



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Prévention et Intervention

Thème

Prévention Intervention Contre les Risques Nucléaires

Présenté et soutenu publiquement par :

HARMOUCHE Maamar

HAMAIMI Oussama

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
SERRAT Zahira	MCB	Université d'Oran 2	Président
MECHKEN Amel	MCB	Université d'Oran 2	Encadreur
TALBI Zahira	MCB	Université d'Oran 2	Examineur

Résumé

Résumé :

Ce mémoire de fin d'études explore la prévention et l'intervention face aux risques nucléaires. À travers quatre chapitres, il aborde les principes de la radioactivité, le fonctionnement des réacteurs nucléaires, les effets des radiations sur la santé humaine, et présente une étude de cas pratique sur l'entreprise CRNB. L'analyse met en lumière l'importance des systèmes de contrôle, de la prévention et des protocoles d'urgence pour gérer efficacement les risques nucléaires.

Abstract:

This thesis explores the prevention and intervention against nuclear risks. Through four chapters, it discusses the principles of radioactivity, the operation of nuclear reactors, the effects of radiation on human health, and presents a practical case study on the CRNB company. The analysis highlights the importance of control systems, prevention measures, and emergency protocols to effectively manage nuclear risks.

ملخص:

يتناول هذا البحث موضوع الوقاية والتدخل في مواجهة المخاطر النووية. من خلال أربعة فصول، يتطرق إلى مبادئ النشاط الإشعاعي، عمل المفاعلات النووية، تأثير الإشعاعات على صحة الإنسان، ويعرض دراسة حالة تسلط التحليلات الضوء على أهمية أنظمة التحكم، التدابير الوقائية، والبروتوكولات CRNB. عملية لمؤسسة الطارئة لإدارة المخاطر النووية بشكل فعال

Remerciements

Avant de présenter les résultats de ce travail, qu'il me soit permis de remercier tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation :

Je remercie avant tout Le dieu tout puissant, de m'avoir guidé durant toutes les années d'étude et m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrante Dr. Mechken amal pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Je remercie également mes professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont prodigué au cours de ces cinq années passées à l'institut de maintenance et de sécurité industrielle (IMSI).

Et enfin nous sommes très reconnaissants de l'aide et des conseils de tout ce qui ont contribué directement et indirectement durant

Harmouche Maamar ϕ Hamaimi Oussama



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A l'âme de mon père

A ma chère mère

*Pour son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils,
pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail
aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

Mes frères et sœurs

*Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage
et de générosité, qu'Allah vous protège*

Liste des abréviations

REP : Réacteurs à Eau Pressurisée

REB : Réacteurs à Eau Bouillante

AIEA : l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique

GV : Générateur de Vapeur

ASSN : Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire

COMENA : Commissariat à l'énergie atomique

PUI : Le plan d'urgence interne

PPI : Plan Particulier d'Intervention

HEPA : High-Efficiency Particulate Air

EPI : Équipements de Protection Individuelle

ARA : Appareils respiratoires autonomes

REX : Retour d'Expérience

ZPI : Zone de Protection Immédiate

ZPE : Zone de Protection Etendue

ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile

ADN : Acide Désoxyribonucléique

SIA : Syndrome d'irradiation aiguë

TLE : Transfert linéique d'énergie

CIPR : Commissions internationales de protection radiologique

CRNB : Centre de Recherche Nucléaire de Birine

APR : Analyse préliminaire des risques

Liste des figures :**Chapitre I**

Figure I.1 : Structure de l'atome.....	5
Figure I.2 : Stabilité des noyaux.....	6
Figure I.3 : Courbe de stabilité selon les valeurs moyennes d'énergie	7
Figure I.04 : La désintégration alpha de l'uranium-238.....	10
Figure I.05 : Désintégration bêta du noyau C-14.	11
Figure I.06 : Désintégration bêta du noyau Be -7.....	12
Figure I.07 : Désintégration gamma du noyau Tc-99.....	14
Figure I.08 : Production des rayons – X.....	15
Figure I.09 : Le principe de la réaction en chaîne avec la fission d'un noyau d'uranium 235.....	18
Figure I.10 : La pénétration des rayonnements dans la matière	19

