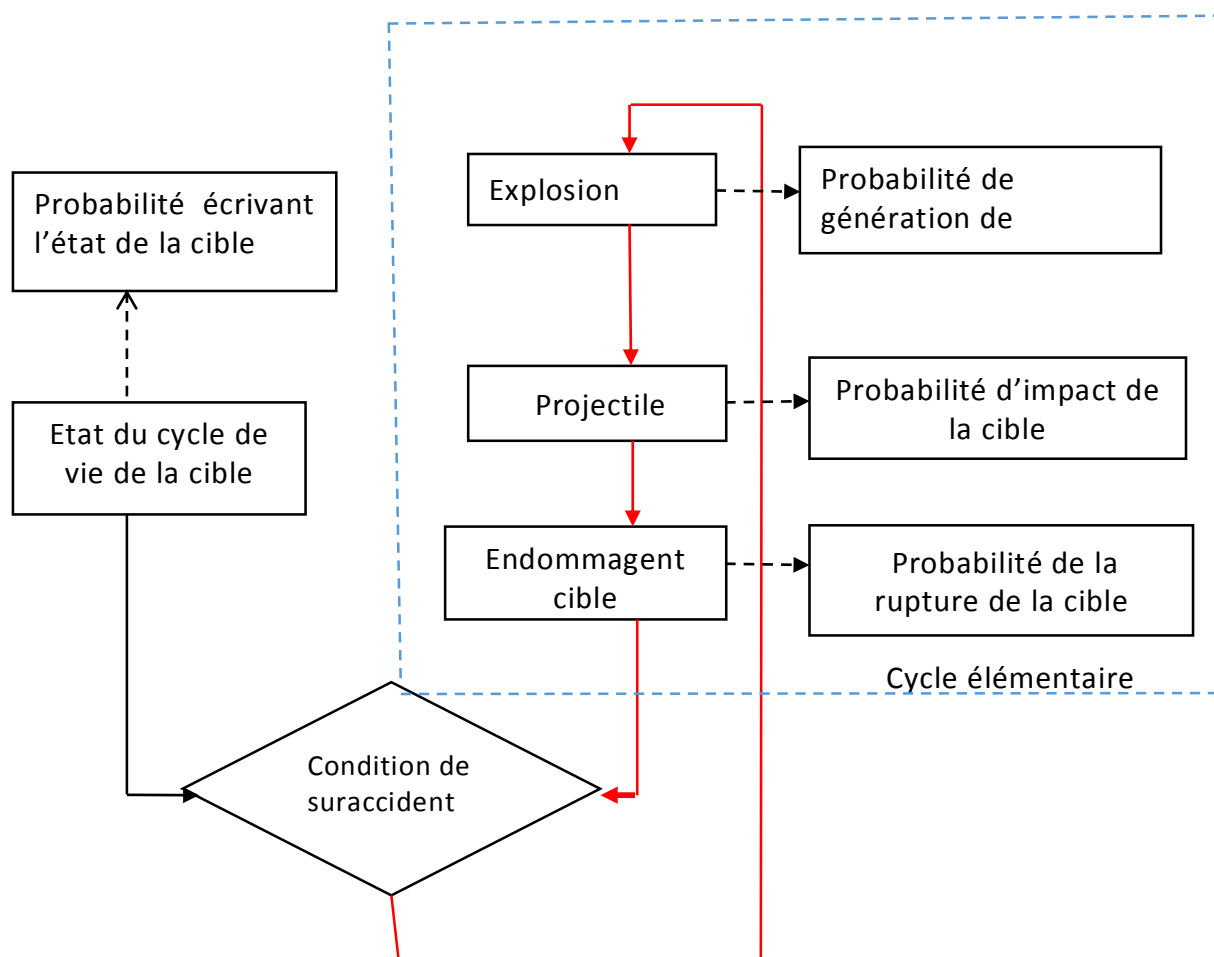


Figure 2.8. Séquences de l'effet domino [27, 15]

1.4. Classification d'impacts :

Lors de l'impact entre un projectile et une dalle en béton (par exemple), la structure cible est soumise à différents trajets de chargement, complexes, difficiles à contrôler et dépendant du type d'impact. Dans la littérature, la complexité des effets d'un tel impact, amène à considérer deux cas limites, impact mou et impact dur, pour l'étude des différents phénomènes physiques liés à chaque type d'impact. Une fois le type d'impact déterminé, les modes de rupture correspondant de la structure peuvent être prédits pour le dimensionnement de la structure.

La classification des types d'impacts n'est pas facile. Il n'y a pas beaucoup de travaux de recherche concernant ce problème. Les résultats diffusés dans la littérature sont parfois contradictoires [00].

Une définition qualitative des impacts mous et durs a été donnée par [10]. L'impact étudié résulte de la collision de deux corps, l'un avec une vitesse initiale vient frapper un autre étant au repos. L'objet soumis à l'impact est généralement une structure qui doit être conçue contre les chocs. Ce problème peut être réduit à une collision de deux masses m_1 et m_2 . Un ressort de contact avec une rigidité k_1 est placé entre les deux masses pour simuler la force contact. Un autre ressort avec une raideur k_2 représente la relation entre la déformation et la force résistante de la structure (cf. [Figure 1-9]).

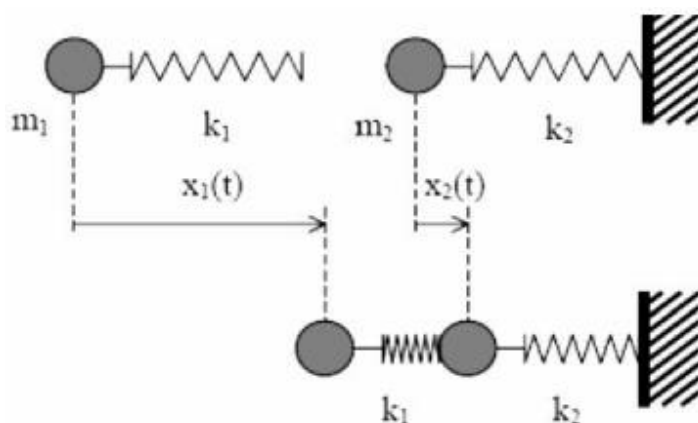


Figure 2.9. Modèle mécanique simple d'un impact à travers un système de masse-ressort [10]

Selon ce modèle de calcul, les équations différentielles représentant les mouvements des 2 masses-ressorts sont écrites de manière suivante :

$$mx_1''(t) + k_1[x_1(t) - x_2(t)] = 0 \quad [1-1]$$

$$mx_2''(t) + k_1[x_1(t) + x_2(t)] + k_2x_2(t) = 0$$

Si $x_1 \gg x_2$, autrement dit si la déformation du projectile est beaucoup plus important que celle de la structure soumise à l'impact, et en imposant :

$$F(t) = k_1x_1 \quad [1-2]$$

Les équations [1-1] sont écrites en [1-3]

$$mx_1''(t) + k_1x_1(t) = 0 \quad (a) \quad [1-3]$$

$$mx_2''(t) + k_2x_2(t) = F(t) \quad (b)$$

Le problème est maintenant découplé, il est possible de résoudre la première équation [1-3a] indépendamment, déduire ensuite la force $F(t)$ et finalement déterminer la déformation de la structure à partir de l'équation [1-3b].

Dans ce cas la structure résistante reste indéformée après impact. Par conséquent, l'énergie cinétique de l'impacteur. Ce cas est appelé impacte mou (cf.[Figure 1-2])

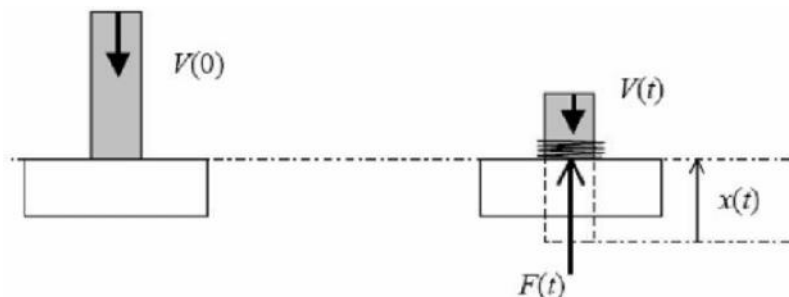


Figure 2.10 : Impact mou

L'autre cas limite correspond à $x_1 \ll x_2$, c'est-à-dire à un projectile rigide, ce cas est appelé l'impact dur par [10]. L'énergie cinétique du projectile est complètement ou partiellement absorbée par la déformation de la structure soumise à l'impact **Figure 2.11**.

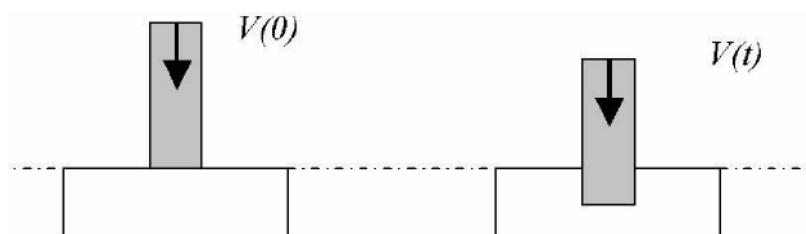


Figure 2.11 : Impact dur [10]

Une autre méthode simple est définie par Selon cet auteur, en considérant un système de deux masses ponctuelles qui se choquent, s'il n'y a pas de rebond les deux masses se collent ensemble et deviennent une seule masse ponctuelle après le choc, ce cas est appelé impact mou. Au contraire, s'il y a un rebond parfait sans dissipation d'énergie, ce cas est appelé impact élastique, parfois improprement impact dur. Cette définition est simple et peut également être appliquée au cas de l'impact d'avion sur une structure en béton.

CONCLUSIONS :

Au travers de l'analyse des accidents passés, on constate que l'effet domino alourdit les conséquences tant d'un point de vue humain que matériel.

Dans le chapitre suivant, on présentera l'analyse numérique d'un impacte de projectile sur une plaque.

CHAPITRE 3

ANALYSE NUMERIQUE DE L'IMPACT D'UN PROJECTILE

1. INTRODUCTION

Ce chapitre concerne la partie présentation et interprétation de tous les résultats de la simulation numérique menée sur le comportement mécanique des plaque en acier de dimension (100x100x10) cm³ soumise à un chargement extérieur dynamique (choc).

La première étape de la simulation est consacrée à l'étude de la variation des contraintes et des déformations de la plaque en considérant différentes changement de vitesse du projectile, à cet effet les :

Variation de vitesse sont : 50 m/s ; 100 m/s ; 200 m/s

Variation de forme du projectile : cylindrique, pointu, forme quelconque

Des logiciels sont aujourd'hui développés dans le but de simuler des phénomènes physique intervenant en mise en forme des pièces. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement un matériau et de jouer sur certains paramètres (géométrie, rhéologie) afin d'en optimiser le procédé. La simulation de l'endommagement a pour but de prédire où et quand un endommagement significatif apparaît. Pour se faire, les principaux phénomènes et leurs interactions doivent être correctement pris en compte.

2. PRESENTATION DU LOGICIEL ABAQUS :

Par définition Abaqus est une suite puissante de programme de simulation technique créée en 1978, basée sur la méthode des éléments finis (méthodes numériques approchées). Il a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen

(HKS), devenue après ABAQUS, Inc. Depuis 30 ans et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer les nouveautés et répondre ainsi aux besoins en 2005. La gamme de logiciels d'Abaqus est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Abaqus offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Il a une liste également étendue de modèles matériels qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux typiques de technologie comprenant de métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, le béton armé, et les matériaux géotechniques comme les sols et la roche. [8]

Abaqus se divise en deux grands codes:

- ABAQUS/Standard: Nous permet de réaliser des études statiques en contraintes/déplacements, dynamiques linéaires ou non linéaires. Généralement, C'est la méthode de Newton qui est utilisée pour résoudre les problèmes non linéaires.
- ABAQUS/Explicit: Permet la résolution d'étude comme les problèmes de dynamique rapide. Bien que l'analyse soit dynamique, elle peut être utilisée moyennant quelques précautions pour accomplir des analyses quasi-statiques. Le schéma explicite implanté au sein d'Abaqus conduit à des temps de calcul plus faibles comparativement au schéma implicite nommé Abaqus /standard

Abaqus /CAE : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs.

- Abaqus /CFD (Computational Fluid Dynamic) : Module dédié pour le couplage fluide-structure.

Chacun de ces produits est complété par des produits additionnels ou/et optionnels, spécifiques à certaines applications. [8]

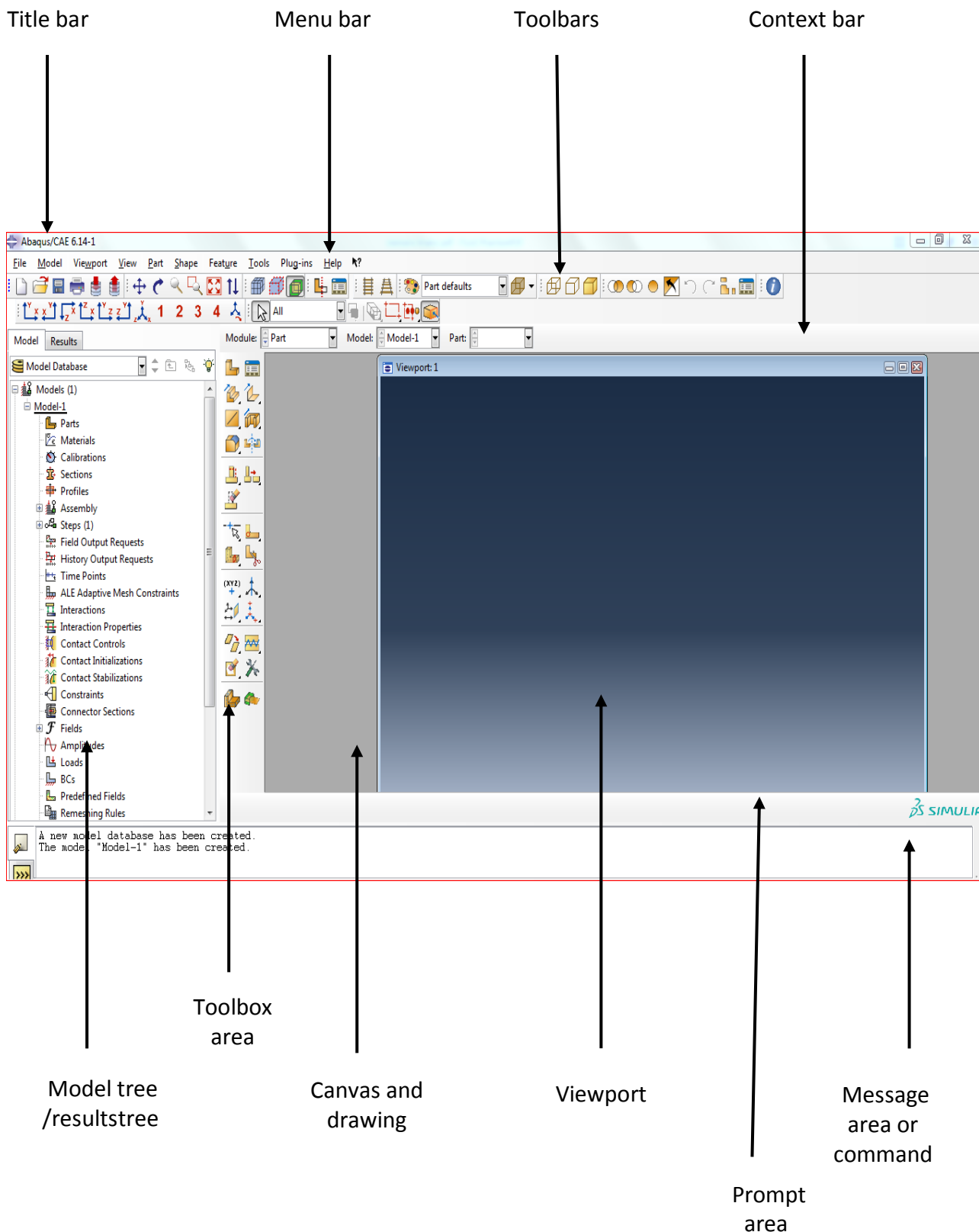


Figure 3.1 : Présentation de l'interface du code de calcul Abaqus

Rappel des actions pour créer un modèle Abaqus

- Dessiner le modèle : le module PART permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus Cae, soit en les important d'un autre logiciel de dessin.

Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle

- Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue.
- Le développer en 3D.
- Rajouter les détails manquants (chanfreins...).

Affecter les propriétés matériau à l'objet : le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

- Créer le matériau



- Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux



- Affecter les matériaux aux sections correspondantes



Assembler le modèle: le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.

Créer les instances



Les positionner dans le repère général

Définir les étapes d'analyse:

Le module STEP permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées ; et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées. Créer les interactions entre les instances: le module INTERACTION permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes, la procédure de spécification des interactions est la suivante :

- Créer les surfaces
- Définir les types de contacts
- Associer des surfaces avec des types de contact

Appliquer les conditions aux limites et les chargements: le module LOAD permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions limites soient dépendants des Steps, par exemple une force est appliquée au Step 1 mais inactive au Step 2.

- Définir les étapes d'application
- Définir les types de CL et/ou chargement

Mailler le modèle: le module MESH contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage:

- Partitionner le modèle.
- Choisir les techniques de maillage.
- Choisir les types d'éléments.
- Discrétiser le modèle.
- Mailler le modèle

Créer et soumettre un calcul : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module JOB pour analyser ce modèle. Visualiser les résultats: le module VISUALIZATION permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations... module « SKETCH »: ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

3.ÉTAPE DE LA MODELISATION :

Simulation d'une plaque en acier soumise à un impact. Pour procéder à cette simulation on doit passer par les étapes suivantes :

3.1 CREATION DU MODELE :

Création de la plaque de dimension suivante : 1m * 1m épaisseur de 1 cm

On se met dans le module part comme le montre la figure suivante, et on crée un

objet **Solide, Déformable** et une taille de 1m*1m que l'on nomme **Plaque**.

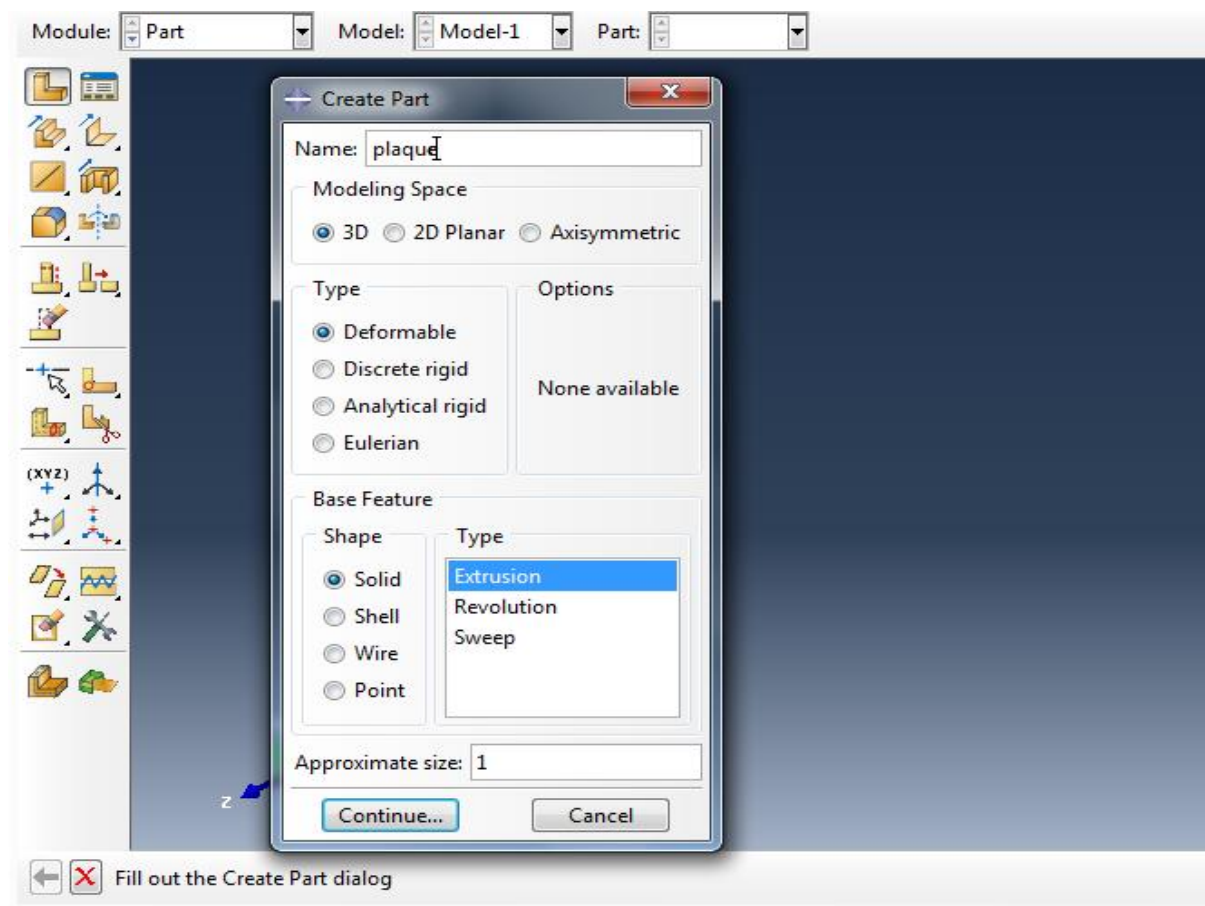




Figure 3.2 : Illustration de la 1ère étape de la création de la plaque

Crée le profil de notre plaque, en cliquant sur  l'angle puis insérer les coordonnées de la plaque.

En bas de l'écran on clique  sur et la boîte de dialogue Edit base extrusion apparaît (figure2), là on va introduire l'épaisseur, dans les champs Depth, insérer l'épaisseur puis valider.