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée	29
Figure II.2 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau bouillante	30
Figure II.3 : Échelle internationale des événements nucléaires.....	34
Figure II.4 : Les trois barrières de sécurité.....	38
Figure II.5 : Combinaisons anti-radiations	42
Figure II.6 : Appareils respiratoires autonomes (ARA)	43
Figure II.7 : Dosimètre passif.....	44
Figure II.8 : Dosimètre actif	44
Figure II.9 : Panneaux de danger Panneau Zone surveillée	45
Figure II.10 : Panneaux de danger zone contrôlée verte	45
Figure II.11 : Panneaux de danger zone contrôlée jaune.....	46
Figure II.12 : Panneaux de danger zone contrôlée rouge	47

Chapitre III

Figure III.1 : Risque d'Irradiation	62
Figure III.2 : Risque de Contamination interne et externe	63
Figure III.3 - Les effets aléatoires en fonction de la dose	70

Chapitre IV

Figure IV.1 : Situation Géographique de CRNB.....	76
---	----

SOMMAIRE

.1.Introduction	4
I.2.De l'atome à la radioactivité	4
I.3. Stabilité des noyaux	5
I.4. La radioactivité	7
I.4.1. La radioactivité naturelle :	8
I.4.2. La radioactivité artificielle :	8
I.5. Les rayonnements ionisants :	9
I.5.1. La radioactivité alpha (α) :	9
I.5.2. La radiation bêta (β) :	10
I.5.2.1. Types de désintégration bêta :	10
I.5.2.1.1. Désintégration bêta moins (β^-) :	10
I.5.2.1.2. La désintégration bêta (β^+) :	11
I.5.3. Le rayonnement gamma (γ) :	12
I.5.4. Le rayonnement X :A.....	14
I.5.5. Le rayonnement neutronique :	15
I.6. Fission nucléaire	17
I.6.1. Processus de Fission Nucléaire	17
I.6.2. Réaction en Chaîne	17
I.7. La pénétration des rayonnements dans la matière.....	18
I.7.1. Particules alpha	18
I.7.2. Particules bêta moins (électrons)	18
I.7.3. Rayonnements X et gamma	19
I.8. Les différents types de rayonnements ionisants et leurs caractéristiques	20
I.9. Conclusion :	22

Chqpitre II

II.1. Introduction.....	24
II.2. Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire:.....	24
II.2. 1. Définition et constitution	24
II.2. 3. Chaîne énergétique.....	26
II.2. 4. Les différentes filières	27

II.2. 4.1. La filière à eau « ordinaire » ou « légère » et à uranium enrichi en U235	27
II.2. 4.2. La filière à eau lourde et à uranium naturel.....	27
II.2. 4.3. La filière à neutrons rapides et à combustible plutonium et uranium naturel	27
II.2.5. Fonctionnement des centrales nucléaires.....	28
II.2.5.1. La filière à eau « ordinaire » ou « légère »	28
II.2.5.2. Les Réacteurs à Eau Bouillante (REB)	29
II.2.5.3. La filière à eau lourde	30
II.2.5.4. La filière à neutrons rapides : Les réacteurs à neutrons rapides	30
II.6. Les principaux types d'accidents et leur Conséquences.....	31
II.6.1. Les différents types d'accidents.....	31
II.6.1.1. Les accidents de contamination.....	31
II.6.1.2. Les accidents d'irradiation.....	31
II.6.2. L'accident grave dans une centrale électronucléaire et ses conséquences pour l'environnement.....	32
II.6.3. L'indicateur de gravité des accidents nucléaires : l'échelle INES	33
II.6.3.1. Description.....	33
II.6.3.2. Niveaux de l'échelle :	33
II.7. La prévention des accidents.....	34
II.7.1. La réglementation des installations nucléaires en Algérie	34
II.7.2. Cadre juridique général	34
II.7.3. Autorités de réglementation.....	35
II.7.3.1. Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN)	35
II.7.3.2. Commissariat à l'énergie atomique (COMENA)	35
II.7.4. Les principes de sûreté au niveau de centrale nucléaire :.....	36
II.7.4.1. Sécurité approfondie	36
II.7.4.2. Les barrières de Sécurité	38
II.7.5. Moyen de protection contre d'exposition aux rayonnements :.....	38
II.7.5.1. Protection collective :	39
II.7.5.1.1. Systèmes de Ventilation et de Filtration.....	39
II.7.5.1.2. Réseau d'Incendie :	39
II.7.5.1.3. Système de Détection et d'Alarme Incendie	40

II.7.5.1.4. Système de Clapet Anti-incendie.....	40
II.7.5.1.5. Les dosimètres de zone :	40
II.7.5.1.6. Douche et lavabo	40
II.7.5.1.7. Limitation du temps d'exposition	40
II.7.5.1.8. Distance (Éloignement).....	41
II.7.5.1.9. Blindage (Les écrans).....	41
II.7.5.2. Équipements de Protection Individuelle (EPI).....	41
II.7.5.2.1. Combinaisons de protection	42
II.7.5.2.2. Protection respiratoire.....	42
II.7.5.2.3. Dosimètres individuels	43
II.8. Surveillance et contrôle des zones de travail	44
II.8.1. Classification des zones de travail :	44
II.8.1.1. Zones contrôlées	44
II.8.1.2. Zones surveillées	44
II.8.1.3. Zone contrôlée verte :	45
II.8.1.4. Zones contrôlées à accès spécialement Réglementé	45
II.8.1.5. Zone jaune présente les caractéristiques suivantes :	46
II.8.1.6. Zone rouge (ou interdite) :	47
II.8.2. Classification des travailleurs aux différentes catégories :	47
II.8.2.1. Les limites d'exposition fixées pour les travailleurs de catégorie A.....	48
II.8.2.2. Les limites d'exposition fixées pour les travailleurs de catégorie B	48
II.9. L'organisation des secours	48
II.9.1. Le plan d'urgence interne (PUI) :	48
II.9.1.1. Structure et Contenu du PUI.....	48
II.9.1.1.1. Identification des Scénarios d'Acciden.....	48
II.9.1.1.2. Organisation des Interventions.....	49
II.9.1.1.3. Procédures d'Urgence	49
II.9.1.1.4. Moyens Techniques	50
II.9.1.1.5. Coordination avec les Autorités Externes	50
II.9.1.1.6. Plan de Communication.....	50
II.9.1.1.7. Exercices et Simulations.....	51

II.9.1.1.8. Retour d'Expérience (REX)	51
II.9.2. Le plan particulier d'intervention (PPI)	51
II.9.2.1.1. Identification des Scénarios d'Accidents Majeurs	51
II.9.2.1.2. Zone d'intervention	52
II.9.2.1.3. Coordination des Acteurs	52
II.9.2.1.4. Mesures de Protection de la Population	52
II.9.2.1.5. Formation et Exercices	53
II.9.3. Le plan ORSEC	53
II.9.3.1. Structure du Plan ORSEC Nucléaire	53
II.9.3.2. Phases du Plan ORSEC	54
II.9.3.3. Acteurs impliqués dans le Plan ORSEC	55
II.10. L'information de la population	55
II.10.1. Les documents d'information	55
II.10.2. L'information en temps normal	56
II.10.3. L'information en cas de crise	56
II.10.4. Les consignes à appliquer	57
II.10.4.1. Le confinement	57
II.10.4.2. L'absorption de pastille d'iode	57
II.10.5. L'indemnisation	57
II.10.6. Conclusion	58

Chapitre III

III.1. Introduction	61
III.2. Le phénomène	61
III.3 Risque d'Irradiation	61
III.4. Risque de Contamination	62
III.5. Dose absorbée et débit de dose absorbée :	63
III.6. Transfert linéique d'énergie	64
III.7. Groupes de radiotoxicité	65
III.7.1. Classification des Groupes de Radiotoxicité	66
III.7.2. Groupe 1 : Très forte radiotoxicité	66
III.7.3. Groupe 2: Forte radiotoxicité	66