La plaque est ainsi créée comme montré sur la **Figure 3.3**

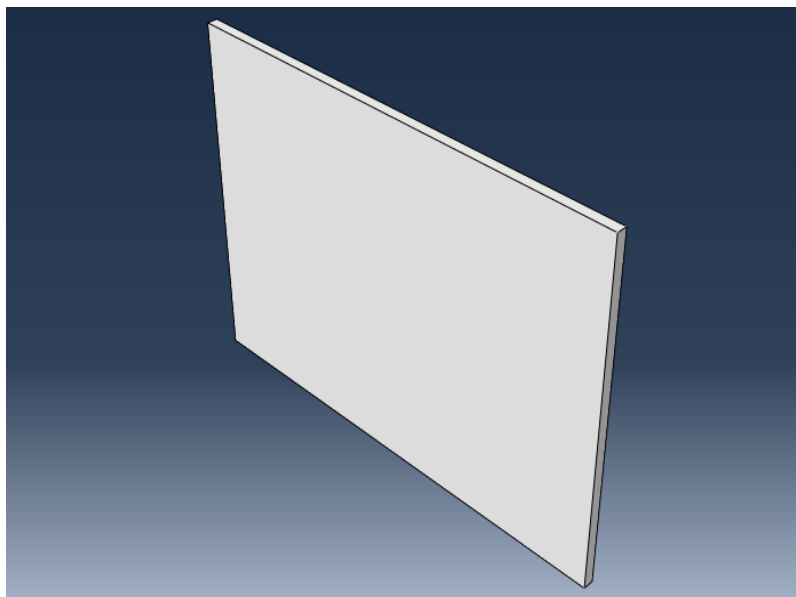


Figure 3.3 : Modèle numérique de la plaque

3.2 CREATION DU PROJECTILE :

On clique sur l'icône **Create parte**, et on crée un objet en **3D**, de type **Discrete Rigid** et en bas **Solid Extrusion Figure3.4**

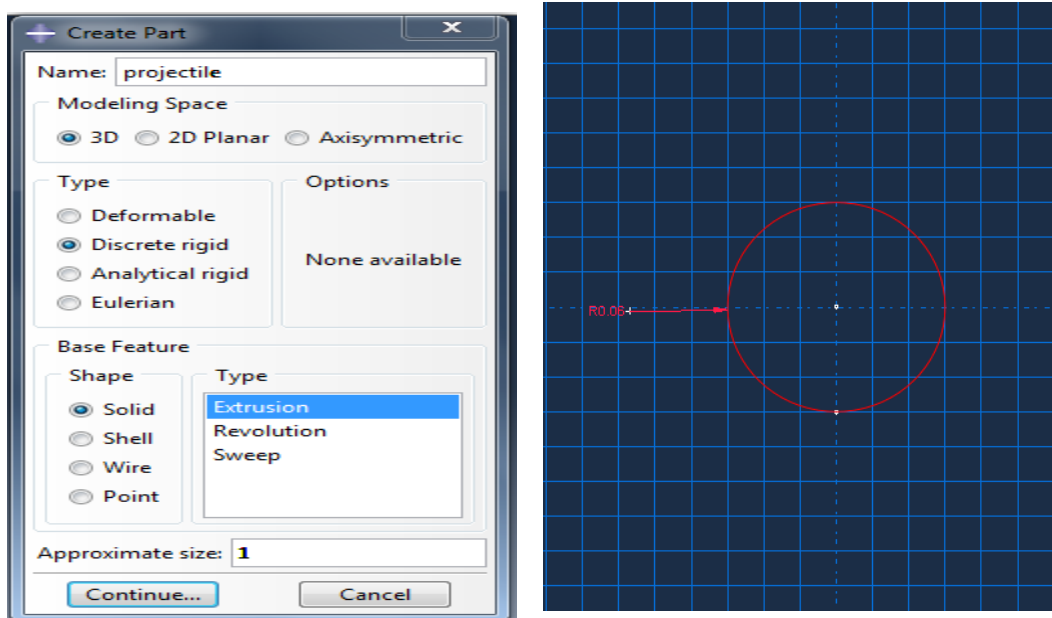


Figure 3.4: Illustration de la création du projectile

Lorsque nous créons un objet rigide, il est nécessaire de créer **un point de référence** sur le quels seront appliquer les conditions aux limite ou les chargements. On clique sur **Tools** puis **Reference point** et on sélectionne un point de référence qui représenteras tout l'objet en suit **Figure 3.5**

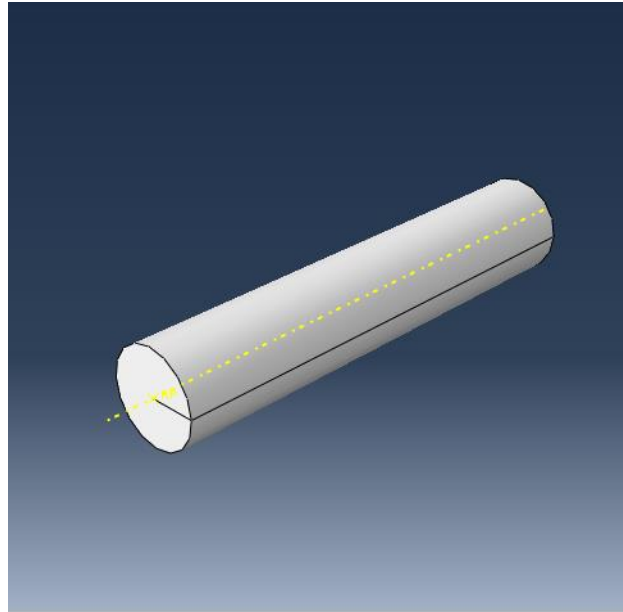


Figure 3.5: Création du projectile et son point de référence

3.3 CREATION DES MATERIAUX

Introduit les données sur tous les matériaux utilisés pour chaque objet créés, car abaqus ne les contient pas matériaux acier On se met dans le module Property, et on introduit le module de Young, le coefficient de poisson.

Et on introduit aussi les paramètres élasto-plastique-endommagable de johson cook **Figure 3.6**

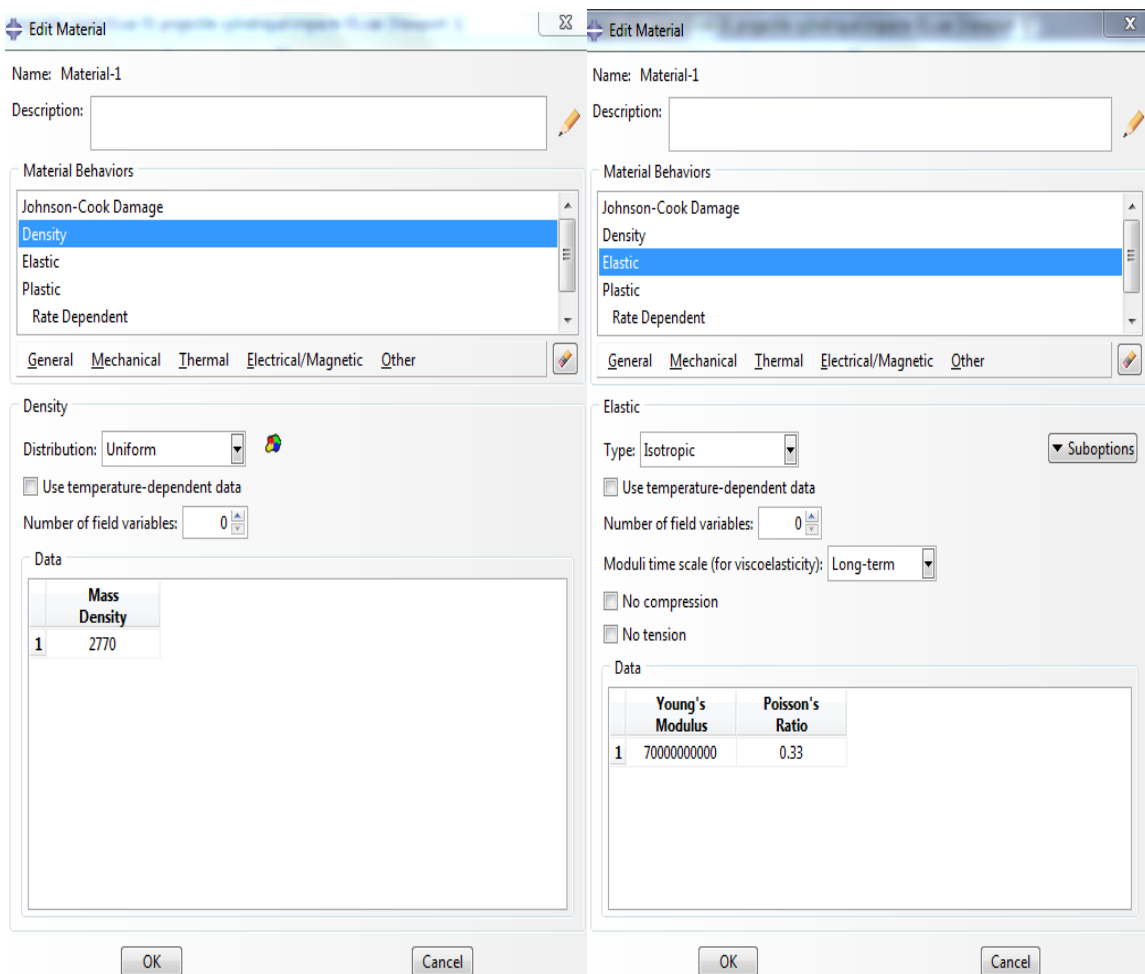



Figure3.6 : Création du matériau

3.4 AFFECTER LES SECTIONS :

Acier on clique sur l'onglet  et affecter la section a la plaque **Figure3.7**

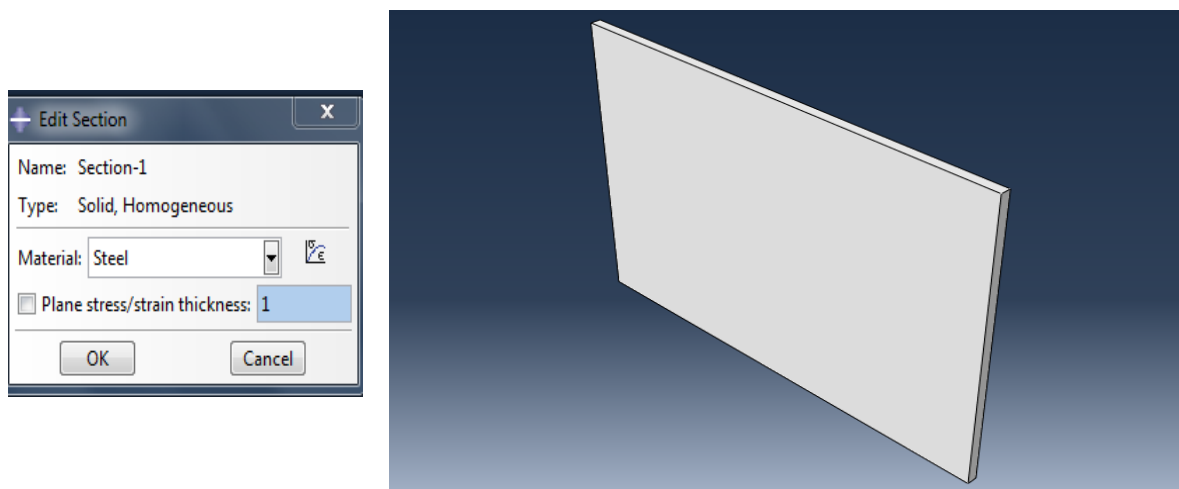


Figure 3.7 : Affichage de la plaque

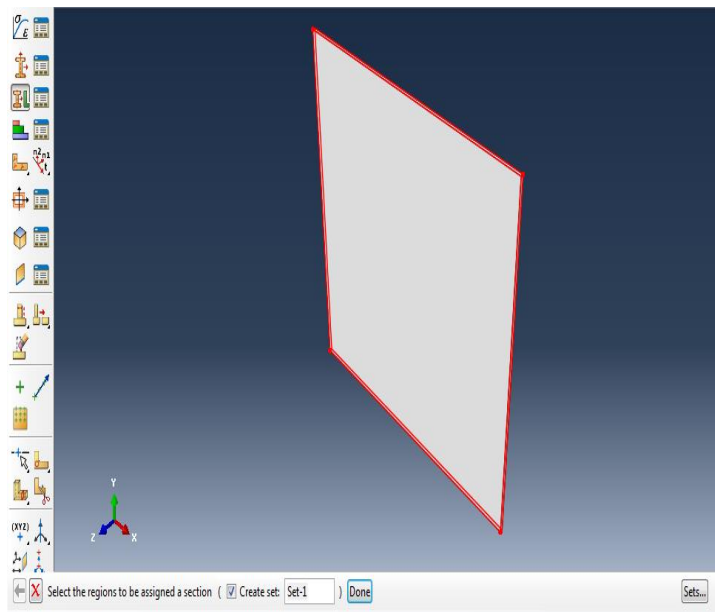


Figure 3.8 : Affectation de la section

Après avoir sélectionné la plaque et lui affecter ses propriétés, elle s'affichera en vert **Figure3.9**

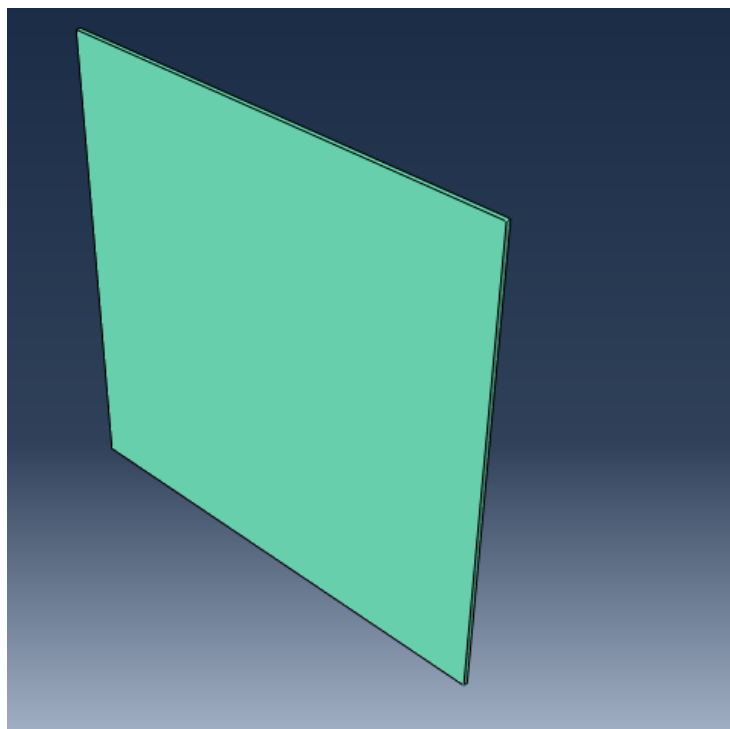
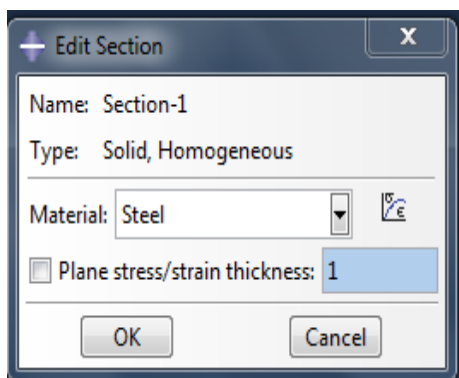


Figure 3.8 : Modèle numérique de la plaque

3.5 ASSEMBLER LE MODELE :

Pour l'assemblage, on se met dans le module assembly **figure 3.9**

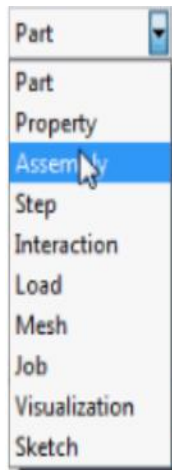


Figure3.9 : Assemblage du modèle

3.5.1 ASSEMBLAGE DE LA PLAQUE AVEC LE PROJECTILE :

On crée un point d'assemblage (Datum) au centre de la plaque **Figure3.10**

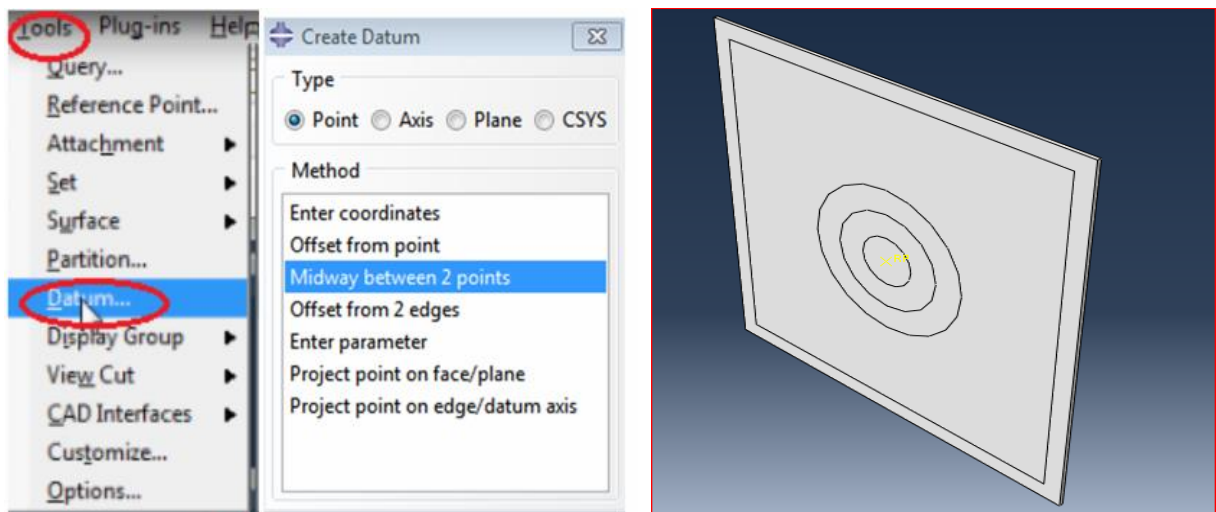


Figure 3.10 : Création du point datum

On cliquant sur l'angle  pour translater le projectile, on sélectionne le point de

référence du projectile puis le point datum crée au centre de la plaque **Figure3.11**

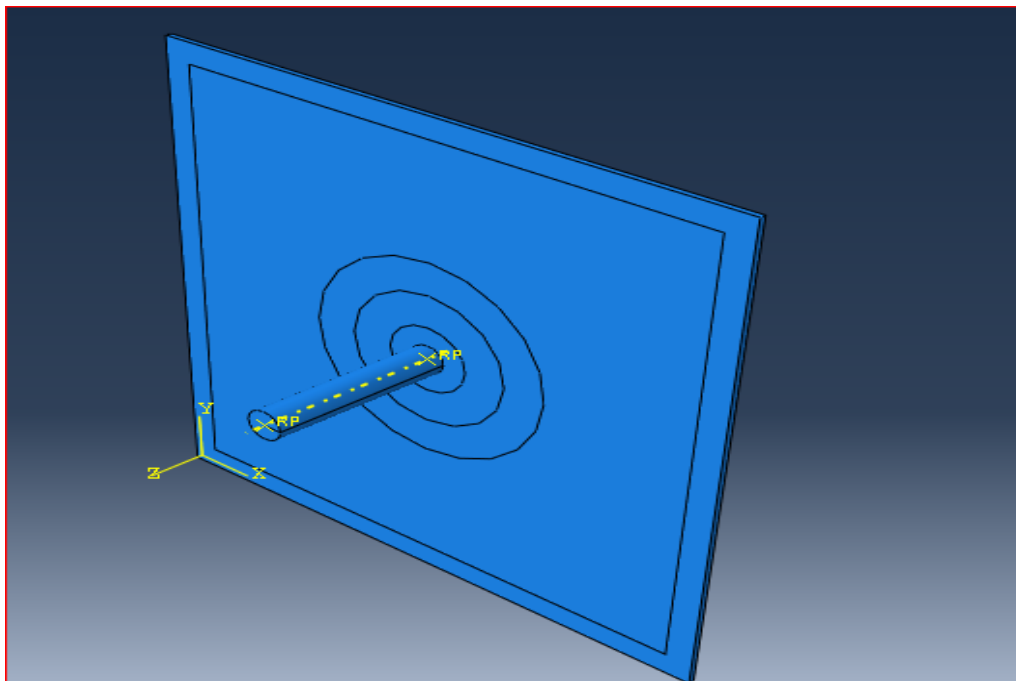



Figure 3.11 : Les étapes de l'assemblage

3.6 DEFINIR LES PAS D'ANALYSE:

On se met dans le module step, cliquer sur  l'angle ; la fenêtre Create step apparait **Figure 3.12**

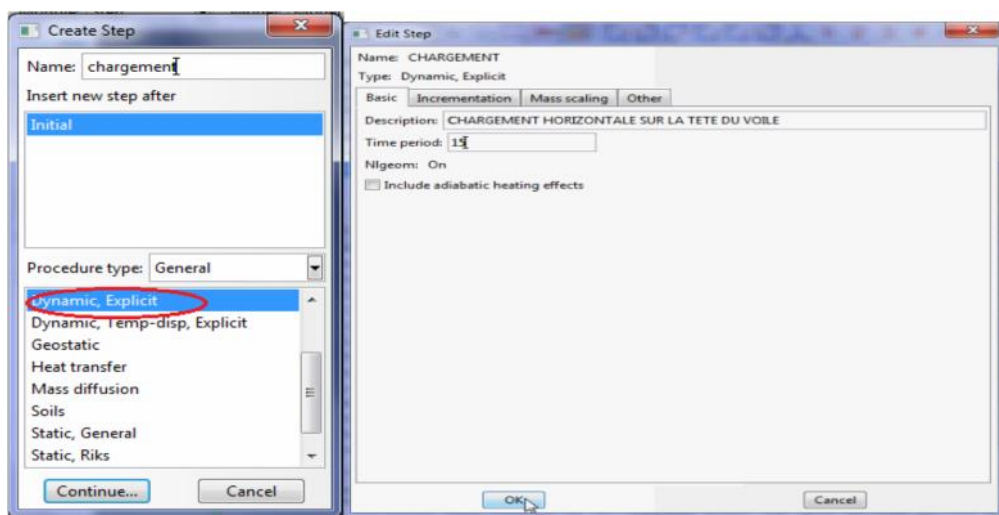




Figure 3.12 : Création des pas d'analyse

Pour choisir les variables de sortie de l'analyse, on clique sur output  Field output Manager  Edit, on sélectionne celles dont on à besoin **figure 3.13**

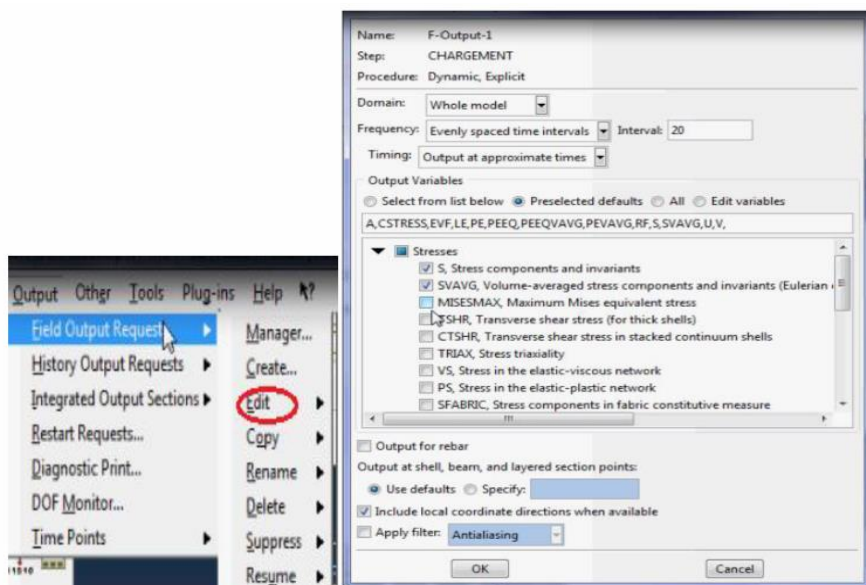



Figure 3.13 : Choix des variables de sortie

3.6 INTERACTION

Interaction projectile-plaque :

On passe au module interaction, pour créer le contact entre la dalle et le

projectile on clique  sur et à la fenêtre Create interaction apparaîtra **Figure**