III.7.4. Groupe 3 : Moyenne radiotoxicité.....	67
III.7.5. Groupe 4 : Faible radiotoxicité.....	67
III.8. Effets biologiques des rayonnements :	67
III.8.1. Effets aux niveaux moléculaire	67
III.8.2. Effet au niveau cellulaire :	68
III.8.3. Effets sur l'homme	69
III.8.4. Effets cancérogènes	70
III.8.5. Facteurs influençant la fréquence des cancers radio-induits	71
III.8.6. Effets génétiques	72
III.8.7. Effets tératogènes	72
III.9. Conclusion.....	
IV.1. Introduction	75
IV.2. Présentation de l'entreprise (Centre de Recherche Nucléaire de Birine):	75
IV.2.1. Mission de entreprise :	75
IV.2.2. Situation Géographique :	76
IV.2.3. Répartition des différent sites du CRNB :.....	76
IV.2.4. Organigramme fonctionnel du CRNB :	77
IV.2.4.1. Divisions réacteurs :	77
IV.2.4.2. Division des Techniques et Applications Nucléaires :	77
IV.2.4.3. Division Sûreté et Radioprotection Nucléaires :	77
IV.2.4.4. Division de Technologie Nucléaire :	78
IV.2.4.5. Division des Services Techniques Spécialisés :	78
IV.2.5. Service De Sécurité Industrielle :	78
IV.2.5.1. La sécurité du travail dans le centre :	78
IV.2.5.2. L'effectif du service de sécurité industrielle est composé de :	79
IV.2.5.3. Organigramme du service sécurité industrielle	79
IV.2.5.4. Groupe de contrôle d'accès et surveillance :	80
IV.2.5.4.1. Groupe de prévention et d'inspection :	80
IV.2.5.4.2. Groupe d'intervention et secours :	80
IV.3. Présentation de la méthode APR (L'analyse Préliminaires des Risque) :	81
IV.3.1. Analyse préliminaire des risques :	81

IV.3.2. Accidents potentiels/ sources d'agression possibles d'origine interne et externe	81
IV.3.3. Présentation de la démarche	81
IV.3.4. Présentation de la grille d'analyse des risques :.....	81
IV.3.4.1. Identifier les dangers:	82
IV.3.4.2. Estimer les risques :	82
IV.3.4.3 Mesures de prévention:	83
IV.3.5. Matrice d'estimation des risques :	83
IV.3.6. Tableau d 'analyse préliminaire des risques au niveau de centre nucléaire :.....	83
IV.3.7. Conclusion.....	90
CONCLUSION GENERALE	92

Introduction Générale

La question de la sûreté nucléaire est devenue, au fil des décennies, un enjeu majeur dans les discussions sur l'énergie, l'environnement, et la sécurité publique. L'utilisation de l'énergie nucléaire, que ce soit à des fins civiles ou militaires, présente à la fois des avantages et des risques potentiels. Si cette source d'énergie contribue de manière significative à la production mondiale d'électricité, elle n'en reste pas moins entourée d'une aura de méfiance, notamment en raison des accidents nucléaires historiques et des défis posés par la gestion des déchets radioactifs. La prévention et l'intervention en cas de risques nucléaires sont des composantes essentielles pour garantir une utilisation sécurisée et responsable de cette technologie. La radioactivité, phénomène naturel au cœur de l'énergie nucléaire, présente des dangers spécifiques nécessitant une compréhension approfondie et des stratégies de gestion adaptées. De ce fait, la maîtrise des risques nucléaires requiert à la fois des connaissances scientifiques précises et des mesures de contrôle strictes, tant au niveau des installations que dans les interventions en situation de crise. Ce mémoire a pour objectif de proposer une analyse détaillée des risques nucléaires et d'examiner les moyens de prévention et d'intervention qui peuvent être mis en œuvre pour minimiser ces dangers. Après une introduction aux notions fondamentales de la radioactivité et à son impact sur les systèmes biologiques et environnementaux, une analyse approfondie des risques liés aux activités nucléaires sera menée. Par la suite, les différentes mesures de prévention, tant techniques que réglementaires, seront discutées avant de conclure par une évaluation des moyens d'intervention en cas d'incidents ou d'accidents nucléaires. Ainsi, ce travail se structure autour de quatre chapitres principaux :

Généralité sur la radioactivité, une exploration des bases scientifiques du phénomène radioactif et de ses effets.

Analyse des risques nucléaires, une évaluation des dangers potentiels associés aux installations et activités nucléaires.

Mesures de prévention des risques nucléaires – un examen des dispositifs et pratiques visant à prévenir les accidents et à sécuriser les installations.

Moyens d'intervention en cas de risques nucléaires – une analyse des outils et des stratégies d'intervention à mettre en œuvre en cas de crise.

Ce mémoire ambitionne de fournir une vue d'ensemble sur la manière dont les risques nucléaires peuvent être gérés efficacement, en combinant prévention et intervention pour assurer la sécurité des populations et de l'environnement.

Chapitre I

Radioactivité et Réactions nucléaires

I.1.Introduction :

Depuis l'Antiquité, l'homme cherche à comprendre la matière qui compose l'univers. Des philosophes aux scientifiques modernes, des découvertes révolutionnaires ont marqué notre compréhension de l'atome et de ses phénomènes. Cette introduction explore les concepts clés de la physique nucléaire, de la naissance des idées sur l'atome à la découverte de la radioactivité et des rayonnements ionisants.

I.2.De l'atome à la radioactivité

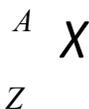
L'atome est la plus petite particule qui garde encore les propriétés de l'élément. Il est assimilé à une sphère de rayon $\approx 10^{-10}$ m, formée par un noyau et son cortège électronique, constitué de différentes particules élémentaires, dont trois principales : le proton, le neutron et l'électron.

Tableau 1 : Structure de l'atome

	Nuage électronique	Noyau	
Constituant	Electron	Proton	Neutron
Charge (C)	$q_{e^-} = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C	$q_p = -q_{e^-} = +1,6 \cdot 10^{-19}$ C	$q_n = 0$ C
Masse (g)	$m = 9,1091 \cdot 10^{-27}$ g	$m = 1,6726 \cdot 10^{-24}$ g	$m = 1,6748 \cdot 10^{-24}$ g
Masse (u.m.a)	$m = 5,5 \cdot 10^{-4}$ u.m.a	$m = 1,007$ u.m.a	$m = 1,008$ u.m.a

Avec (u.m.a) : unité de masse atomique :

Le noyau peut être assimilé à une sphère de rayon $\approx 10^{-15}$ m. On constate que le rayon du noyau est $\approx 10^{-5}$ fois plus petite que celui de l'atome, ce qui signifie que le volume du noyau est 10^{15} fois plus petit que le volume de l'atome et que la quasi-totalité de la masse d'un atome est dans son noyau. La notation d'un noyau est :



Avec :

- X : Symbole de l'élément chimique correspondant à ce noyau
- A : Nombre de masses du noyau, c'est le nombre total de nucléon (composants du noyau, indifféremment protons et neutrons) dans le noyau.
- Z : Nombre de charges du noyau (ou nombre de protons du noyau).
- $N = A - Z$: Nombre de neutrons du noyau

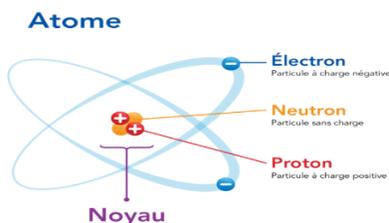


Figure 1 : Structure de l'atome

On appelle :

- Nucléide, un ensemble de noyaux identiques (même A, même Z donc même N).

Exemple : le nucléide ^{12}C

- Isotopes, des noyaux de même Z mais de A différent (c à d N différents).
- Isotones, des noyaux de même N, mais de A et Z différents
- Isobares, des noyaux de même A, mais de Z différents

I.3. Stabilité des noyaux

Un noyau est qualifié de stable s'il ne possède pas une tendance à se transformer, ou encore si ses nombres A et Z ne changent pas au cours du temps. Si le noyau se transforme au cours du temps, il est qualifié de radioactif. On parle de radioactivité naturelle si le noyau sujet de la radioactivité est naturel, si au contraire le noyau est le résultat d'une fabrication par l'homme (exemple : les transuraniens), on parle alors de radioactivité artificielle. Sur les 350 nucléides naturels, une

soixantaine est instable. Par contre tous les nucléides artificiels sont radioactifs.