3.14

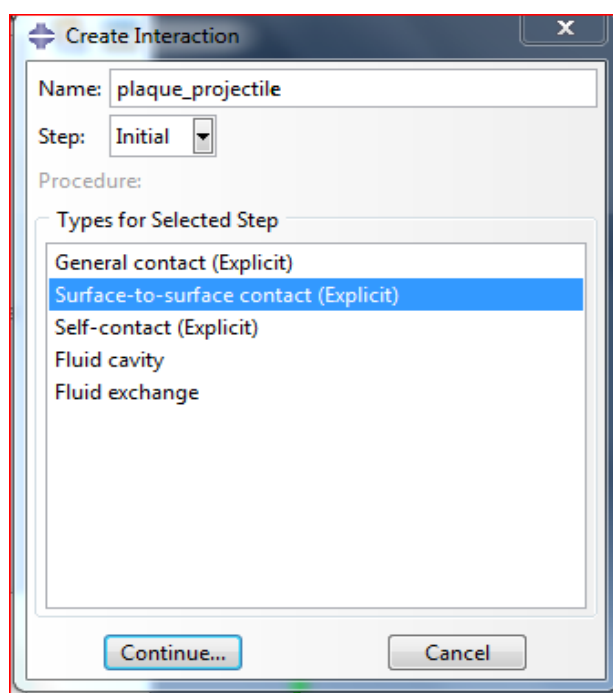


Figure 3.14 : Création de l'interaction

Lorsque on clique sur continue, on choisit la première surface (plaque), puis on choisit la deuxième surface (**projectile**), là il nous demande de préciser quelles surface du projectile qui seras en interaction avec la dalle, on choisit celle extérieure en marron (**Brown**) **Figure 3.15**

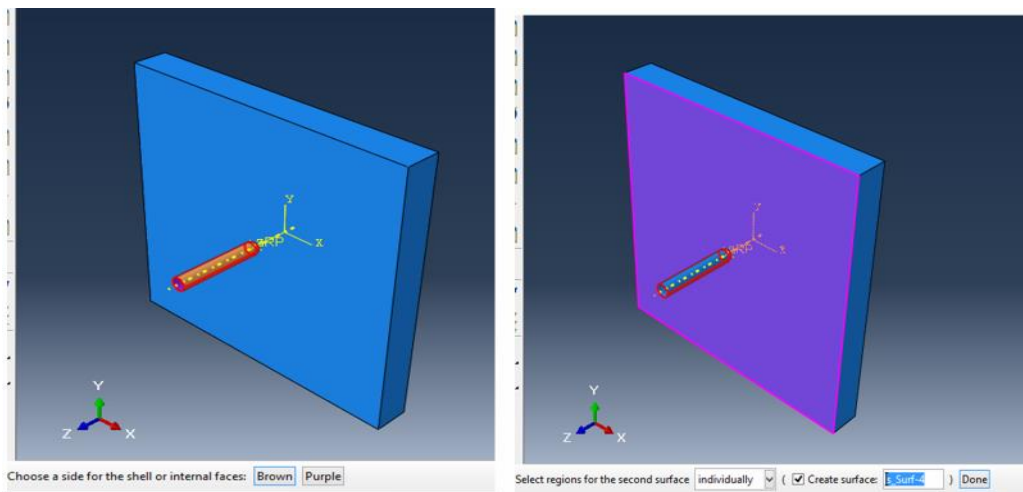


Figure 3.15 : Surface d'interaction

Lorsqu'on valide le choix, en cliquant sur Done, l'interaction s'apparait comme sur la **Figure 3.16**

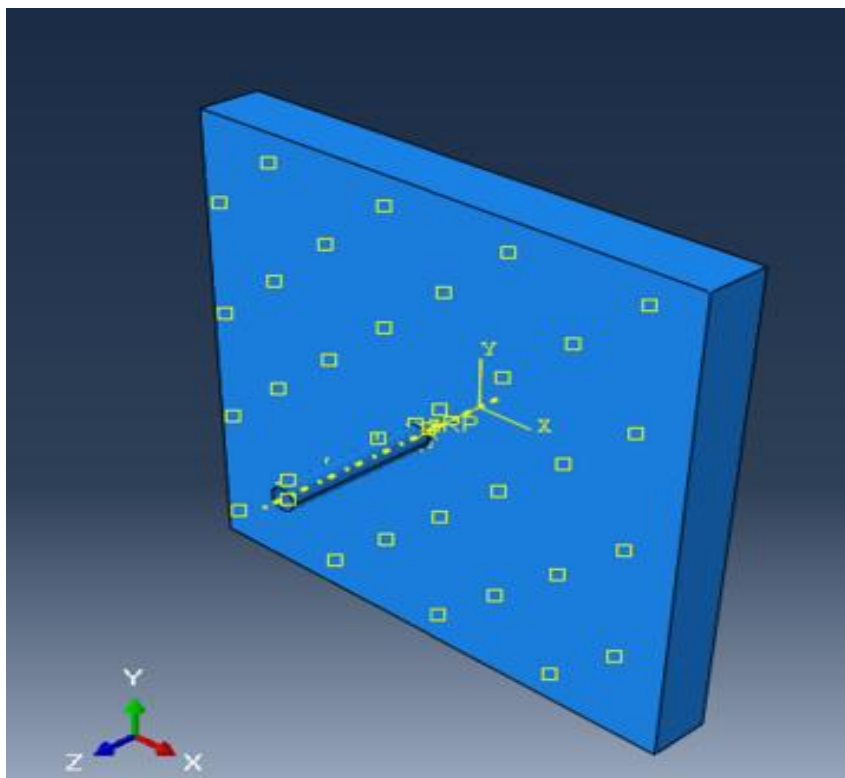



Figure 3.16 : Interaction projectile plaque

3.7 APPLICATION DES CONDITIONS AU LIMITE ET DEPLACEMENT

3.7.1 L'ENCASTREMENT E LA PLAQUE :

On se met dans le module load, on clique sur la  fenêtre Create Boundary Condition, et on sélection la répartition pour la partition créée Figure 3.17

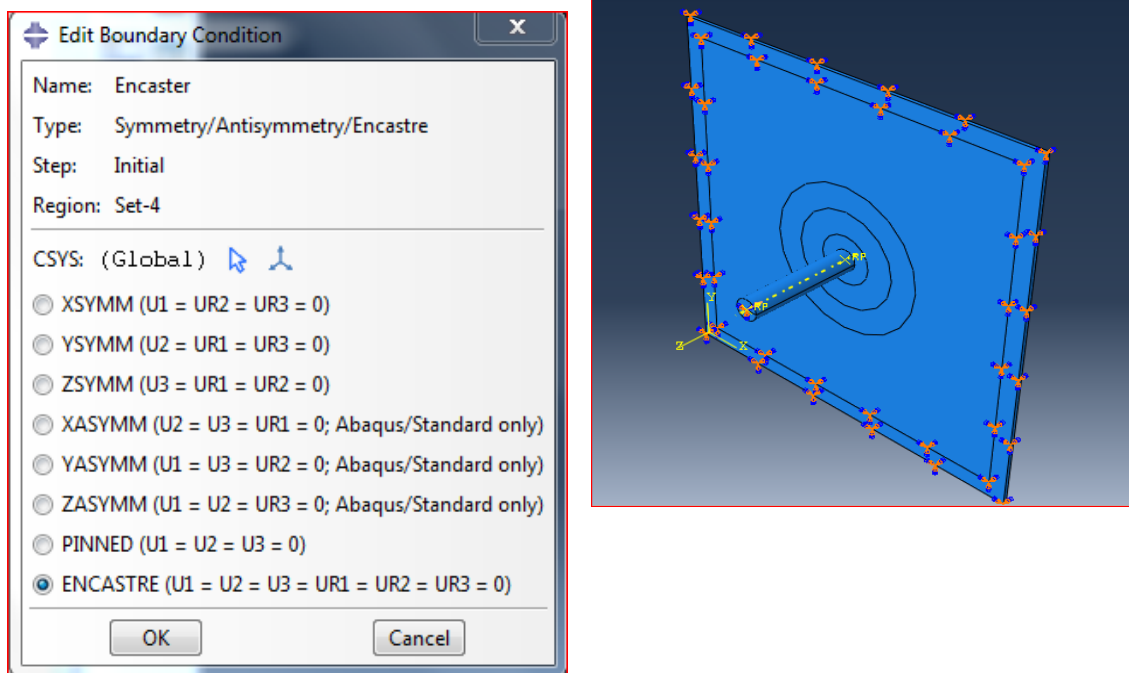
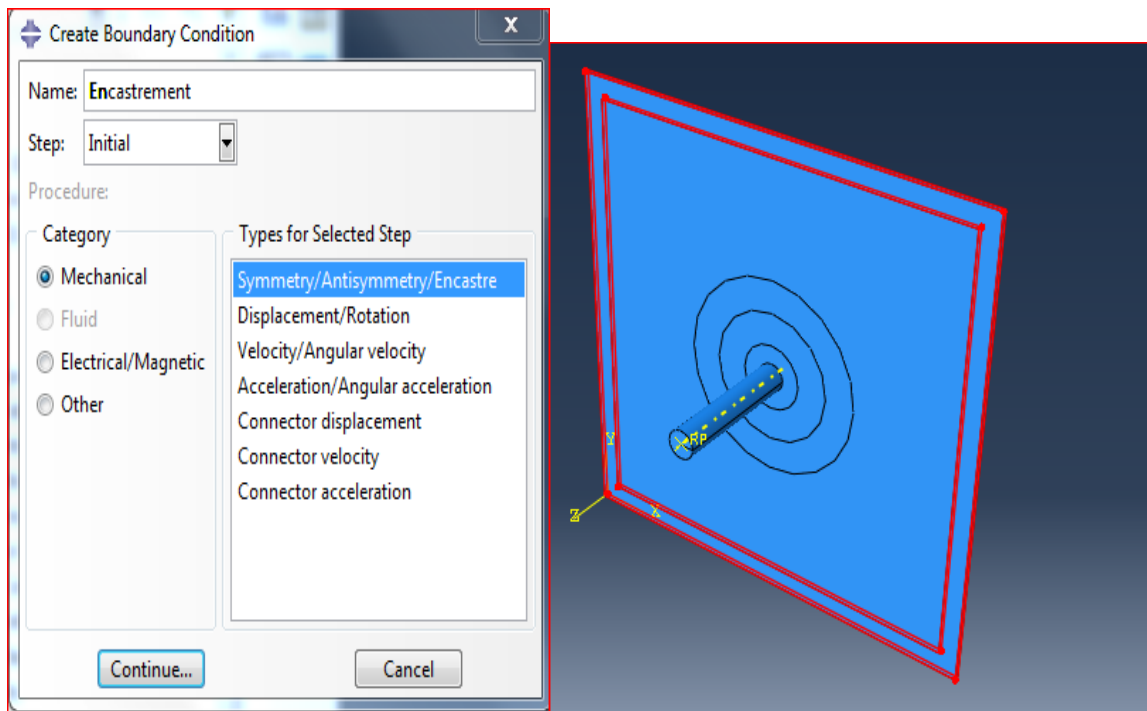



Figure 3.17 : Création des encastresments

3.7.2 POUR CREE LE DEPLACEMENT

On clique sur,  la fenêtre Create Boundary condition apparait, on sélection le point de référence du projectile pour lui appliquer une vitesse initiale **Figure 3.18**

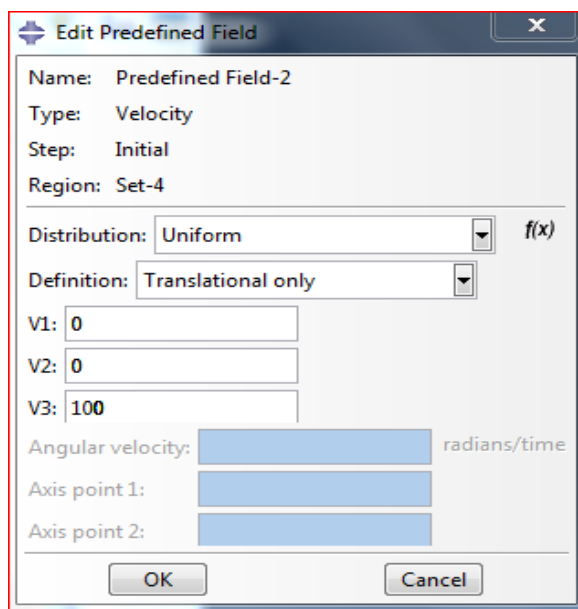
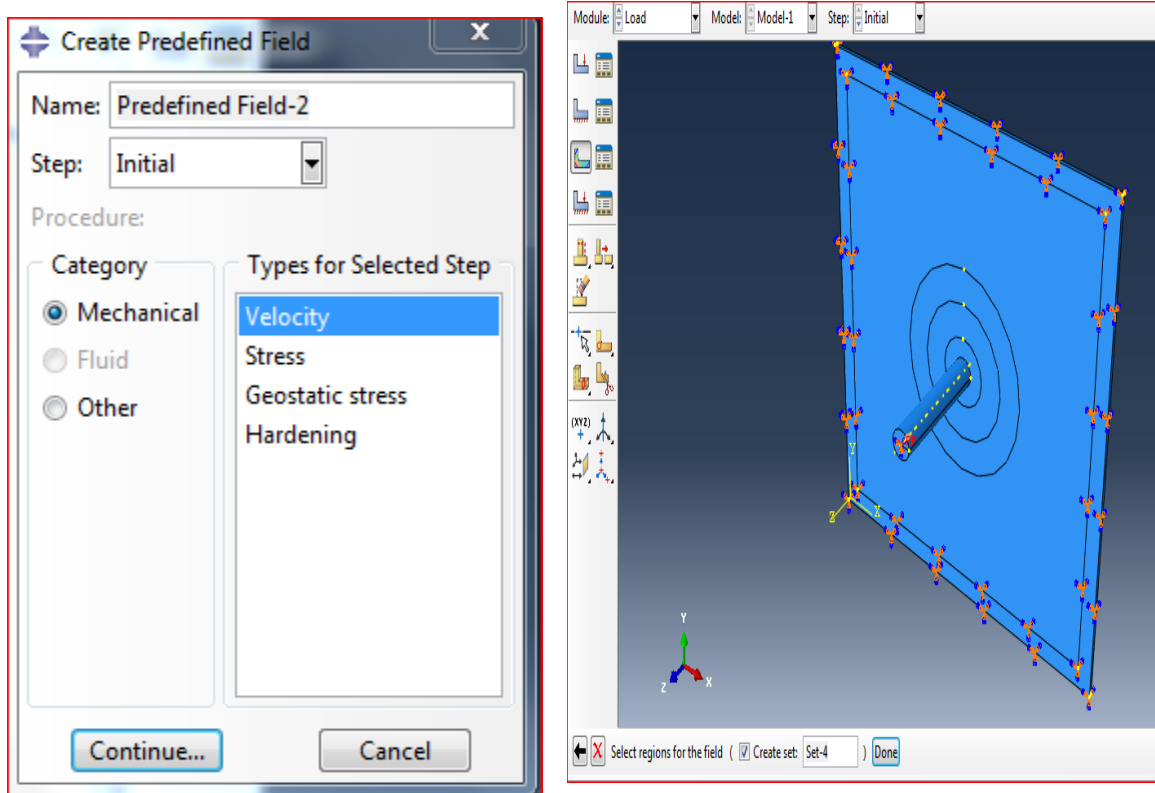



Figure 3.18 : Application de la vitesse initiale

3.8 MAILLAGE DU MODELE :

3.8.1 MAILLAGE DE LA PLAQUE :

On va créer un maillage élément fini. il est possible de choisir la technique de maillage, le type d'éléments et leur forme. Si le modèle a mailler est en vert, le maillage s'effectue sans problèmes en mode structured. S'il se présente en jaune, il se maileras en mode swept (balayé). S'il est en rouge, il est impossible de le mailler, il faut donc le partitionner en éléments simples jusque à ce qu'il devient jaune ou vert.

On se met, dans le module **Mesh**, on clique sur **Assigne Mesh Controls**  On choisit des mailles hexaédriques, Pour choisir le type d'élément, on clique sur

Assign Elément Typier.

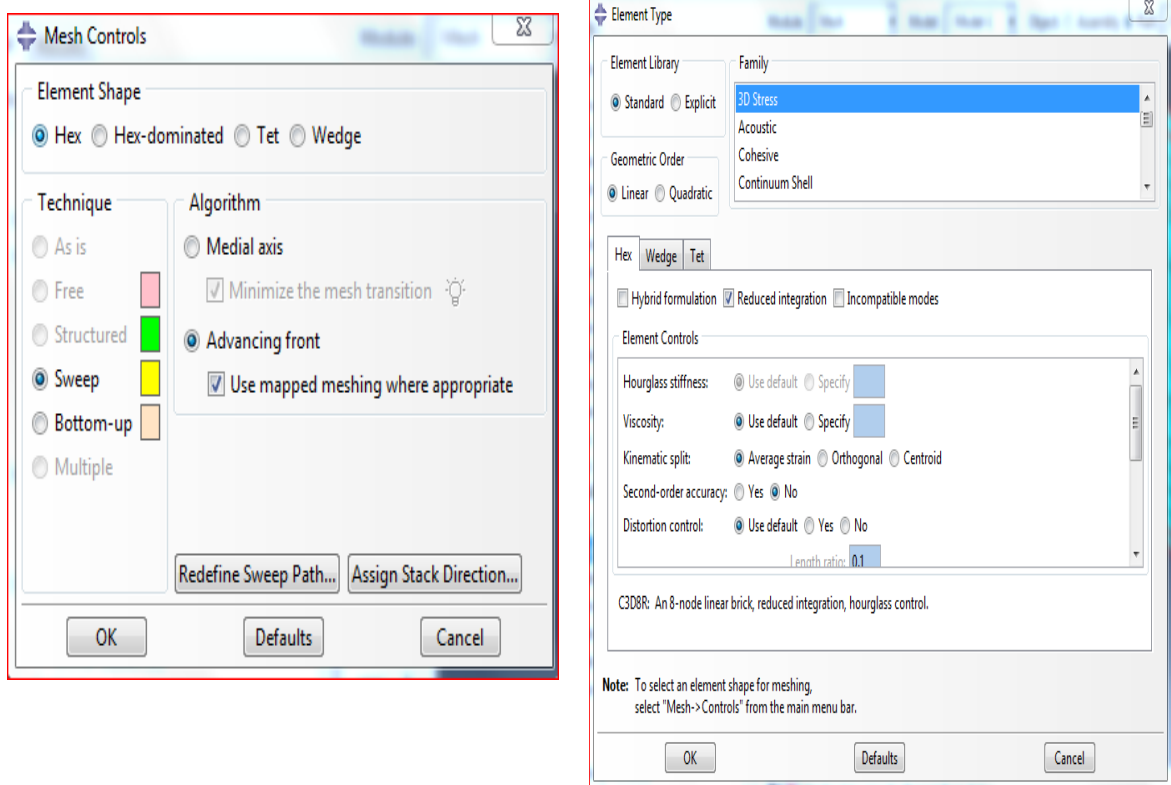



Figure 3.19 : Choix du maillage

Maintenant, cliquez sur Mesh Part  pour mailler la plaque. Cliquez Yes comme l'indique la **Figure 3.20**

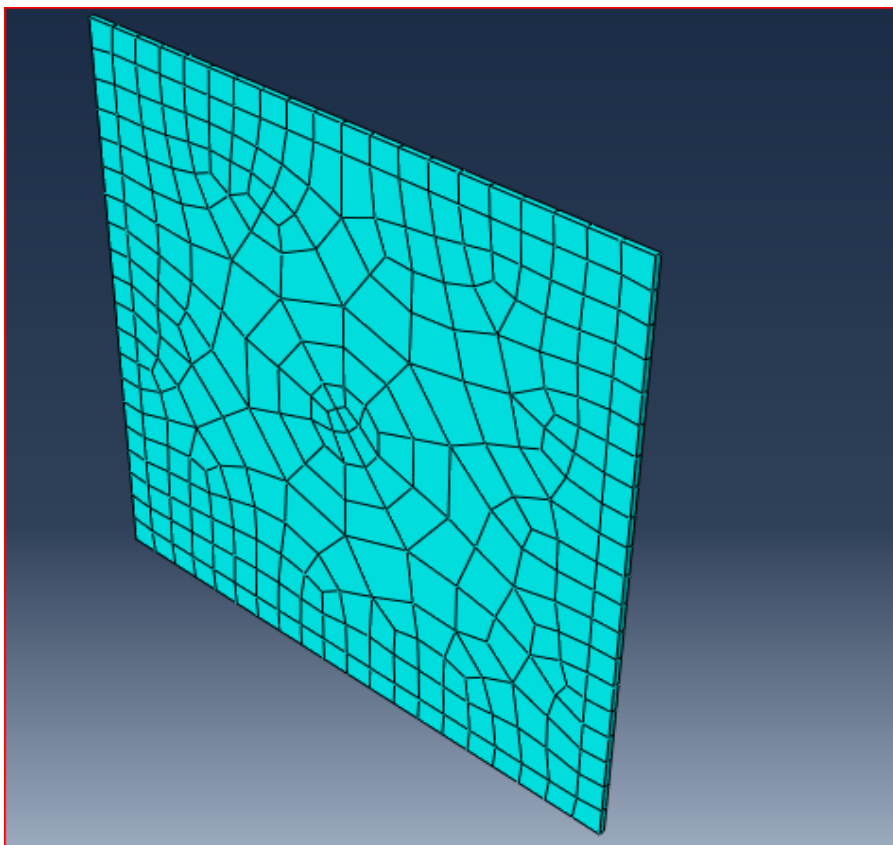


Figure 3.20 : Maillage de la plaque

3.9 CREE ET SOUMETTRE UN TRAVAIL D'ANALYSE :

On se met dans le module job, on clique sur Create Job, on le nomme résultat, dans les champs descriptions on garde les valeurs par défauts puis ok. On clique sur la fenêtre **Job Manager**

On clique sur submit pour lancer le calcul **Figure 3.21**

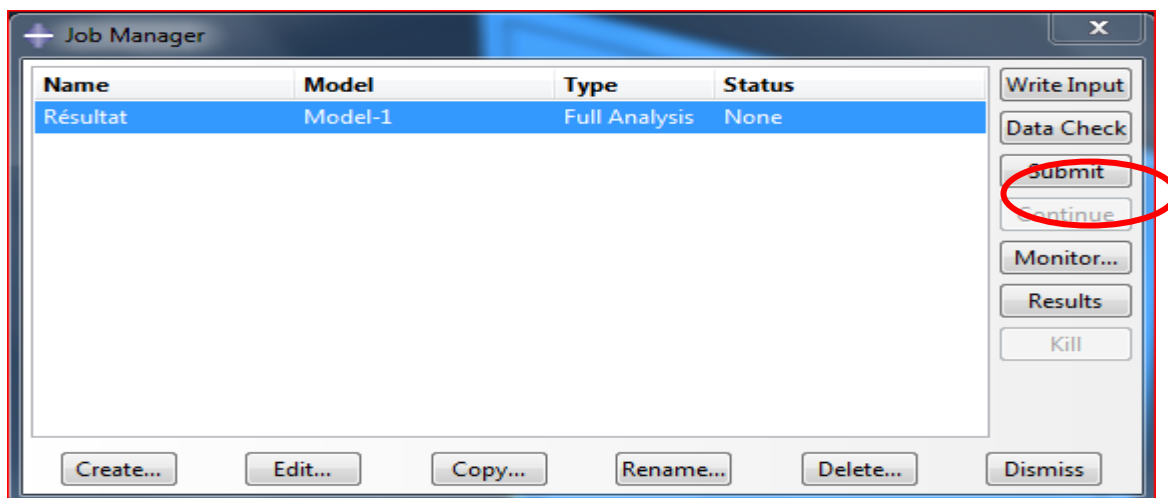


Figure 3.21 : Analyse du modèle

A la fin de l'analyse (Calcul), ABAQUS affiche Complete sur Status, on clique sur Results, pour visualiser les résultats **Figure 3.22**

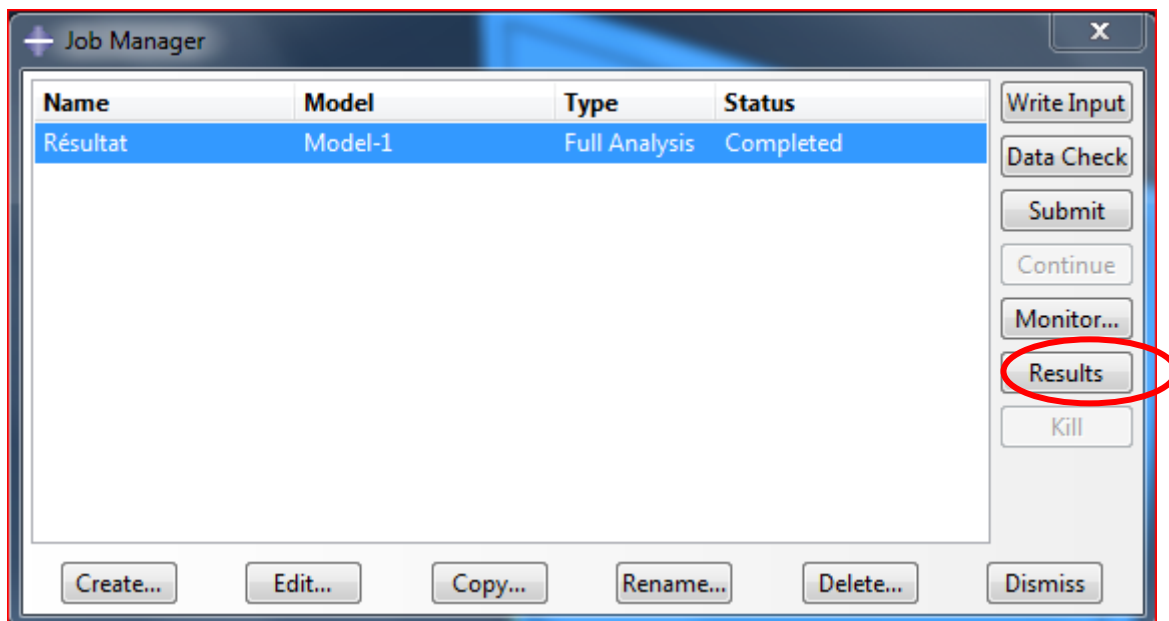




Figure 3.22 : Affichage des résultats

3.10 VISUALISATION DES RESULTATS :

Dans ce module, on peut visualiser les divers résultats, force déplacement contrainte et déformations... etc. en cliquant sur , comme on peut visualiser la forme déformée du modèle, en cliquant sur 

CHAPITRE 4

RESULTATS & INTERPRETATION DE LA MODELISATION NUMERIQUE

1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation et interprétation de tous les résultats de la simulation numérique.

2. PROJECTILE AVEC UN ANGLE D'INCLINAISON NUL

2.1. Vitesse du projectile 50 m/s

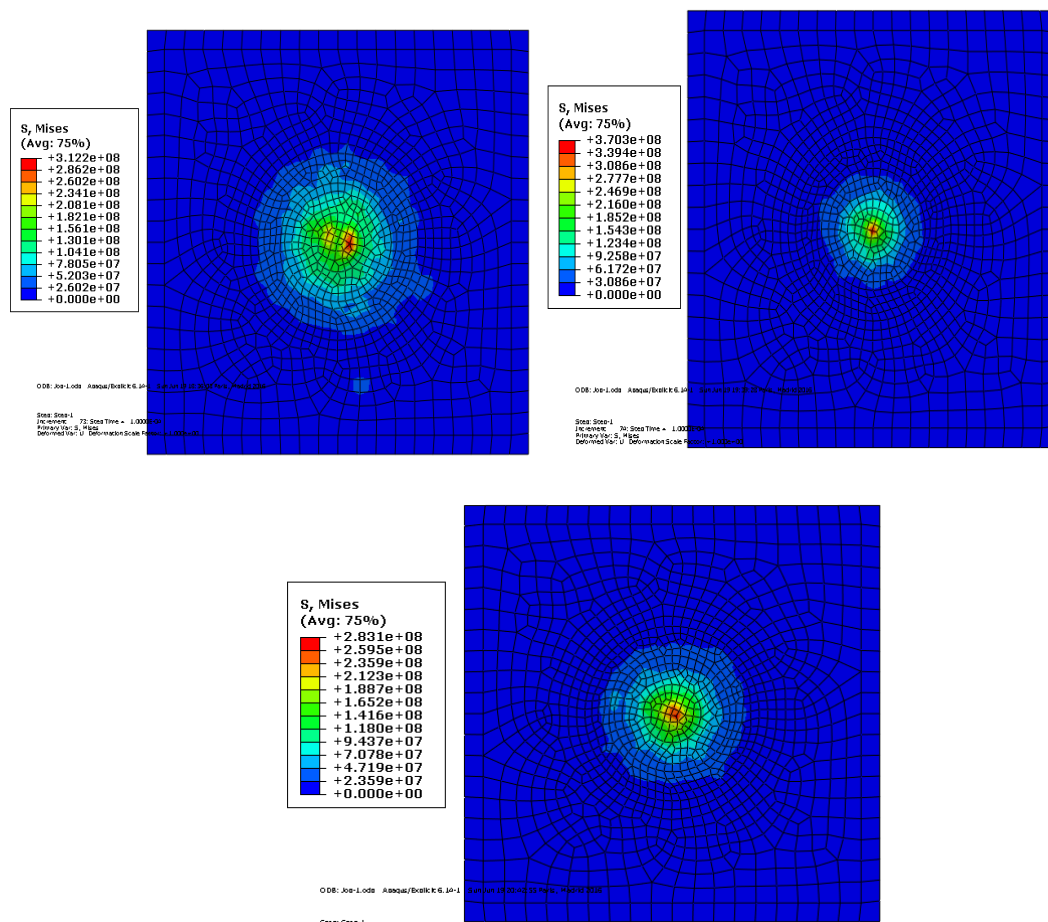
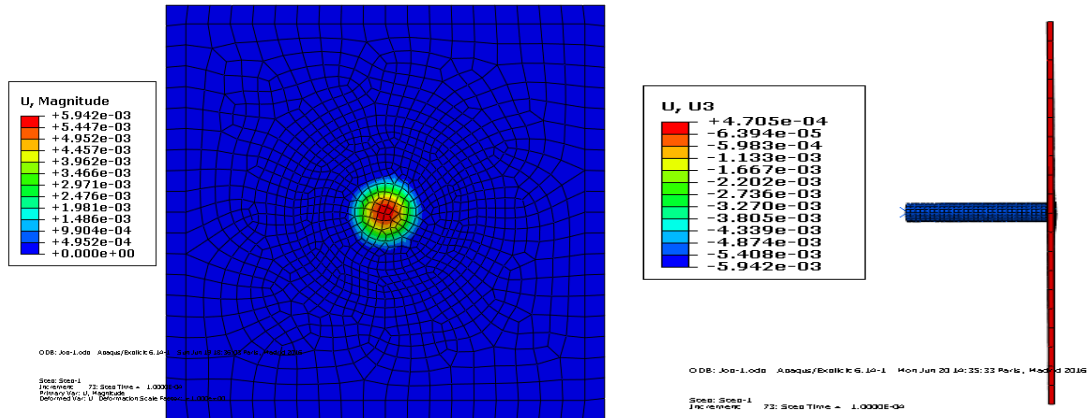
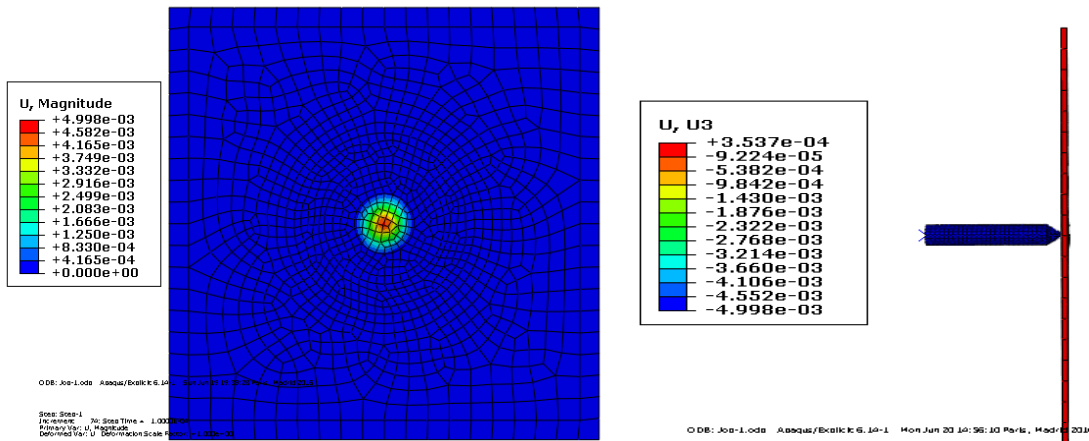


Figure 4.1 : Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique:



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

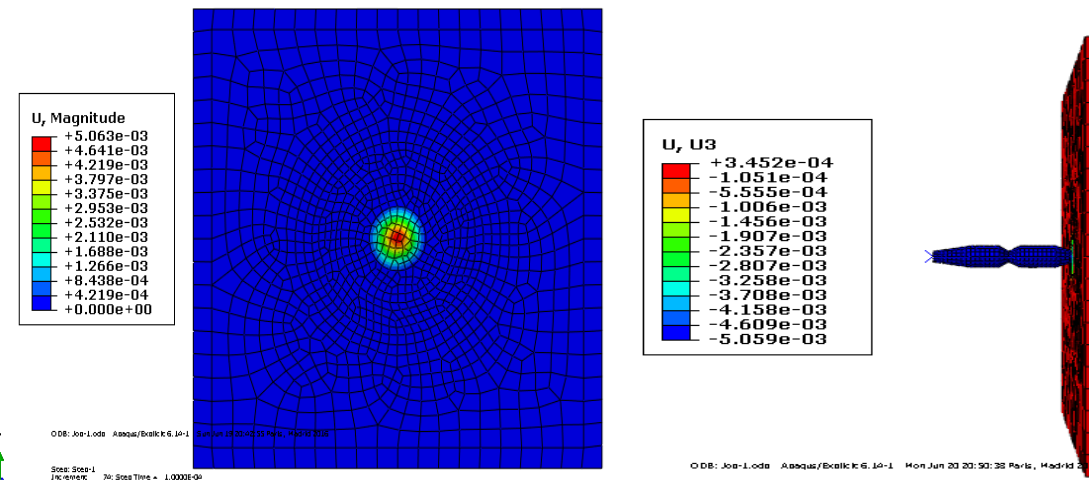


Figure 4.2 Déplacement et déformée de la plaque

2.2 2^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s

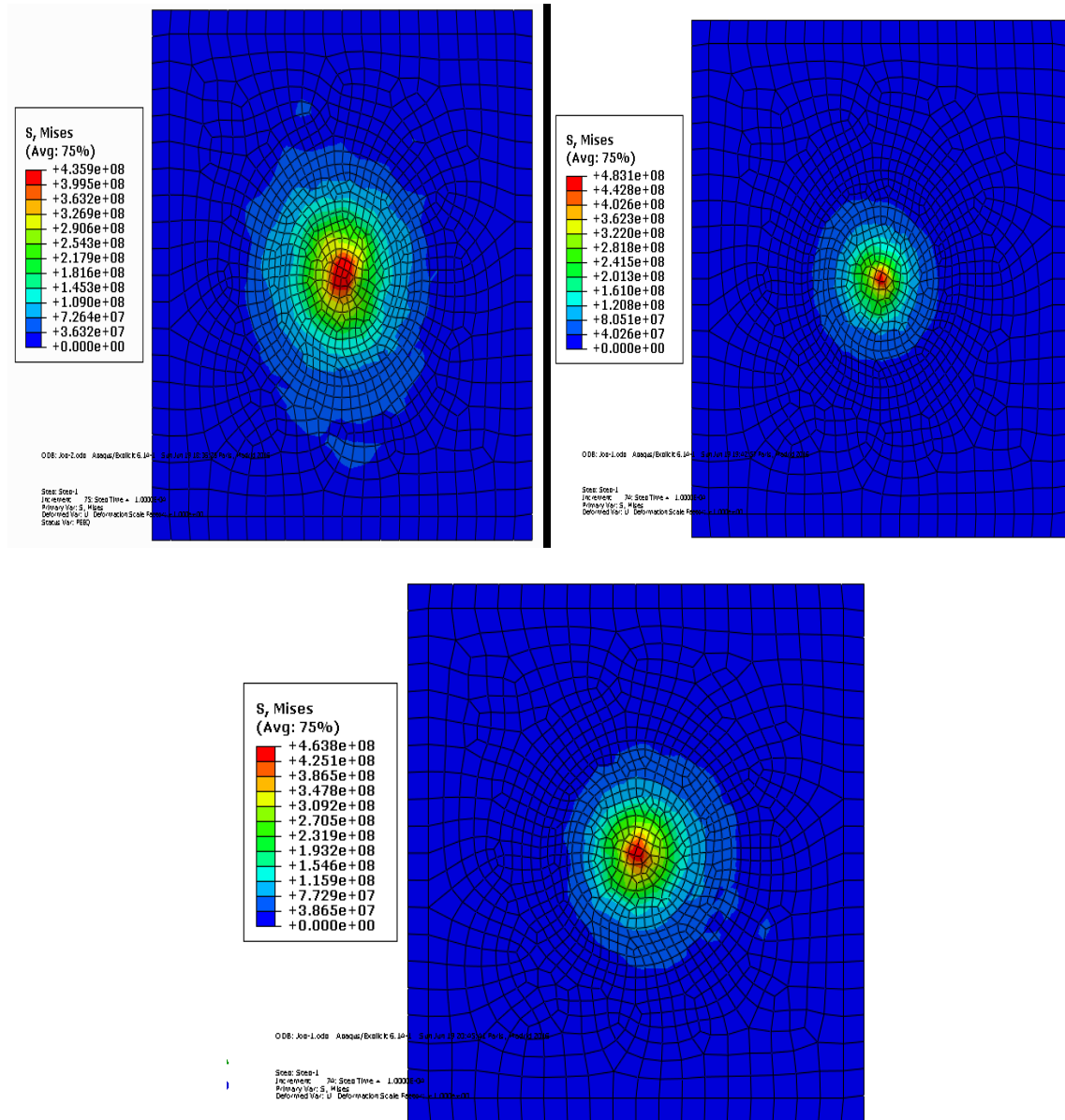
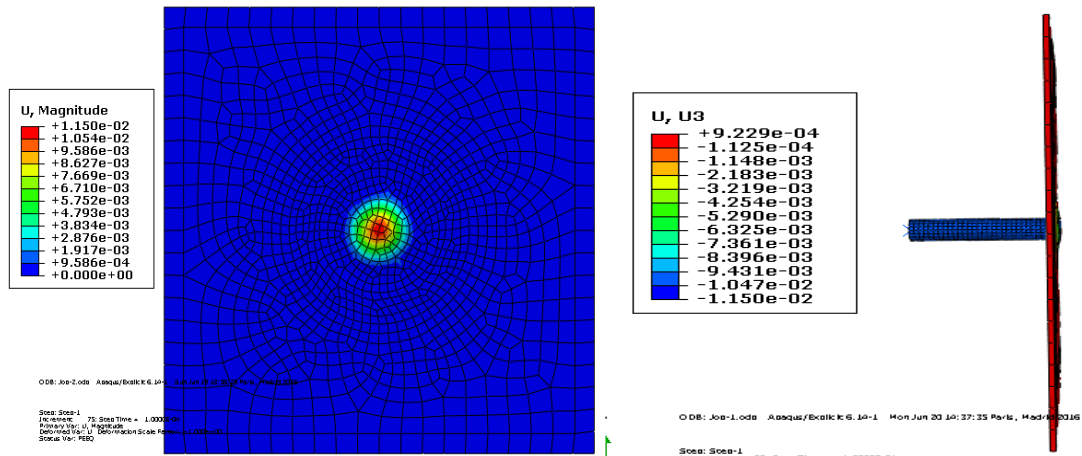
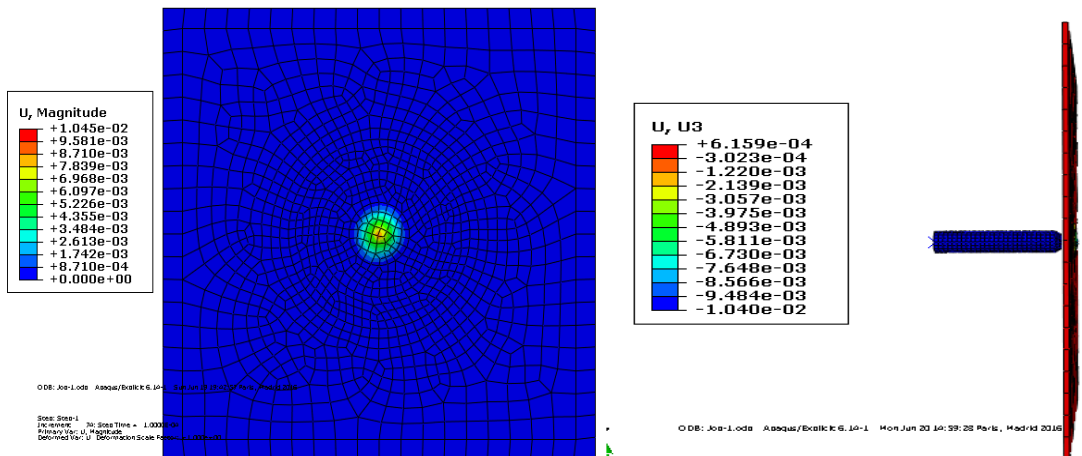


Figure 4.3 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique



Projectile pointue



Projectile quelconque

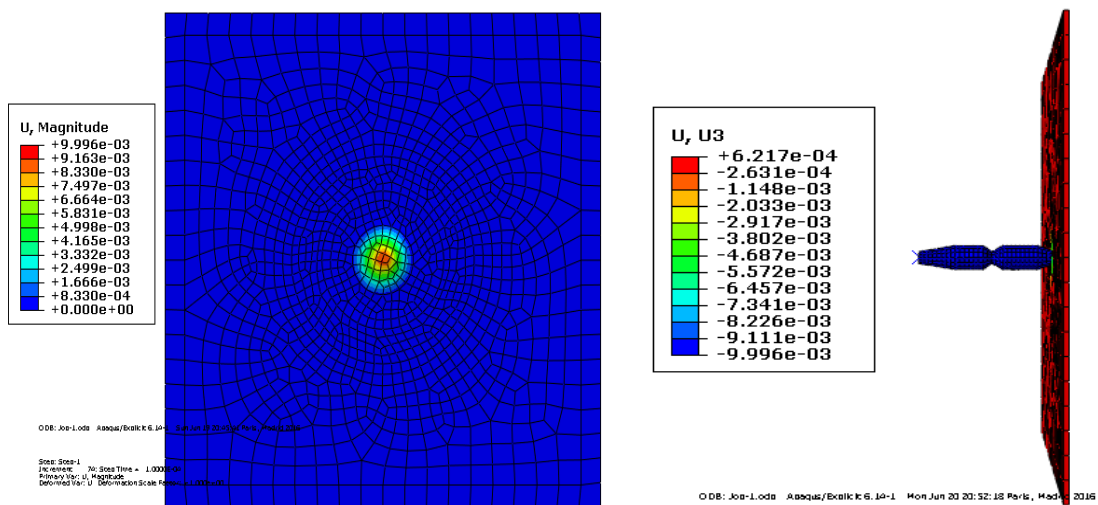


Figure 4.4 Déplacement et déformée de la plaque

3^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s

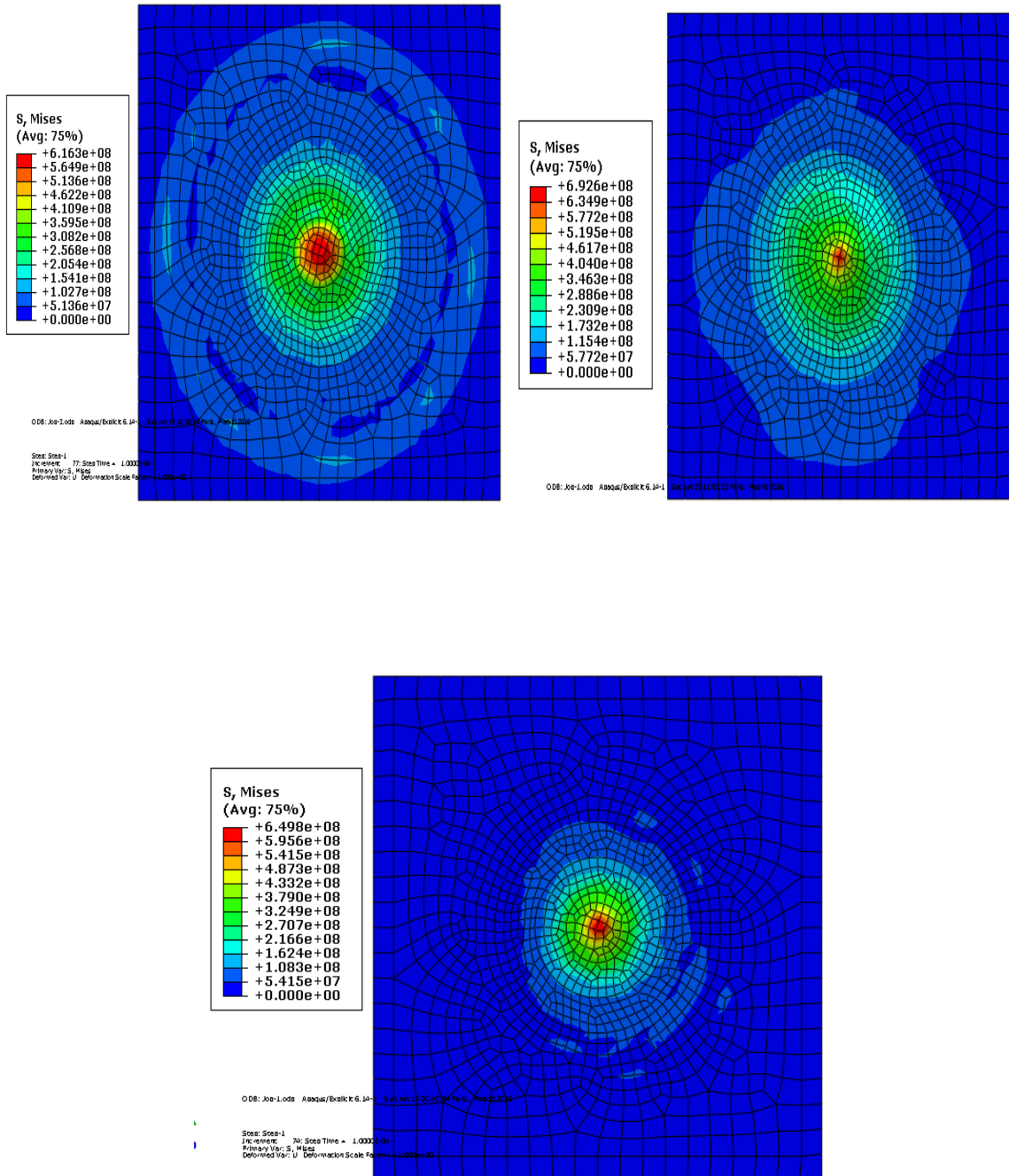
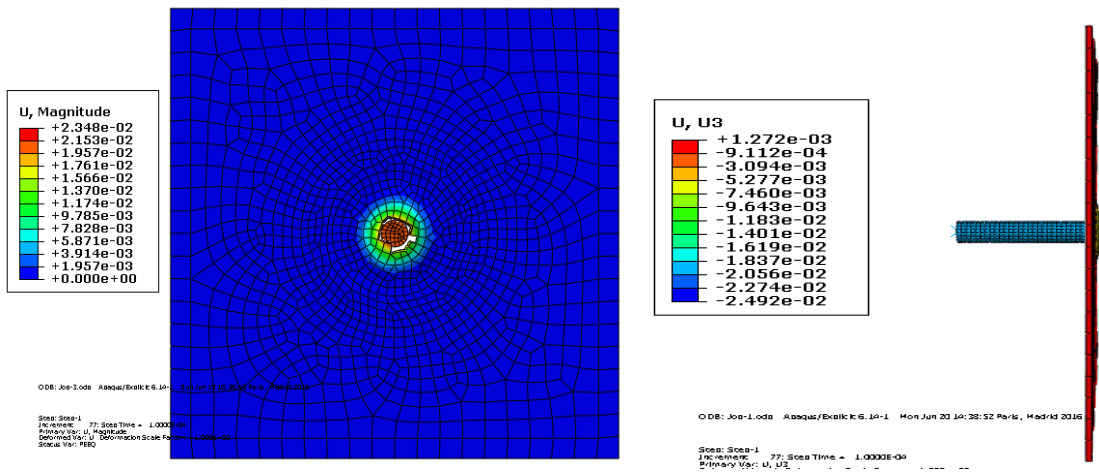
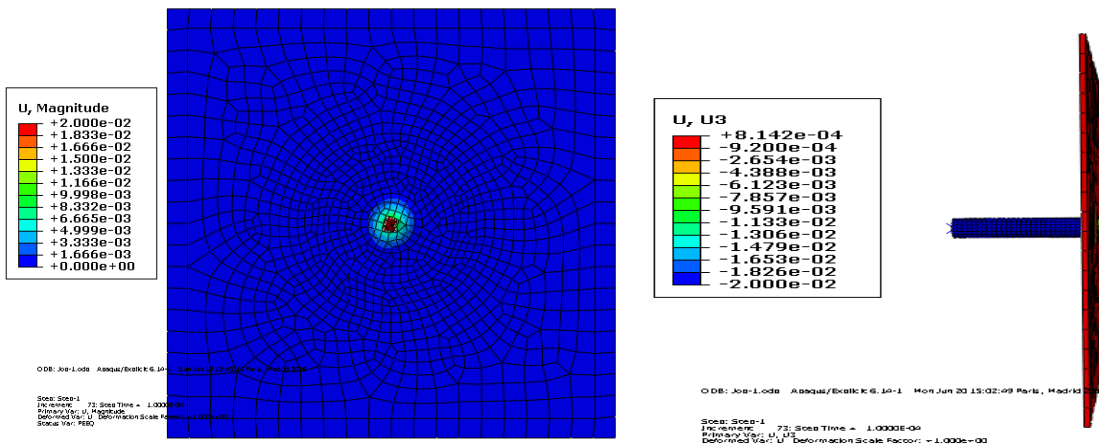