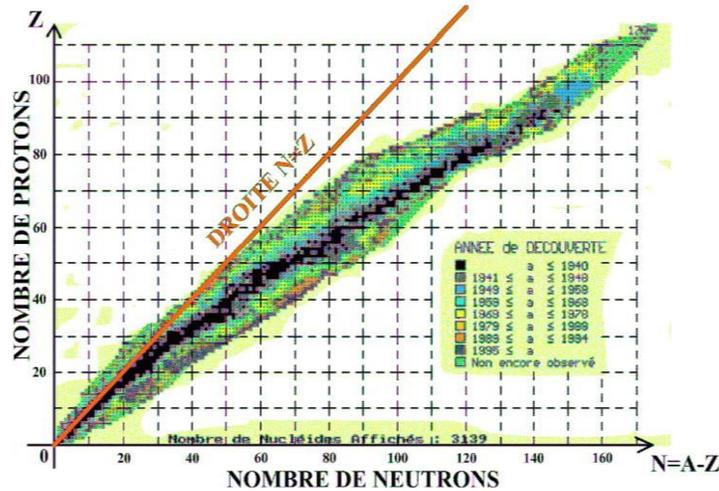


Figure 2 : Stabilité des noyaux

La figure ci-dessus montre que :

- Pour les noyaux légers ($Z < 20$) il y a une tendance à l'égalité du nombre de neutrons et du nombre de protons.
- A partir de $Z > 20$: la répulsion électrostatique des protons est contrecarrée par une « dilution » des protons dans des neutrons en nombre de plus en plus élevé.

La stabilité des noyaux pourrait être montrée par le graphe de l'énergie de cohésion des noyaux existants en fonction de leur nombre de masse, mais, dans cette représentation, un noyau léger aura forcément une énergie globale de cohésion plus faible qu'un noyau lourd, alors qu'il n'est pas prouvé qu'un noyau léger soit forcément moins stable qu'un noyau lourd. C'est pour cette raison qu'ASTON eut l'idée d'introduire l'énergie moyenne de cohésion par nucléon :

$$\langle E \rangle = \frac{E}{A}$$

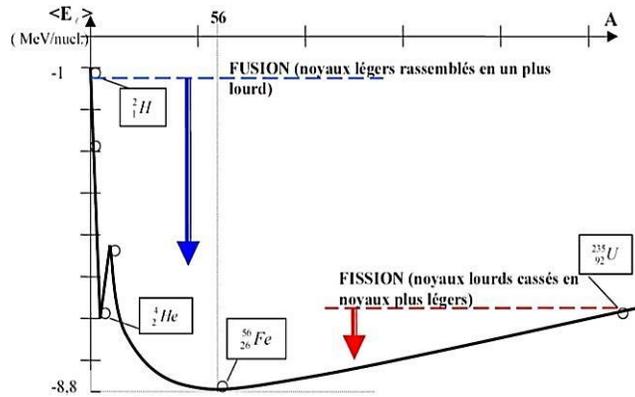


Figure 3 : Courbe de stabilité selon les valeurs moyennes d'énergie

La courbe ci-dessus présente un minimum très aplati qui correspond aux nucléides les plus stables $50 < A < 75$, le minimum est pour le fer (${}^{56}_{26}\text{Fe}$). Il faut en moyenne 8 MeV pour arracher un nucléon d'un noyau (alors que quelques eV suffisent à enlever un électron de son cortège électronique). Cette courbe permet aussi de comprendre les deux possibilités de production d'énergie à partir de réactions nucléaires. (Figure 3) [1]

I.4. La radioactivité

La radioactivité est un phénomène physique de stabilisation de noyaux atomiques instables (Dits radionucléides), au cours duquel, à tout instant, une fraction fixe et caractéristique des Noyaux présents se transforme spontanément en d'autres noyaux (désintégration), en Émettant simultanément des particules matérielles (électron, noyau d'hélium, positon...) et De l'énergie (cinétique et électromagnétique (photons)).