Figure 4.5 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

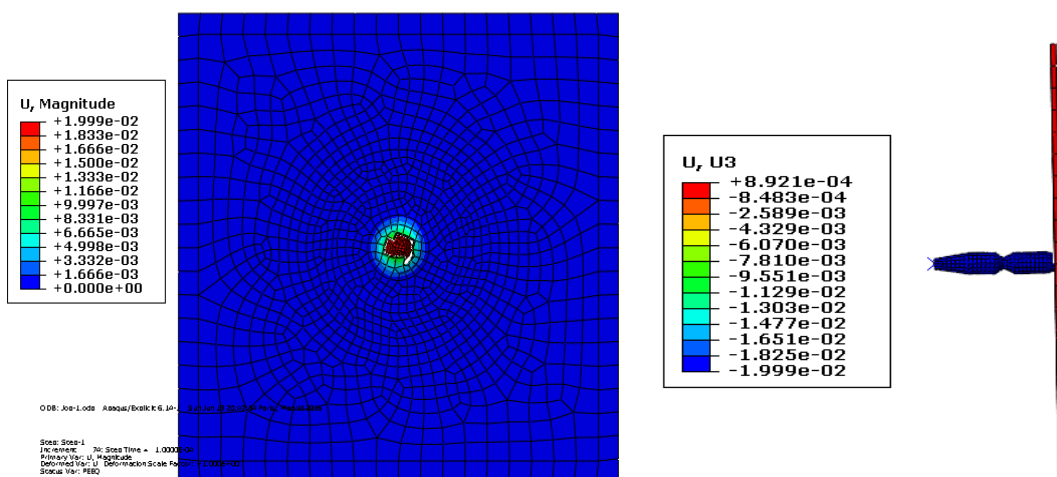
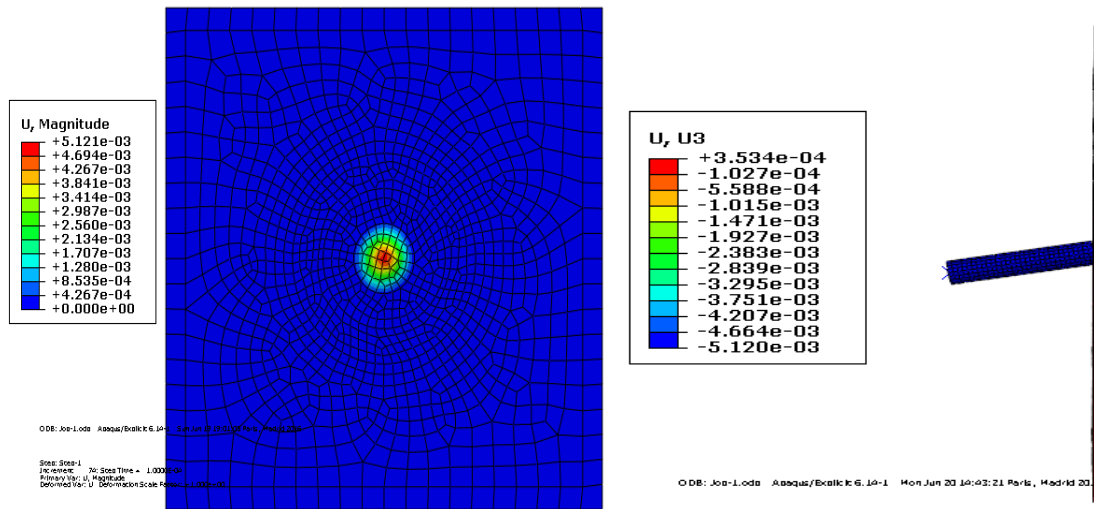
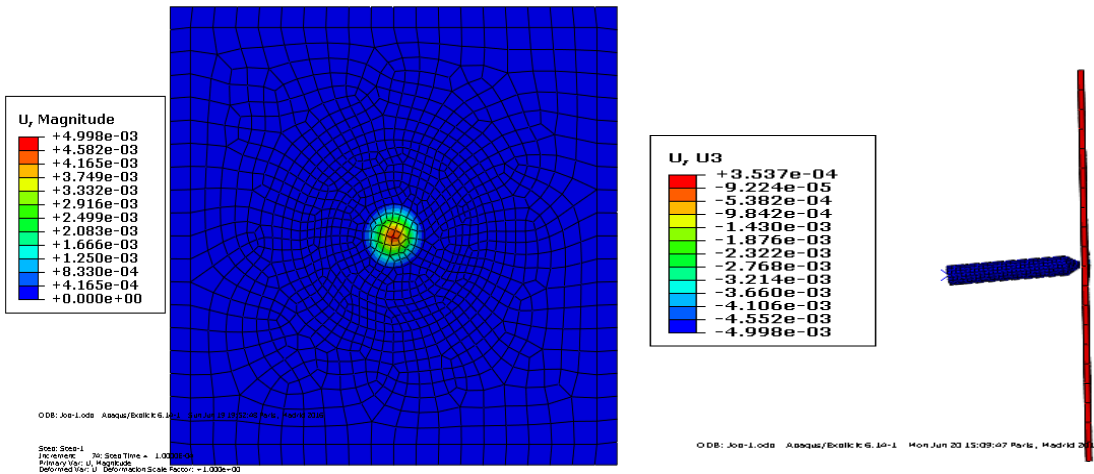


Figure 4.6 Déplacement et déformée de la plaque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

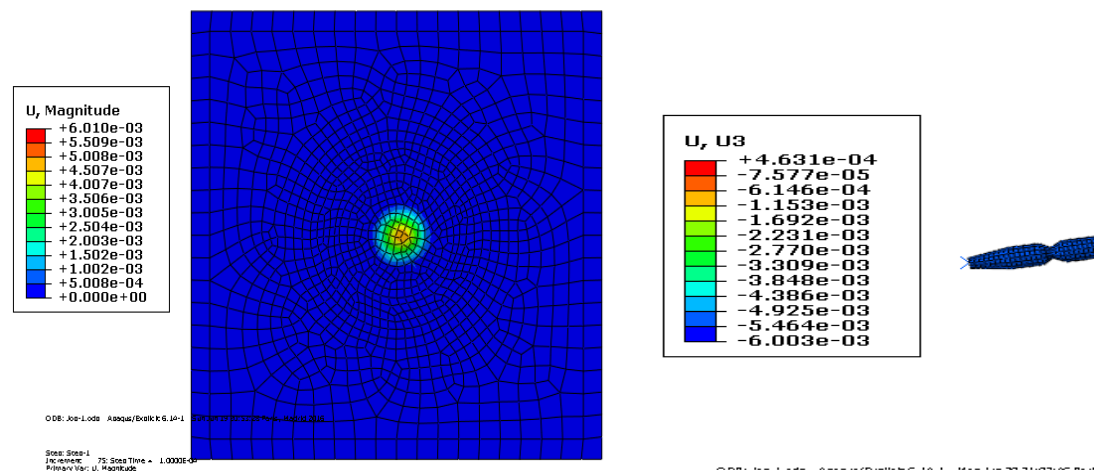


Figure 4.8 Déplacement et déformée de la plaque

3.2. 2^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s

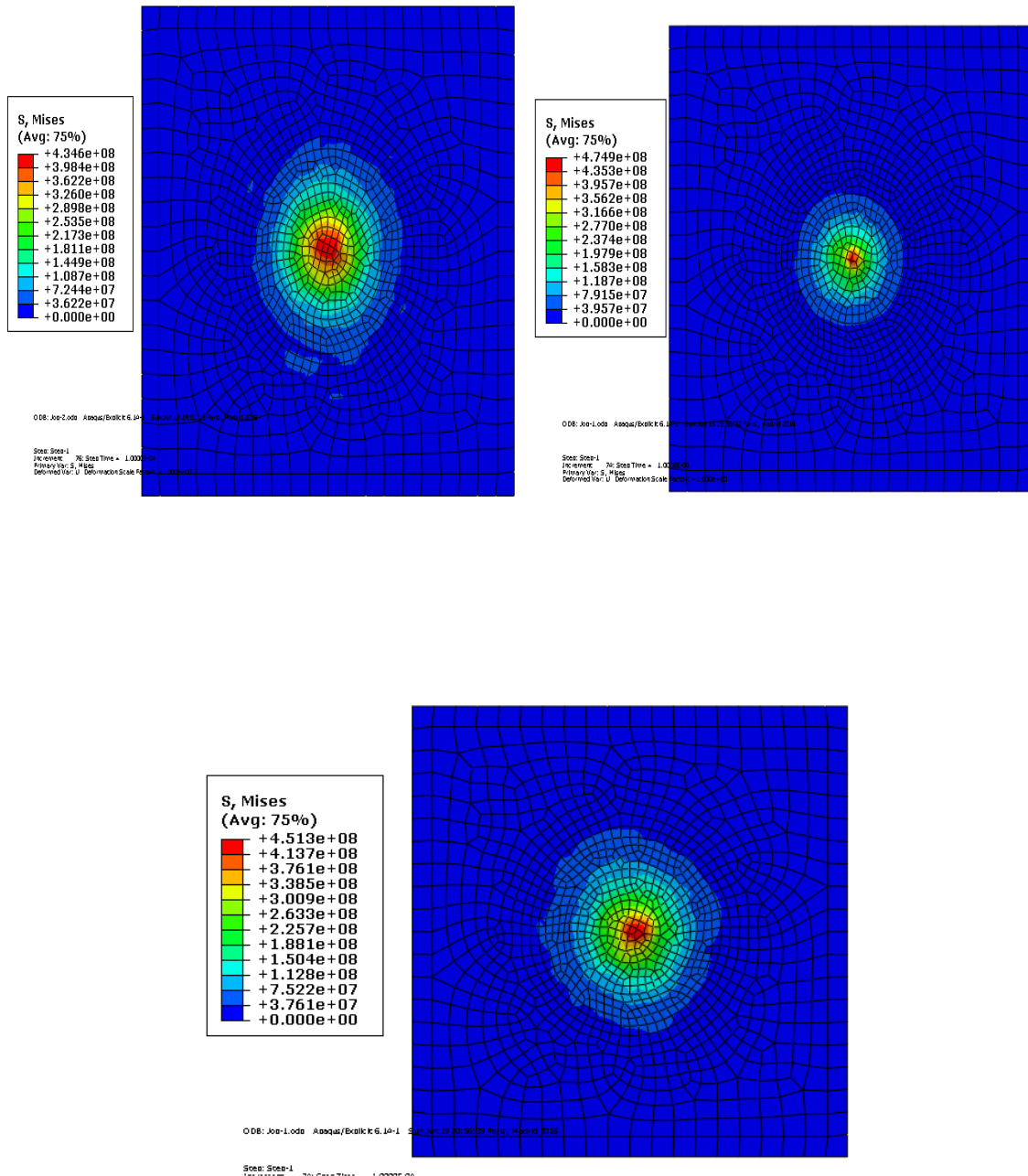
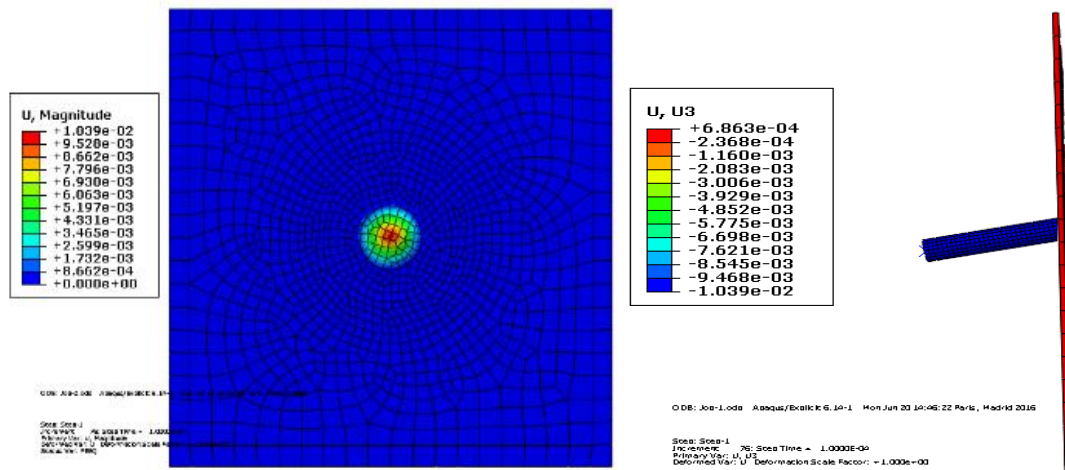
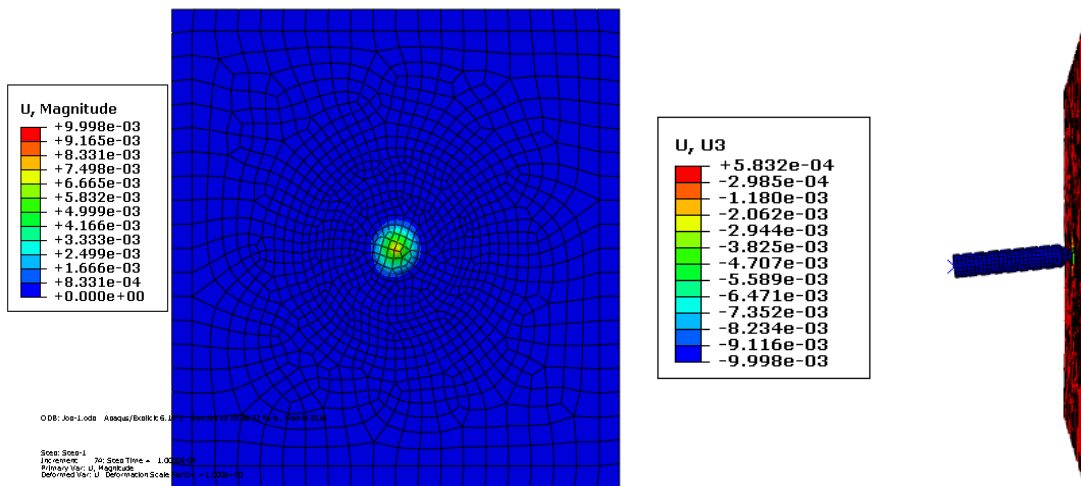


Figure 4.9 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

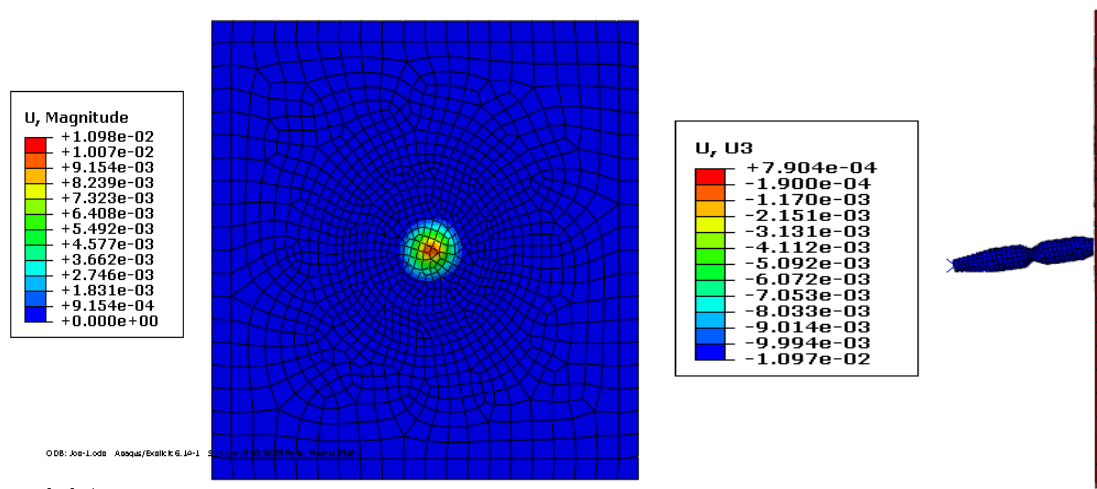


Figure 4.10 Déplacement et déformée de la plaque

3.3. 3^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s

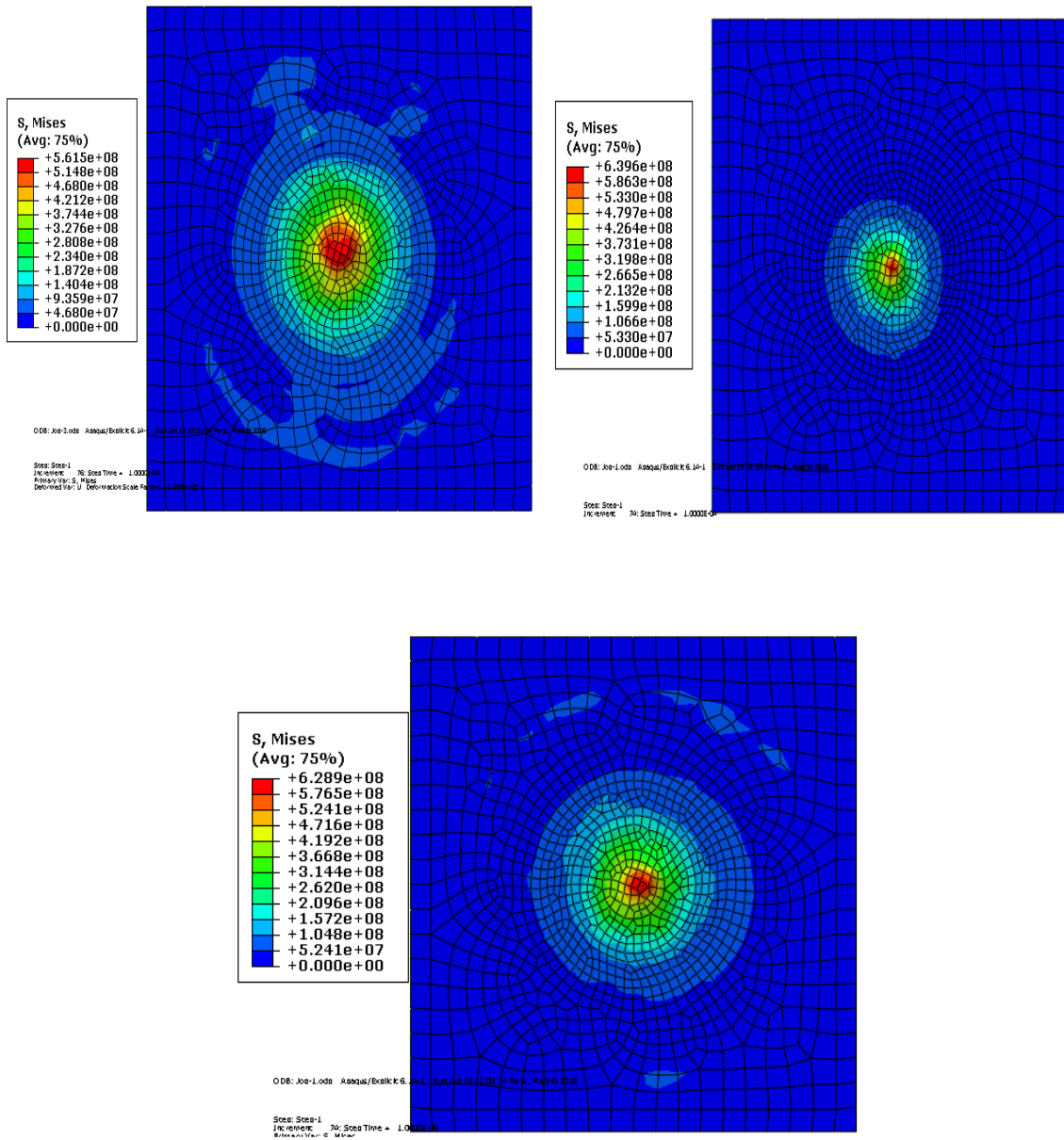


Figure 4.11 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

4. Angle d'inclinaison du projectile $\alpha = 30^\circ$

4.1. 1^{er} cas vitesse du projectile 50 m/s

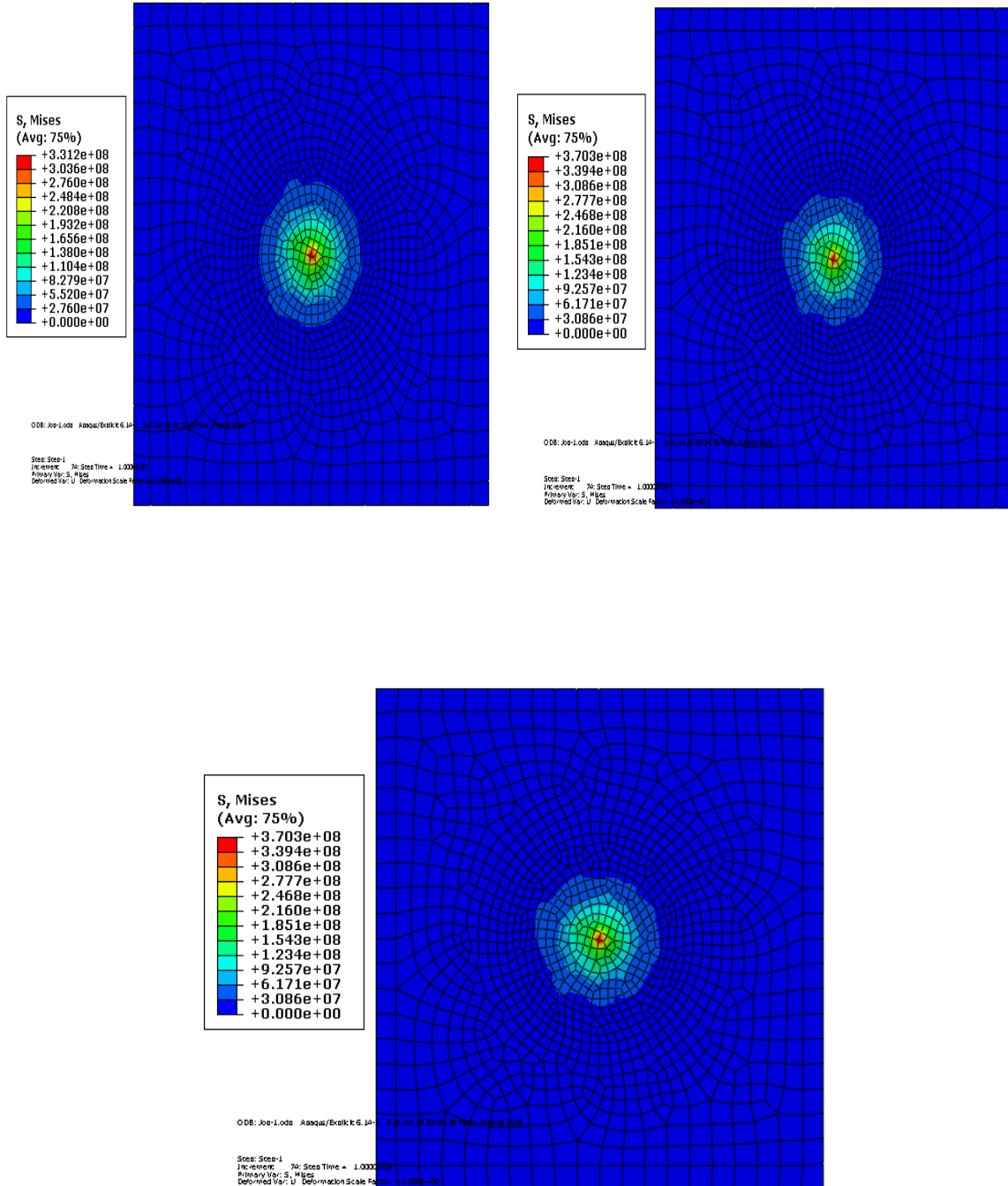
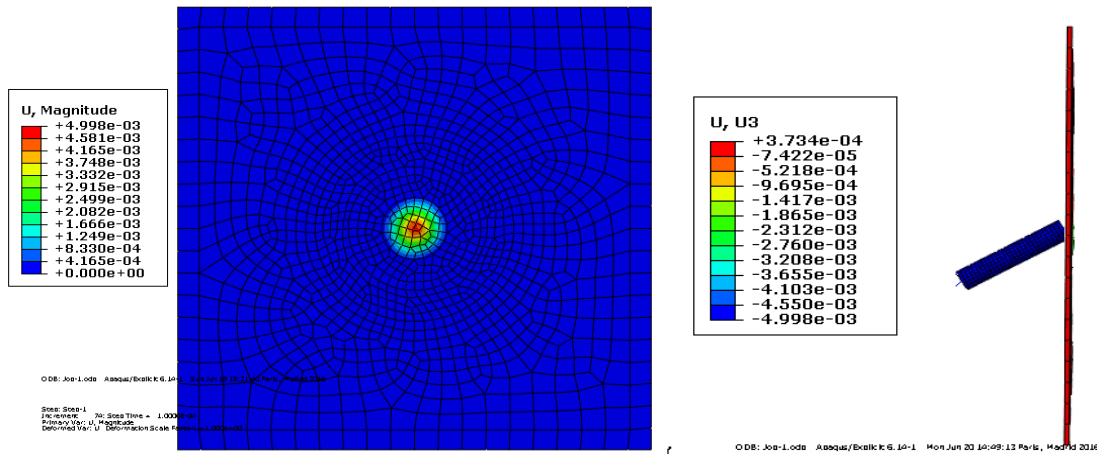
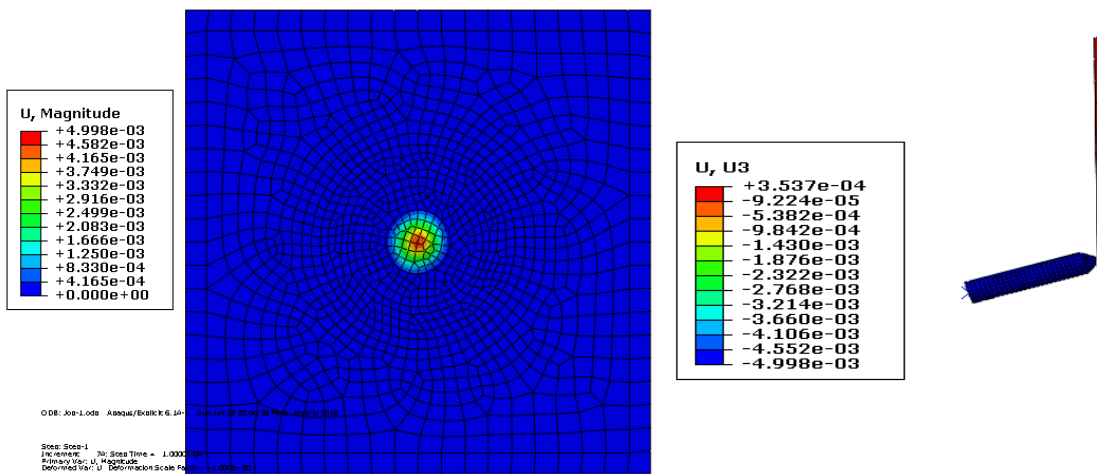


Figure 4.13 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

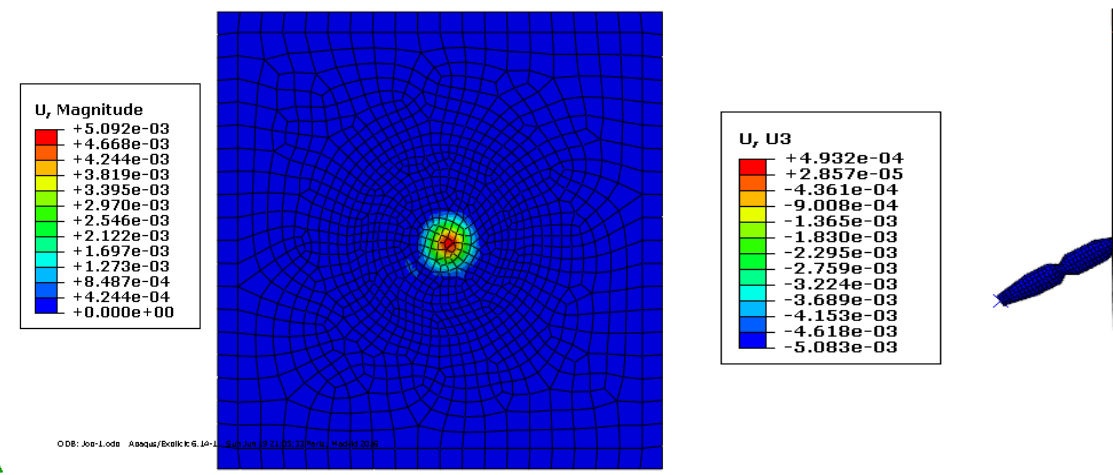


Figure 4.14 Déplacement et déformée de la plaque

4.2. 2^{ème} cas vitesse du projectile 100 m/s

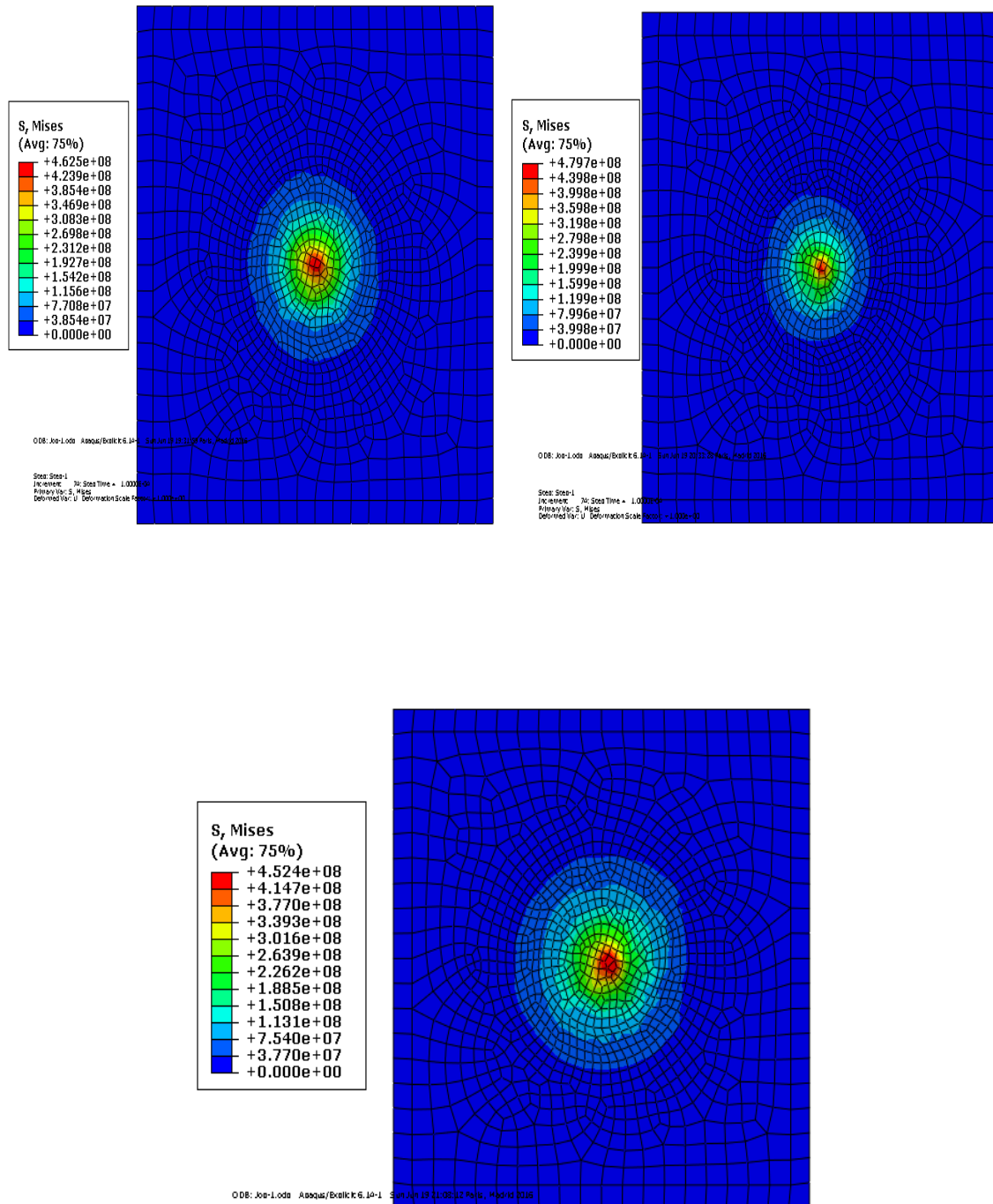
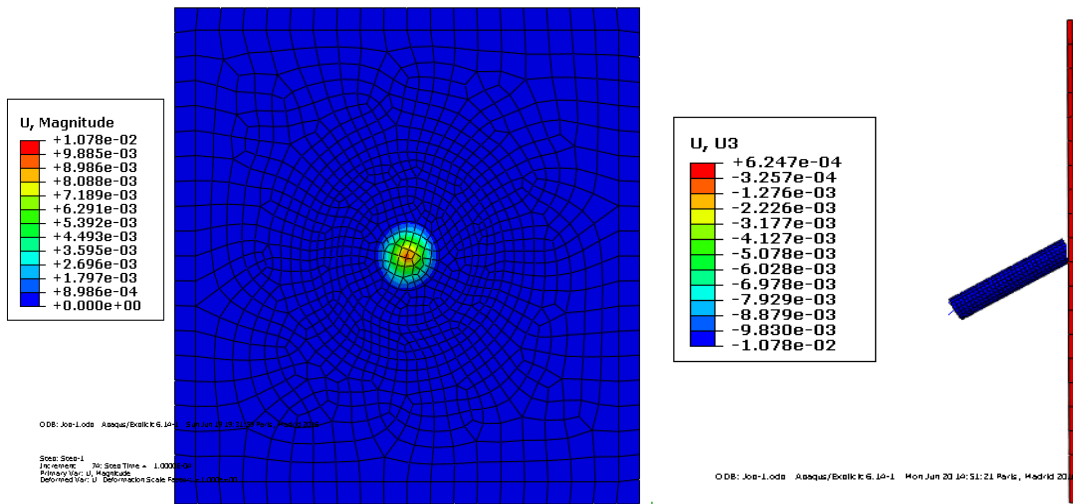
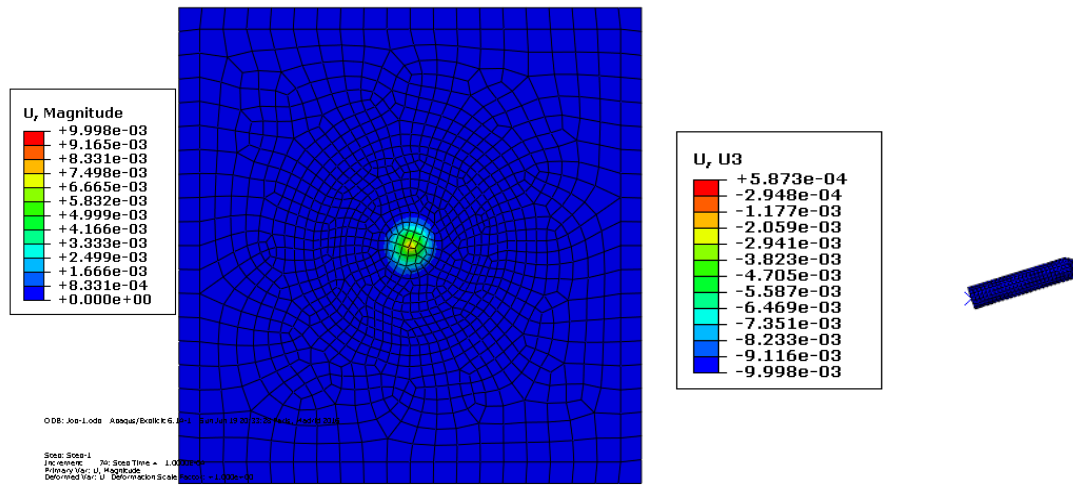


Figure 4.15 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

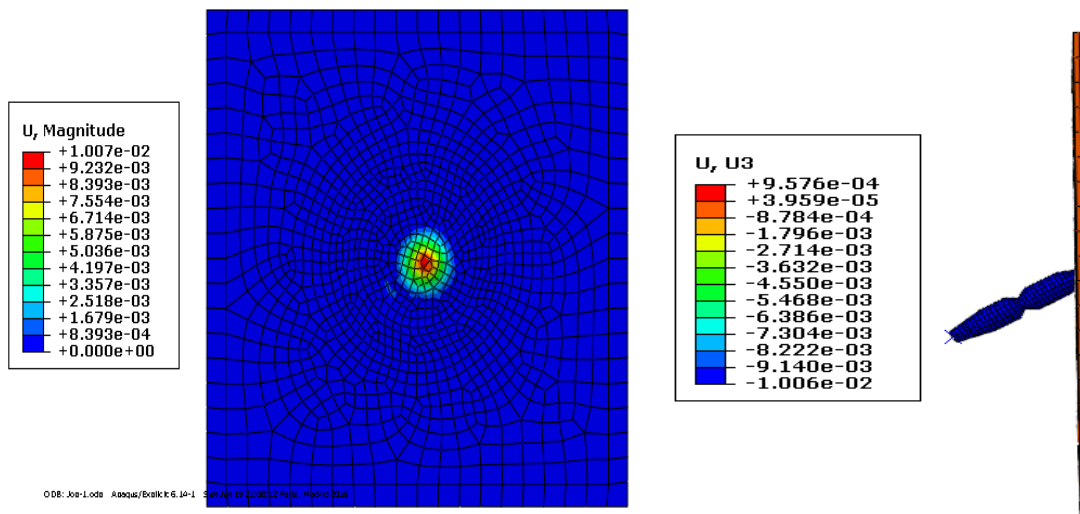


Figure 4.16 Déplacement et déformée de la plaque

4.3. 3^{ème} cas vitesse du projectile 200 m/s

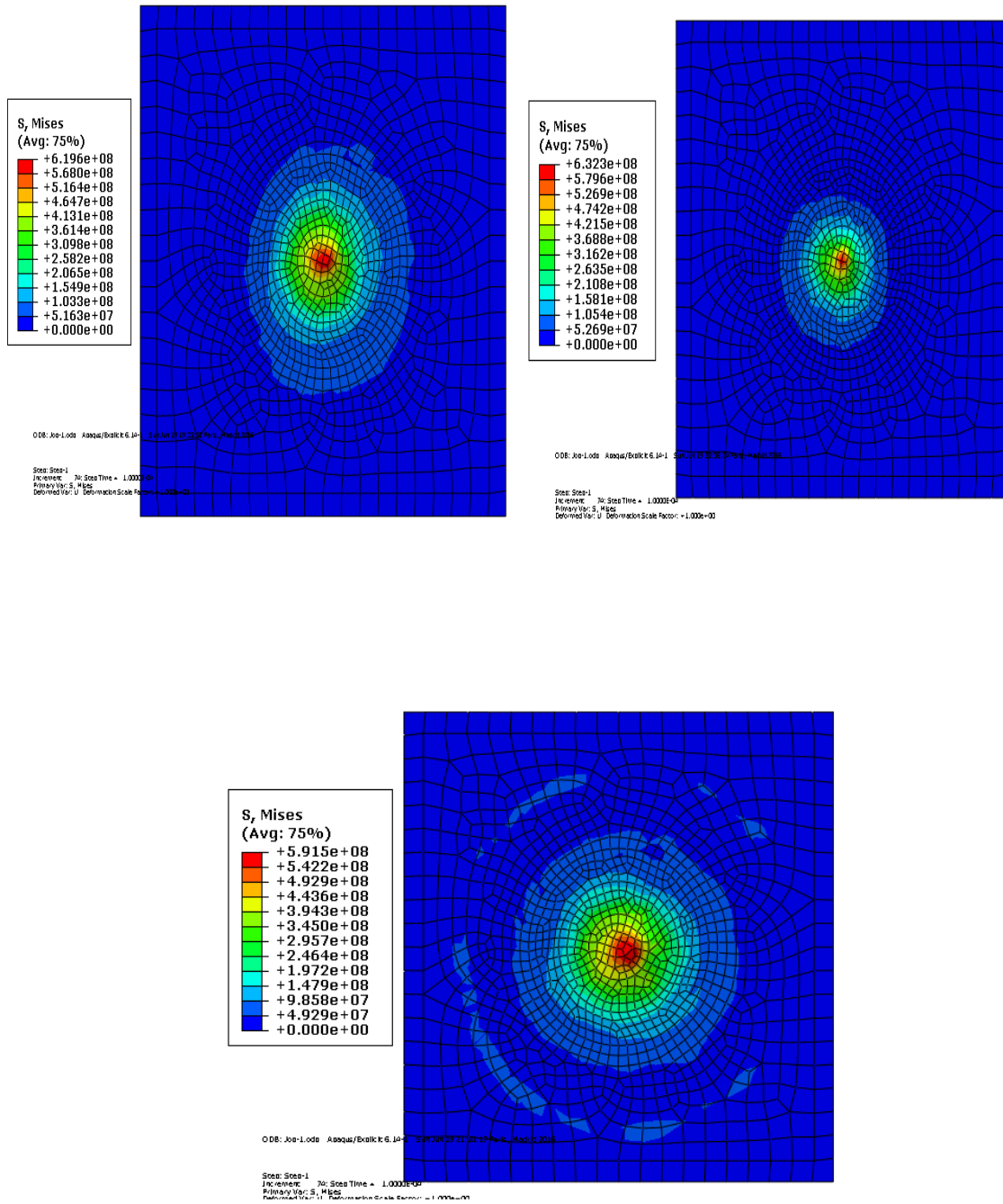
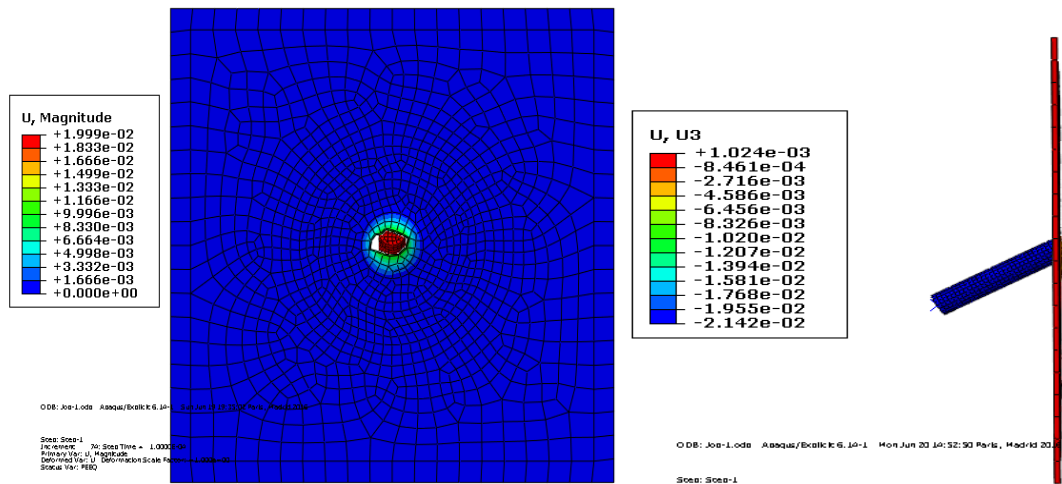
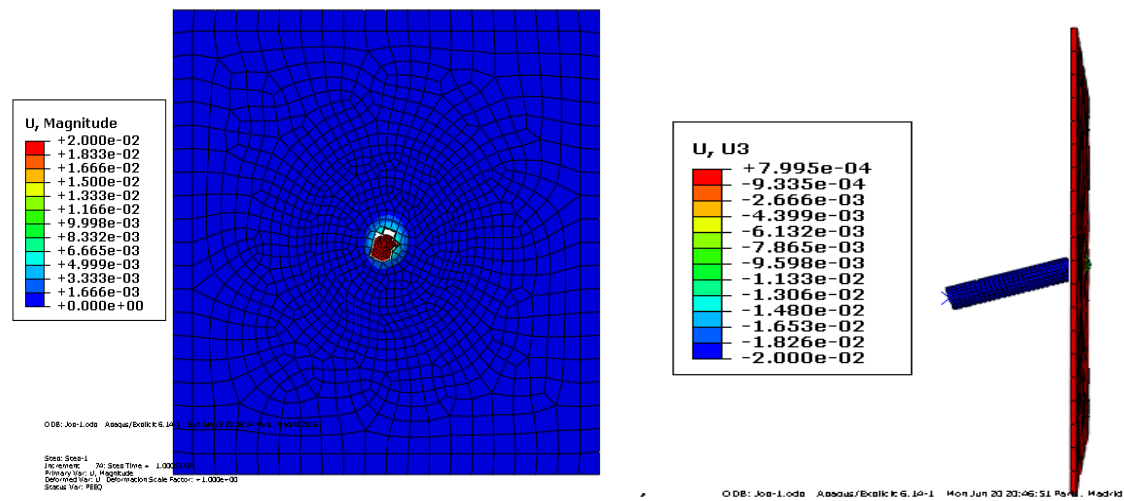