La radioactivité a été découverte en 1896 par Henri Becquerel qui a découvert que certaines Substances émettent spontanément des rayonnements capables de traverser la matière. On distingue deux types de radioactivité :

I.4.1. La radioactivité naturelle :

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atome sont stables. Cependant, certains spontanément et d'autres noyaux d'atomes radioactifs ou non. Il existe deux grands groupes de radionucléides naturels :

- Des radionucléides d'origine cosmique ou « cosmonucléides » qui se forment par l'action des rayons cosmiques sur des noyaux d'atomes présents dans notre environnement ; ils sont parfois appelés « radionucléides naturels induits »
- Des radionucléides dits « primordiaux », qui étaient présents au moment de la formation de la terre et que l'on trouve aujourd'hui encore dans l'écorce terrestre. Les radionucléides primordiaux répertoriés au nombre d'une trentaine ont des périodes supérieures à 700 millions d'années et sont peu instables : il leur suffit d'une seule désintégration pour se transformer en noyaux stables. Mais trois d'entre eux ont un comportement particulier, il s'agit de l'Uranium 238, de l'Uranium 235 et du Thorium 232. Ces trois nucléides primordiaux, beaucoup plus lourds que les autres, nécessitent une longue série de désintégration avant d'aboutir à un noyau stable qui, dans les trois cas, est un isotope de Plomb

✓ Ces trois radionucléides peuvent être trouvés en traces dans plusieurs minerais (le phosphate par exemple).

I.4.2. La radioactivité artificielle :

Les radionucléides produits par l'homme ont la particularité essentielle d'avoir été introduits brutalement, à l'échelle du globe, par les essais nucléaires dans l'atmosphère ou à l'échelle locale lors des opérations du cycle du combustible des centrales nucléaires.

Les radionucléides artificiels font contaminer l'environnement, les principales causes de cette contamination sont :

- ❖ Les retombées des essais militaires atmosphériques ont libéré des produits de fission en majorité du ^{137}Cs ainsi que les isotopes du Plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu). Ces retombées ont engendré une contamination chronique de l'environnement notamment en ^{137}Cs , qui continue à persister actuellement.
- ❖ Les retombées dues à l'accident de Tchernobyl.
- ❖ Les activités utilisant ou produisant des radionucléides artificiels pour la médecine, l'industrie, la recherche (sources scellées et non scellées).[2]

I.5. Les rayonnements ionisants :

Les rayonnements ionisants, formes d'énergie libérées par les atomes, se propagent sous forme d'ondes électromagnétiques (rayons gamma ou X) ou de particules (neutrons, particules bêta ou alpha). Cette émission d'énergie, résultat de la désintégration spontanée des atomes, est appelée radioactivité. Les éléments instables subissant ce processus et émettant ces rayonnements sont nommés radionucléides.

Chaque radionucléide se distingue par le type de rayonnement émis, son énergie et sa demi-vie. L'activité, mesure de la quantité de radionucléides présents, s'exprime en becquerels (Bq) : 1 Bq correspond à une désintégration par seconde. La demi-vie, quant à elle, représente le temps nécessaire pour que la moitié des atomes d'un échantillon radioactif se désintègrent, réduisant ainsi de moitié son activité initiale. Cette valeur varie considérablement, allant d'une fraction de seconde à des millions d'années (par exemple, 8 jours pour l'iode 131 et 5 730 ans pour le carbone 14). [3]

I.5.1. La radioactivité alpha (α) :

La désintégration alpha, une forme de désintégration radioactive, se produit lorsqu'un noyau atomique instable se débarrasse d'une particule alpha, la transformant ainsi en un nouvel élément. Cette particule alpha, symbolisée par la lettre grecque α (alpha), n'est autre que le noyau d'un atome d'hélium-4, composé de deux protons et de deux neutrons.