Figure 4.17 15 Contrainte : Projectile cylindrique, projectile pointue, projectile quelconque

Projectile cylindrique :



Projectile pointue :



Projectile quelconque :

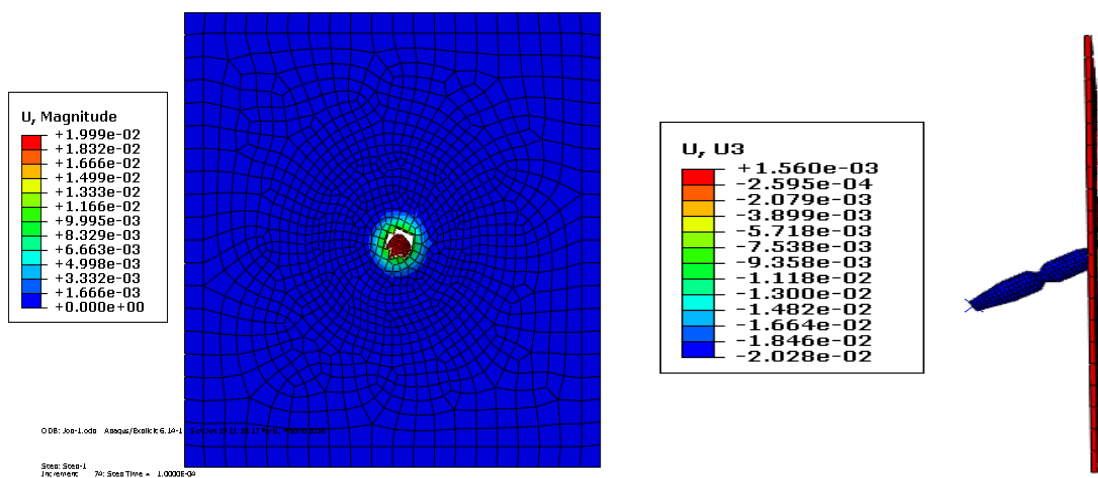


Figure 4.18 Déplacement et déformée de la plaque

Vitesse du projectile	50m/s			100 m/s			200 m/s		
	0°	10°	30°	0°	10°	30°	0°	10°	30°
Angle									
Forme du projectile									
Cylindrique	3.122 E8	3.031 E8	3.312 E8	4.359 E8	4.346 E8	4.625 E8	6.163 E8	5.6153 E8	6.196 E8
Pointue	3.703 E8	3.703 E8	3.703 E8	4.831 E8	4.749 E8	4.797 E8	6.926 E8	6.396 E8	6.323 E8
Quelconque	2.831 E8	3.109 E8	3.099 E8	4.638 E8	4.513 E8	4.524 E8	6.498 E8	6.289 E8	5.915 E8

Tableau 4.1 Contrainte de van miss dans la plaque (N/m²) :

Vitesse du projectile Angle Forme du projectile	50 m/s			100 m/s			200 m/s		
	0°	10°	30°	0°	10°	30°	0°	10°	30°
	Cylindrique	5.942 E-3	5.12 E-3	4.998 E-3	1.15 E-2	1.039 E-2	1.078 E-2	2.348 E-2	2.077 E-2
Pointue	4.998 E-3	4.998 E-3	4.998 E-3	1.045 E-2	9.998 E-3	9.9988 E-3	2.00 E-2	2.00 E-2	2.00 E-2
Quelconque	5.063 E-3	6.010 E-3	5.092 E-3	9.996 E-3	1.098 E-2	1.007 E-2	1.999 E-2	1.999 E-2	1.999 E-2

Tableau 4.2 Déplacement de la plaque (m) :

Vitesse du projectile	50 m/s			100 m/s			200 m/s		
	0°	10°	30°	0°	10°	30°	0°	10°	30°
Forme du projectile	0°	10°	30°	0°	10°	30°	0°	10°	30°
Cylindrique	-5.942 e-3	-5.120 e-3	-4.998 e-3	-1.150 e-2	-1.039 e-2	-1.078 e-2	-2.348 e-2	-2.074 e-2	-1.999 e-2
Pointue	-4.998 e-3	-4.998 e-3	-4.998 e-3	-1.040 e-2	-9.998 e-3	-9.998 e-3	-2.000 e-3	-2.000 e-2	-2.000 e-2
Quelconque	-5.059 e-3	-6.003 e-3	-5.083 e-3	-9.996 e-3	-1.097 e-2	-1.006 e-2	-1.999 e-2	-1.999 e-2	-1.999 e-2

Tableau 4.3 Déplacement de la plaque U3 (m)

INTERPRETATION

Les figures 4.1 à 4.18 illustre l'évolution qualitative de la contrainte de van mises, du déplacement total et du déplacement suivant l'axe Z.

Ce que l'on peut conclure est :

- au-delà d'une certaine valeur de la vitesse, il y a rupture de la plaque.
- l'inclinaison du projectile a une incidence sur le comportement de la plaque.
- la forme du projectile a une influence sur le comportement de la plaque.
- Plus la surface de contact est importante, plus la distribution des contraintes est importante.

Le tableau 4.1 à 4.3 illustre l'évolution quantitative de la contrainte de van mises, du déplacement total et du déplacement suivant l'axe Z.

Ce que l'on peut conclure est :

- pour une forme cylindrique du projectile, la contrainte maximale est obtenue pour un angle de 30°.
- pour une forme pointue du projectile, la contrainte maximale est obtenue pour un angle de 0°.
- Le cas d'une forme pointue du projectile, représente le cas le plus défavorable.
- en terme de déplacement total, pour une même forme du projectile, plus la vitesse est importante, plus le déplacement est important pour un angle d'inclinaison fixé.
- pour une même forme et une vitesse constante, le déplacement diminue lorsque l'angle d'inclinaison augmente.
- concernant le comportement de la plaque au début du contacte il y a un gonflement puis au bout d'un moment y a rupture de la plaque.

Remarque : nous avons essayé de mettre en évidence une tendance précise mais certains résultats doivent être étoffés.

CHAPITRE 5

ANALYSE PROBABILISTE DE L'IMPACT D'UN PROJECTILE

1. INTRODUCTION

La mécanique probabiliste est un domaine de fiabilité qui permet de tenir compte des incertitudes concernant un système physique et d'étudier l'impact de ces incertitudes sur la réponse du modèle qui représente le système étudié. La mécanique probabiliste correspond à un couplage entre d'une part, la modélisation d'un phénomène physique (ex. génie civil, génie mécanique, etc.) Et d'autre part, les mathématiques appliquées (ex. statistiques, théorie des probabilités et simulation numérique).

2. LA FIABILITE :

La fiabilité d'une structure se caractérise par la performance de celle-ci à remplir une fonction définie sous des conditions données, pendant une durée fixée et en respectant le niveau de sécurité exigé [20,25].

La difficulté dans l'évaluation de la fiabilité provient de la nature incertaine des phénomènes mis en jeu sur la structure considérée (variabilités des propriétés des matériaux, imprécisions géométriques, aléas des chargements appliqués,..), qui vont avoir un impact significatif sur les performances du système [9].

3. PROBLEMATIQUE :

Traditionnellement, le dimensionnement des structures est fondé sur une démarche déterministe dans laquelle l'ensemble des paramètres précités prennent une valeur fixe. Précisément, les paramètres incertains sont décrits par une valeur caractéristique

défavorable. Associée à des coefficients de sécurité, l'analyse conduit alors à une réponse binaire ("sûreté" ou "défaillance") vis-à-vis d'un critère donné, qui traduit d'une certaine manière la confiance que l'on peut accorder à ce dimensionnement précis. L'approche déterministe utilise par conséquent une marge volontairement pessimiste conduisant le plus souvent à un surdimensionnement injustifié [9].

Dans la démarche fiabiliste en revanche, on construit une modélisation probabiliste dans laquelle les données incertaines sont représentées par des variables aléatoires. On peut ensuite évaluer la probabilité de défaillance de la structure ainsi que mesurer la sensibilité de cette probabilité par rapport à chacune des variables aléatoires introduites.

Deux applications sont envisageables :

- soit on connaît les caractéristiques de la structure et on vérifie que sa fiabilité est satisfaisante ;
- soit on optimise le dimensionnement de celle-ci de façon à respecter un niveau de fiabilité donné.

L'analyse fiabiliste est basée sur les trois étapes suivantes : [20, 23,25].

- La sélection des variables aléatoires de base, qui vont intégrer les incertitudes mises en jeu à travers leur loi de distribution,
- Le choix d'une fonction de performance définissant la défaillance du système,
- Le calcul des indicateurs de fiabilité, qui vont fournir une évaluation quantitative et qualitative de la fiabilité de celui-ci.

4. CHOIX DES VARIABLES ALEATOIRES DE BASE :

La sélection des variables aléatoires est une étape cruciale pour le modèle fiabiliste qui nécessite une connaissance fine du matériau étudié (origine, comportement mécanique) et de la structure considérée (fabrication, actions).

Ces incertitudes proviennent le plus souvent de variabilités liées au processus de fabrication, aux imperfections des conditions d'essais de caractérisation, à des facteurs incontrôlés tels que les fluctuations du chargement ou simplement de la difficulté d'accéder à certaines données ou informations.

Ainsi le choix des variables aléatoires est guidé par plusieurs critères :

- l'objectif de l'étude fiabiliste : par exemple, l'utilisation des propriétés mécaniques suffira à évaluer la probabilité de défaillance d'un matériau donné ; en revanche, pour la conception d'un nouveau matériau, le recours à des données supplémentaire sera plus pertinent ;
- l'explication physique des aspects du comportement mécanique du matériau, notamment le mode de défaillance et les causes de sa mise en place suivant la sollicitation envisagée,
- la disponibilité de résultats expérimentaux : les modèles probabilistes associés aux variables aléatoires doivent effectivement être physiquement justifiés pour aboutir à une représentation réaliste.

5. LES LOIS DE DISTRIBUTION :

Il existe un grand nombre de lois de distribution décrivant les variables aléatoires dans la littérature. Les plus utilisées pour décrire les incertitudes en génie civil sont la loi normale, la loi log normale et la loi bêta, dont les caractéristiques sont données en annexe.

6. CHOIX DE LA FONCTION DE PERFORMANCE :

Il s'agit là de construire un scénario de défaillance de la structure, autrement dit, préciser l'état limite au-delà duquel cette structure n'est plus considérée comme fiable. Ces états limites correspondent principalement à des exigences en termes de tenue mécanique (la défaillance est associée à la rupture du matériau ou la ruine de la structure) ou d'aptitude au service (la défaillance est associée à des déformations ou un endommagement excessif) [1].

Un critère de défaillance est défini à l'aide d'une fonction d'état limite, notée G , et qui dépend des variables aléatoires du modèle. Les points importants concernant le critère de défaillance sont les suivants :

- le choix de la fonction de performance se doit d'être dicté par la cause physique de la défaillance de façon à en obtenir une représentation réaliste.
- Si la forme du critère est généralement du type :

$$G = R - S$$

Avec R une caractéristique de résistance Et S une donnée relative à la sollicitation appliquée, La fonction G n'est pas forcément une fonction explicite des variables de base, elle peut dépendre en effet de la réponse de la structure (par exemple contraintes ou déformations) et son évaluation nécessite alors un calcul mécanique préalable (le plus souvent par éléments finis) faisant intervenir une loi de comportement (couplage mécano-fiabiliste).

Une valeur donc positive de G signifie que les réalisations des variables aléatoires conduisent à une situation de sécurité et une valeur négative signifie qu'elles conduisent à une situation de défaillance. La courbe représentant $G=0$ est appelée courbe d'état limite.

- $G(R, S) < 0$: domaine de défaillance ;
- $G(R, S) = 0$: état limite ;
- $G(R, S) > 0$: domaine de sécurité.

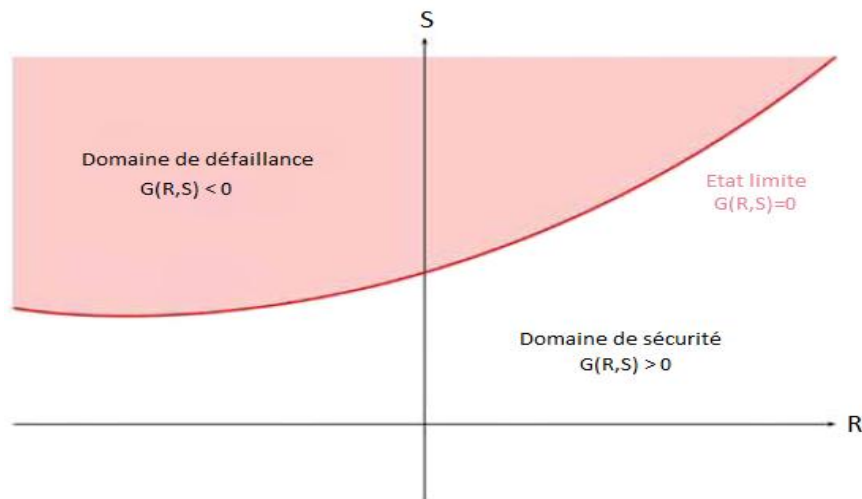


Figure 5.1: Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité

7. INDICATEURS DE FIABILITE :

La fiabilité R (en anglais, reliability) d'une structure est conventionnellement définie de la façon suivante :

$$R = 1 - P_f$$

Où P_f probabilité de défaillance (probability of failure) correspond à la probabilité d'avoir une valeur négative d'une réalisation de la fonction d'état G , on a donc :

$$P_f = P(G(\{X\}) \leq 0)$$

Cet indicateur de confiance constitue le résultat essentiel d'un calcul fiabiliste. Diverses méthodes de résolution ont ainsi été développées [20, 23,25]. Classiquement, on distingue deux grandes familles :

- les méthodes basées sur des simulations
- Les méthodes recourant à une approximation.

8. PRINCIPALES APPROCHES POUR TENIR COMPTE DES INCERTITUDES :

Parmi les méthodes disponibles dans la littérature, nous avons choisi de présenter la méthode à base de simulations de Monté Carlo. Il s'agit de la technique la plus ancienne et la plus intuitive d'évaluation de la probabilité de défaillance. Basée sur l'application de la loi des grands nombres, elle consiste à déterminer un estimateur de la probabilité de défaillance par succession de tirages aléatoires indépendants.

On réalise ainsi un nombre N_t important de tirages des variables aléatoires. Pour chaque tirage, la fonction de performance est calculée et l'on dénombre les tirages $N_{t,f}$ conduisant à la réalisation $(G(\{X\}) \leq 0)$ (figure 2.3). On en déduit alors la probabilité de défaillance par un traitement statistique direct :

$$P_f = \frac{N_{t,f}}{N_t}$$

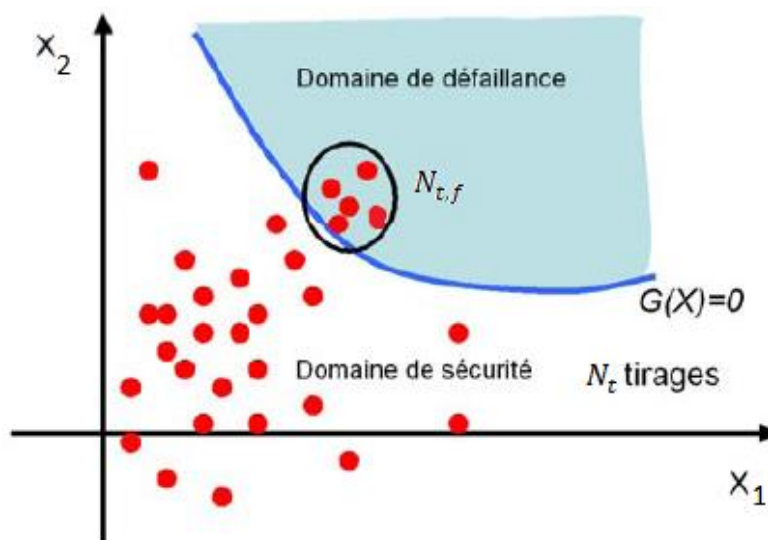


Figure 5.2 : Illustration de la méthode de Monte-Carlo

9. APPLICATION A L'IMPACT D'UN PROJECILE :

9.1. SIMULATION PROBABILISTE :

La simulation probabiliste est incontournable lorsqu'il s'agit de gérer des phénomènes aléatoires, elle permet d'aborder cette discipline réputée théorique et ardue, par la voie de l'expérimentation.

La simulation est une méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène ou un système par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue. Le système ou phénomène analysé peut être schématisé sous forme d'un modèle mécanique.

9.2. PRESENTATION DE MATLAB :

Matlab est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles, ect

Matlab est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées. Il est très utilisé dans les universités comme dans le monde industriel.

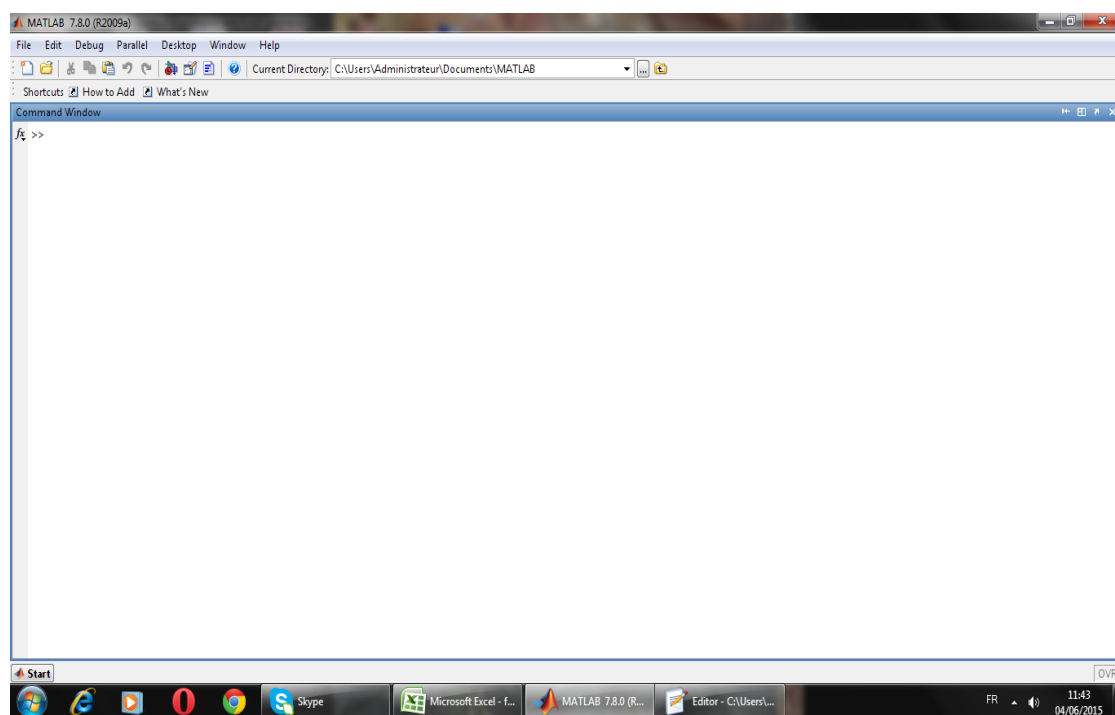


Figure 5.3 : Représentation de l'interface Matlab.

9.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE :

Pour la simulation, nous avons mis en place un outil de calcul sous Matlab ; qui nous permettra d'effectuer tous les calculs nécessaires afin d'aboutir à la probabilité de défaillance.

9.4. GENERATIONS DE NOMBRES ALEATOIRES :

Pour les besoin de la simulation nous utilisons un gerenateur de variables aléatoire. Ainsi plusieurs échantillons sont ainsi obtenus pour chaque paramètre de notre talus, choisi comme variable aléatoire. Chaque paramètre suit une loi de distribution avec une moyenne et un écart type.

9.5. ORGANIGRAMME DE CALCUL :

L'organigramme ci-dessous, illustre la procédure de calcul de la probabilité de défaillance par la méthode de Monte Carlo.

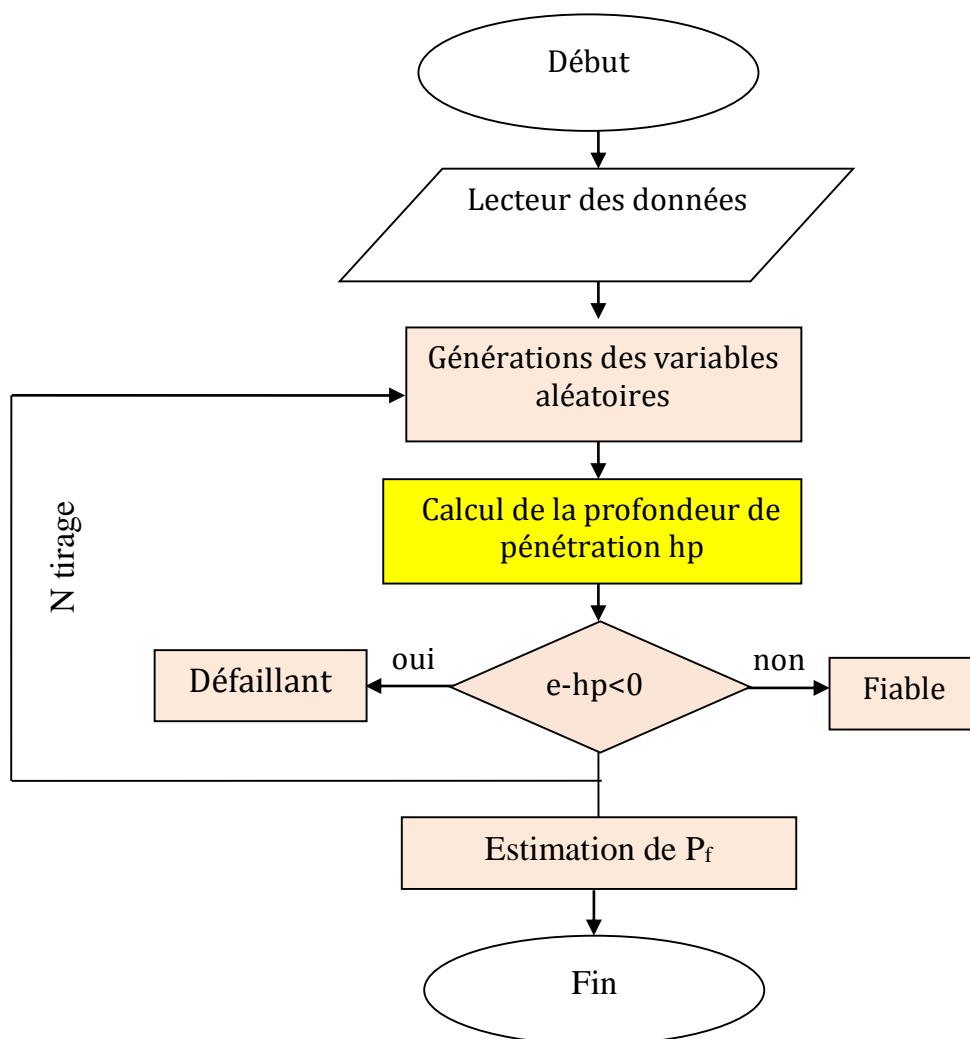


Figure 5.4 : Organigramme de calcul de la probabilité de défaillance d'une plaque

9.6. CHOIX DES VARIABLES ALEATOIRES :

La modélisation du phénomène de l'impact d'un projectile est affectée par de nombreuses incertitudes, dont il est difficile d'estimer quantitativement les variabilités associées.

Dans le cadre de cette étude, nous considérons un modèle analytique simplifié avec un angle d'inclinaison non nul. Ce modèle intègre parfaitement les propriétés mécaniques du matériau constitutif de la cible ainsi que les propriétés géométriques et cinétiques du projectile. Ce modèle nous permet de déterminer la profondeur de pénétration du projectile h_p .

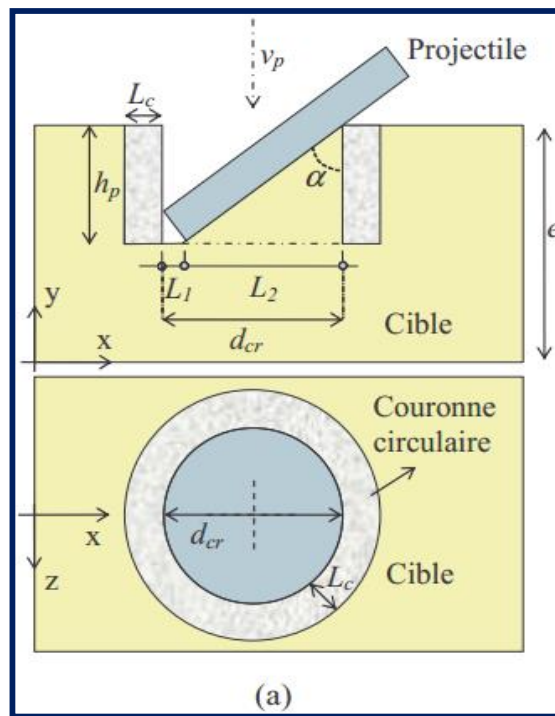


Figure 5.6 : Illustration du modèle analytique

$$h_p = \frac{d_p \sin \alpha + \sqrt{(d_p \cos \alpha)^2 + 4 \tan \alpha \left(\frac{E_c}{f_u \varepsilon_u} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{\pi}}}{2 \tan \alpha}$$

Avec

$E_c = \frac{1}{2}mv^2$: Energie cinétique.

d_p : Diamètre du projectile.

f_u : Limite élastique.

ε_u : Déformation ultime.

α : Angle d'inclinaison.

Les sources d'incertitudes retenues dans notre étude sont relatives aux propriétés physiques et mécaniques de la plaque. Ces paramètres sont représentés dans le tableau 5.1.

Reste donc à préciser leur loi de distribution : étant donné que l'on travaille avec des données issues de la littérature qui portent sur des valeurs moyennes, il semble plus pertinent de recourir à la loi normale qui fournit les proportions de valeurs comprises dans des intervalles centrés sur la moyenne.

Paramètres	Loi de distribution	moyenne	Coefficient de variation
Limite élastique f_u (MPa)	normal	1130	10%
Déformation ultime ε_u	normal	0.5	10%
Vitesse du projectile (m/s)	normal	2130	10%
Inclinaison du projectile (°)	normal	39.9	10%

Tableau 5.1 : Variables aléatoires et loi de distribution des paramètres

9.7. CHOIX DE LA FONCTION D'ETAT LIMITE :

La notion de probabilité (mode) de défaillance est étroitement liée à la notion de fonction d'état limite(ou fonction de défaillance) G . Alors, si l'on désire estimer la probabilité de défaillance de notre talus, nous devons définir l'état limite au-delà duquel le système physique n'est plus considéré comme fiable (stable). Ces états limites correspondent principalement à des exigences en termes de tenue mécanique (la défaillance est associée à

la ruine du système étudié) ou d'aptitude au service (la défaillance est associée à des dépassements excessifs de la capacité).

Pour définir cette fonction d'état limite, nous devons considérer le comportement mécanique de notre plaque. Autrement dit, nous devons identifier tous les modes de rupture possibles. Pour chaque mode de rupture, il faudra définir une fonction d'état limite G .

$$G=R-S$$

Avec :

R : une caractéristique de résistance

S : une donnée relative à la sollicitation appliquée

Ainsi, en considérant le comportement mécanique de notre plaque, nous considérons qu'il y a rupture lorsque la plaque est perforée. Autrement dit, on considère la fonction suivante :

$$G= e-hp$$

Avec e : épaisseur de la plaque

hp : profondeur de pénétration

10. RESULTATS DE LA SIMULATION :

10.1. VARIABILITE DES PARAMETRES D'ENTREE :

Les paramètres d'entrée considérés comme variables aléatoires sont présentés dans le tableau 5.1. Les tirages obtenus de ces paramètres sont présentés dans les histogrammes qui suivent. Nous rappelons que les lois générées sont des lois normales avec une moyenne et un écart type.

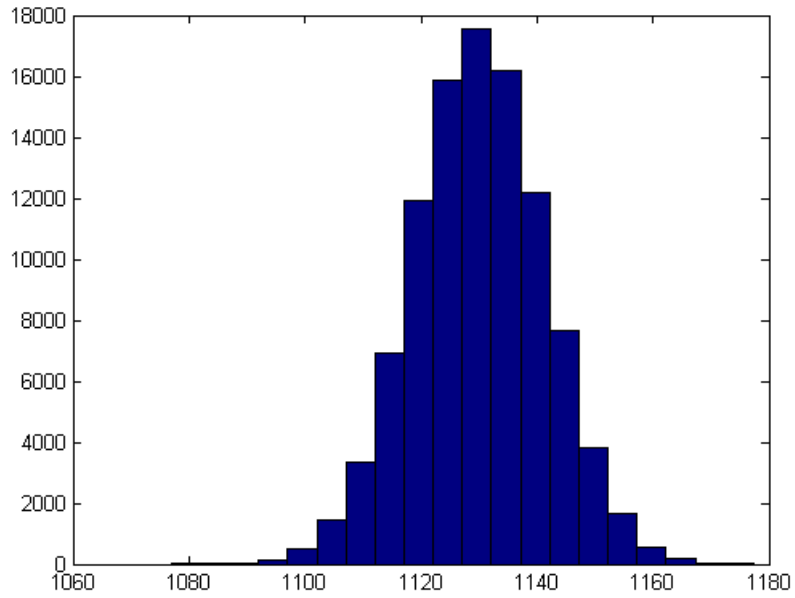


Figure 5.7 : Histogramme de la contrainte ultime du matériau

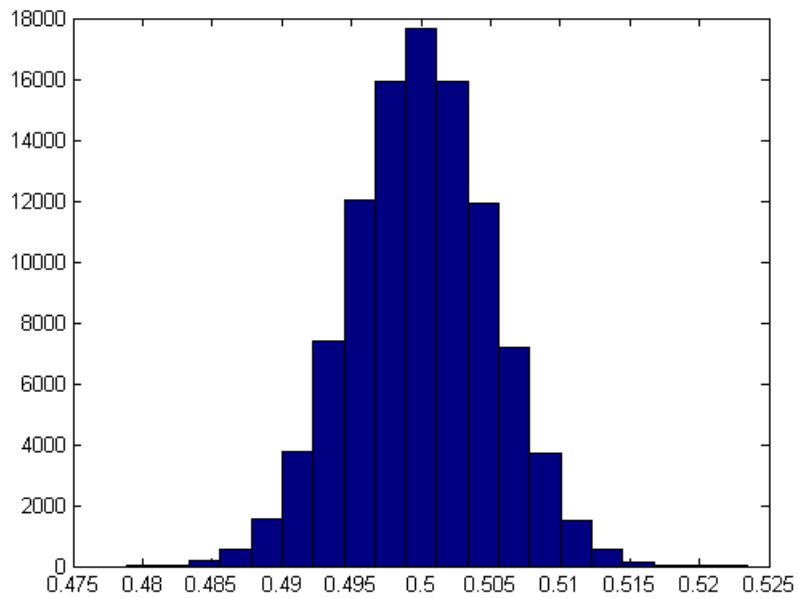


Figure 5.8 : Histogramme de la déformation ultime du matériau

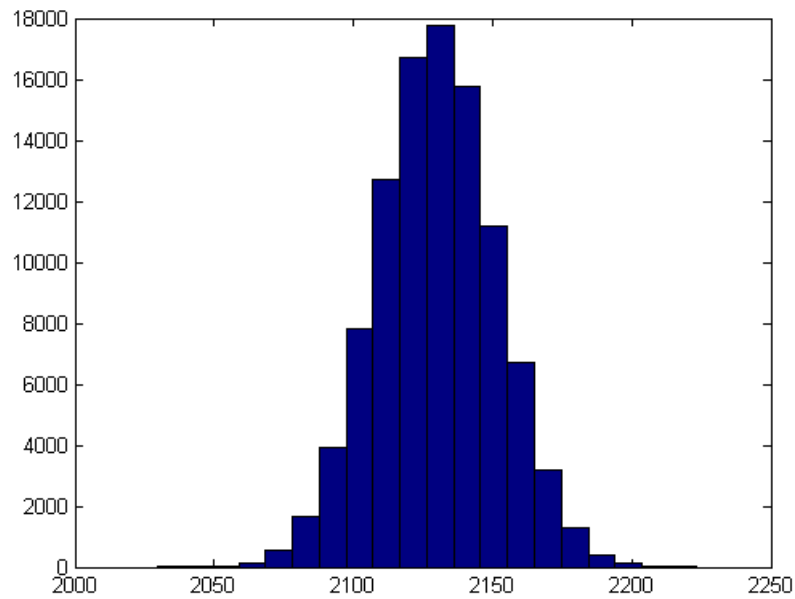


Figure 5.9 : Histogramme de la vitesse du projectile

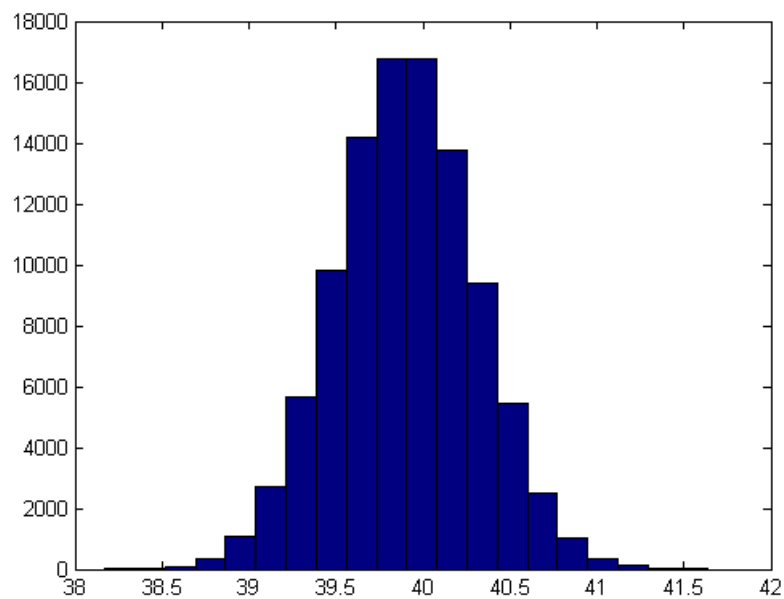


Figure 5.10 : Histogramme de l'angle d'inclinaison du projectile

10.2. VARIABILITE DES PARAMETRES DE SORTIE :

En considérant les lois de distribution des paramètres d'entrée, nous présentons dans ce qui suit, les résultats obtenus lors de la simulation de la profondeur de pénétrations.

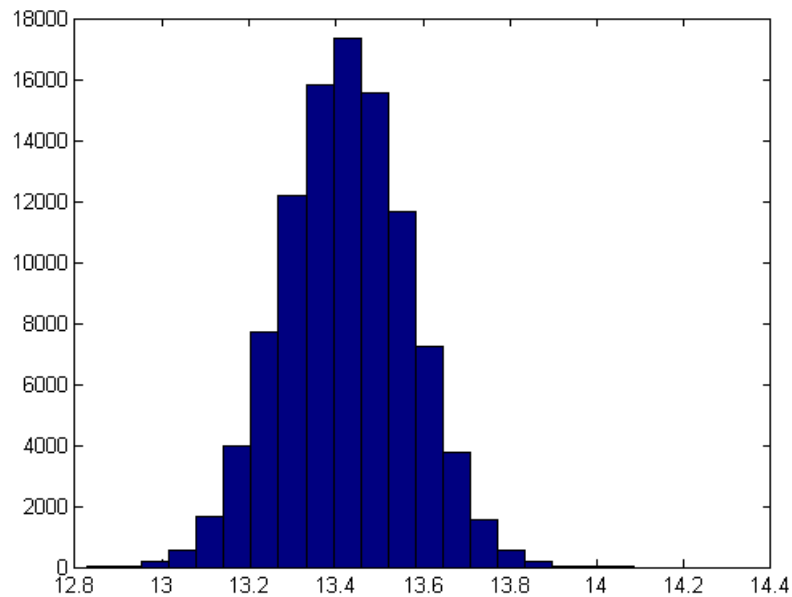


Figure 5.11 : Histogramme de la hauteur de pénétration du projectile

10.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE :

Vitesse m/s	Angle d'inclinaison					
	10°	20°	25°	30°	39.9°	45°
1500	1	1	0.0286	0	0	0
1700	1	1	1	0.5900	0	0
2000	1	1	1	1	0.0834	0
2130	1	1	1	1	0.9986	4. e-005

Tableau 5.2: Evolution de la probabilité de défaillance en fonction de la vitesse et de l'angle D'inclinaison

A partir des résultats du tableau 5.2, On remarque que plus l'angle d'inclinaison augmente plus la probabilité de défaillance tend vers une valeur 0.

Pour un même angle d'inclinaison et une augmentation de la vitesse, la probabilité de défaillance augmente et tend vers 1

10.4. ETUDE DE SENSIBILITE :

Afin d'estimer l'effet de chaque paramètre sur la probabilité de défaillance, nous présentons dans le tableau 5.3 suivant l'analyse de sensibilité.

Fu	Epsu	vitesse	angle	pf
1130	0.5	1500	25°	0.0281
1017	0.5	1500	25°	0.9804
1130	0.55	1500	25°	0.9807
1130	0.5	1650	25°	0
1130	0.5	1500	22.5°	0.9731

Tableau 5.3 : Etude de sensibilité par rapport à la moyenne

Dans ce tableau, nous avons fait varier les valeurs moyennes de 10%. Autrement dit, nous avons diminué les valeurs moyennes. Nous constatons que si fu et epsu diminue, la probabilité de défaillance augmente c'est à dire que ces paramètres sont des paramètres de résistance. Cependant, dans le cas de la vitesse et de l'angle de variation, le phénomène contraire se produit. En effet, la vitesse et l'angle d'inclinaison sont des paramètres de sollicitation.

Fu	Epsu	vitesse	angle	pf	Cv
1130	0.5	1500	25°	0.0281	10%
1130	0.5	1500	25°	0.1697	20%
1130	0.5	1500	25°	0.2638	30%

Tableau 5.4: Etude de sensibilité par rapport à l'écart type

Dans le tableau 5.4, nous avons représenté l'effet de la variabilité des paramètres à travers l'analyse de l'effet de l'écart type. Le résultat obtenu, confirme bien que lorsqu'on augmente la variabilité des paramètres la probabilité de défaillance augmente.

11. CONCLUSION :

A travers ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes à suivre pour obtenir les valeurs de la probabilité de défaillance d'une plaque soumise à un projectile. En effet, nous avons pu estimer pour une configuration donnée la probabilité de défaillance de la plaque en tenant compte des différentes variabilités.

CONCLUSION GENERALE

La gestion du risque constitue actuellement un thème de réflexion majeur. C'est pourquoi dans la cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés aux impacts de projectiles sur des plaques. Ces derniers sont souvent rencontrés dans la plupart des sites industriels qui abritent des équipements et des réservoirs sous pression qui pour des raisons diverses, ils peuvent être endommagés et même éclater. Cette explosion peut engendrer de nombreux projectiles.

La complexité du phénomène mécanique nous a poussés à considérer un modèle numérique simplifié d'un projectile sur une plaque élaboré sous Abaqus. Ce modèle nous a permis d'analyser le comportement de cette plaque en considérant différentes vitesses, différents angles d'inclinaison et différentes formes du projectile.

Afin de tenir compte de l'aspect aléatoire de ces phénomènes d'impact, nous avons mis en place un modèle probabiliste basé sur un modèle mécanique analytique sous matlab. Nous avons ainsi estimé par la méthode de Monté Carlo, la probabilité de défaillance de notre plaque en fonction de divers paramètres. Ajouter à cela nous avons réalisé une étude de sensibilité.

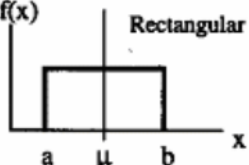
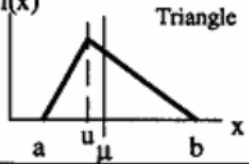
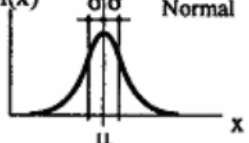
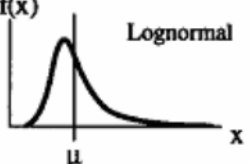
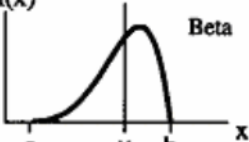
Nous tenons à préciser que l'objectif principal de notre démarche est d'arriver à mettre en place un couplage mécano fiabiliste direct. Autrement dit un couplage entre le modèle numérique et le modèle probabiliste. Ceci nous permettra d'aller vers une optimisation des structures basée fiabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Bertrand Maurel**, modélisation par la méthode sph de l'impact d'un réservoir rempli de fluide, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2008.
- [2] **CAGUETMI F** thèse de magister Urbanisation autour des sites industriels a Haute risque cas de Skikda université de Constantine, 2011.
- [3] **Dossier départementale**, sur les risques majeurs dans les alpes de haut-Provence Novembre, 2008.
- [4] **Dossier d'information**, le risque industriel, le ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable (France), 2007.
- [5] **Duy-Hung Duong**, Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, 2012.
- [6] **DAVID Pierre**, mangement des risques industriels, rapport, Grenoble, 2011.
- [7] **Damien Lamalle**, Simulations aux Grandes Echelles de panaches libre et impactant l'Université de Lyon, 2014.
- [8] **Document ABAQUS V6.14** 'logiciel de calcul numérique'.
- [9] **DEHMOUS Hocine**, Fiabilité et micromécanique des matériaux composites Application à la passerelle de Laroin, Institut National Polytechnique de Toulouse Ecole doctorale Matériaux - Structure – Mécanique,2007.
- [10] **Eibl, J**, "Soft and Hard Impact. Concrete for Hazard Protection", Edinburgh,UK: s.n (1987).
- [11] **GLEYZE J F**, le risque, institut géographique national laboratoire cogit, 2002.
- [12] **GROUPE DE TRAVAIL SECTORIEL « GPL »**, Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie, LE BLEVE, 2006.
- [13] **Help Abaqus analysis user's manual *19*** Inelastic Mechanical Properties * 19.6.3 *(Concrete damaged plasticity).
- [14] **Jessica ROUSSEAU**, «Modélisation numérique du comportement dynamique des structures sous impact sévère avec un couplage éléments discrets / éléments finis» thèse de doctorat, 2009.
- [15] **Johnson J & Cook W**, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", S.I. : Engineering Fracture Mechanics 21, 31 -48, 1985.
- [16] **Kokouvi Mawuli KPENYIGBA**, Etude du comportement dynamique et modélisation Thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE, 2013.

- [17] **KLOSAK Maciek** simulation numérique de la localisation plastique dans les aciers martensitiques charge par impacte, Université METZ ,1999.
- [18] **Kœchlin P & Potapov S**, Classification of soft and hard impacts- Application to aircraft crash, S.I.: Nuclear Engineering and Design 239, 2009.
- [19] **Levi, R.** Calculs probabilistes de la sécurité des constructions, Annales des Ponts et Chaussées 26, 1949.
- [20] **Laurent Daudeville, Philippe Berthet-Rambaud, Jacky Mazars, Pascal Perrotin, Michel Mommessin, Jean-Pierre Mouglin.** Effet de cumul de l'endommagement de structures en béton armé soumises à des chutes répétitives de blocs rocheux. Programme de recherche financé par le Conseil Général de l'Isère
- [21] **Lemaire M.**, Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique, Ed. Hermès-Lavoisier, Paris, 2005.
- [22] **Lyonnet P.**, Ingénierie de la fiabilité, Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 2006.
- [23] **MAHMADI Kamel**, modélisation des phénomènes d'ondes explosives université de Lille, 2006.
- [24] **Madsen, H.O., S. Krenk and N.C. Lind**, Methods of structural safety, Dover Publications, 1986.
- [25] **Mickael ABBAS**, présentation du logiciel ABAQUS Principe et fonctionnement Université de Technologie de Compiègne Laboratoire Roberval/ UMR UTC-CNRS.
- [26] **O.D. Ditlevsen et H.O. Madsen**, Structural Reliability Methods. John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [27] **Pierre ROUX, Brigitte NEDELEC, Charlotte BOUISSOU, Candice LAGNY** Méthologie de sélection des sites de stockage du CO2 dans les réservoirs souterrains en France, 2009.
- [28] **Q. B. Nguyen** Fiabilité des installations industriels sous impact de fragments de structure- Effet Domino, Université de PARIS-EST ,2009.
- [29] **TRELAT Sophie**, impacte des fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle Université d'ORLEANS, 2006.
- [30] **Xuan Dung Vu.** Vulnérabilité des dalles en béton sous impact caractérisation, modélisation et validation Université de Grenoble, 2013.

ANNEXE I

 <p>Rectangular</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{a+b}{2}$ $\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$	$a \leq x \leq b$ $f(x) = \frac{1}{b-a}$ $F(x) = \frac{x-a}{b-a}$	
 <p>Triangle</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{1}{3}(a+b+u)$ $\sigma = \sqrt{\frac{1}{18}(a^2+b^2+u^2-ab-au-bu)}$	$a \leq x \leq u$ $f(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{u-a} \right)$ $F(x) = \frac{x^2-2ax+a^2}{(b-a)(u-a)}$	$u \leq x \leq b$ $f(x) = \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-u} \right)$ $F(x) = 1 - \frac{x^2-2bx+b^2}{(b-a)(b-u)}$
 <p>Normal</p>	$-\infty < \mu < +\infty$ $\sigma > 0$ μ σ	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$ $F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx$	
 <p>Lognormal</p>	λ, ζ $\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$ $\sigma = \mu \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$	$f(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$ $F(x) = \int_0^x \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right) dx$	
 <p>Beta</p>	$-\infty < a < b < +\infty$ $r, s \geq 1$ $\mu = a + (b-a) \cdot \frac{r}{r+s}$ $\sigma = \frac{b-a}{r+s} \cdot \sqrt{\frac{r \cdot s}{r+s+1}}$	$f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}$ $F(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r) \cdot \Gamma(s)} \cdot \int_a^x \frac{(u-a)^{r-1} (b-u)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}} du$	

Loi de probabilité utilisée en mécanique