Lors de ce processus, le noyau parent perd deux protons et deux neutrons, réduisant son numéro atomique de 2 et son nombre de masse de 4. Par exemple, la désintégration alpha de l'uranium-238 (U-238) donne naissance au thorium-234 (Th-234) : [4]

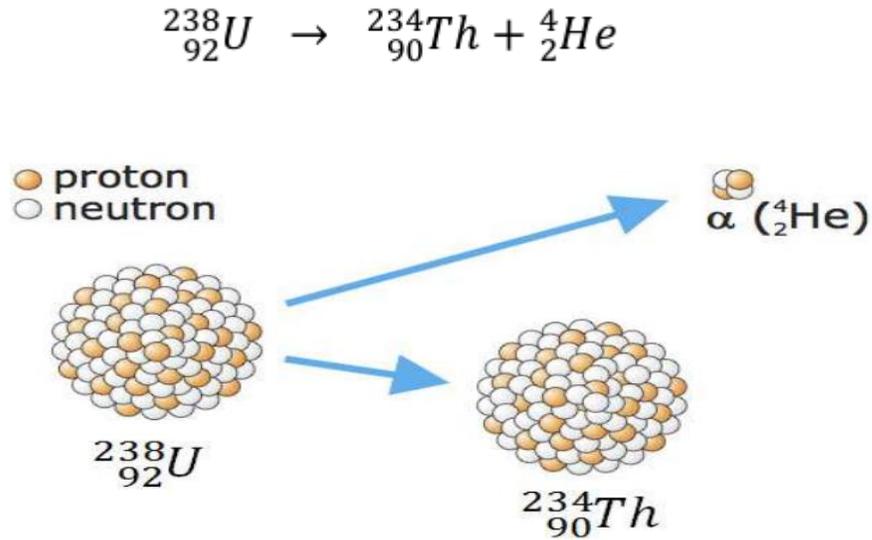


Figure 04 : La désintégration alpha de l'uranium-238

I.5.2. La radiation bêta (β) :

La radiation bêta, une autre forme de désintégration radioactive, se manifeste par l'émission d'un électron ou d'un positron, des particules élémentaires de taille et de masse identiques à l'électron, mais avec une charge opposée.

Lorsqu'un noyau atomique instable subit une désintégration bêta, il se transforme en un nouvel élément en émettant une particule bêta et en modifiant son nombre de protons ou de neutrons.

I.5.2.1. Types de désintégration bêta :

I.5.2.1.1. Désintégration bêta moins (β^-) :

La désintégration bêta moins (β^-) est un processus fascinant qui se produit au cœur des noyaux atomiques instables. Au cours de ce processus, un neutron se transforme en un proton, libérant un électron et un antineutrino électronique. Cette transformation entraîne une augmentation du nombre atomique de l'élément parent de 1, tandis que son nombre de masse reste inchangé. Par exemple, la désintégration du carbone-14 (^{14}C) en azote-14 (^{14}N) :

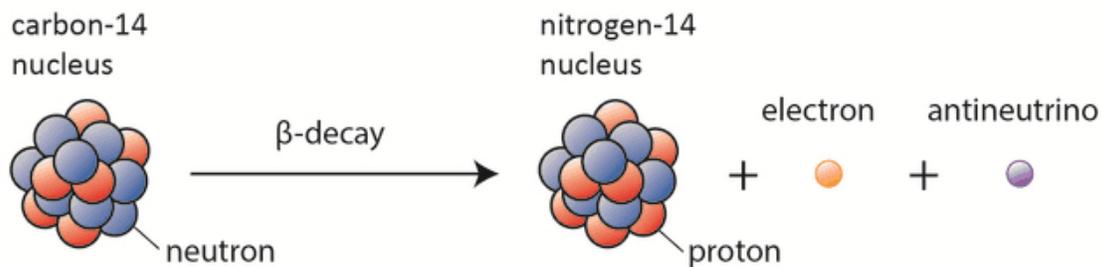
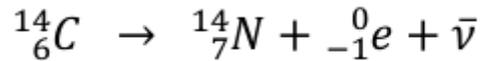


Figure 05 : Désintégration bêta du noyau C-14.

1.5.2.1.2. La désintégration bêta (β^+) :

La désintégration bêta plus, aussi appelée radioactivité bêta positive, survient dans les noyaux atomiques qui présentent un surplus de protons. Pour se stabiliser, le noyau se débarrasse de ce proton excédentaire en le transformant en un neutron. Ce processus implique plusieurs étapes fascinantes:

1. Transformation d'un proton en neutron : Au cœur du noyau, un proton se transforme en un neutron. Cette transformation n'est pas gratuite, car elle nécessite la conversion d'une petite quantité de masse en énergie, selon la célèbre équation d'Einstein $E=mc^2$. L'énergie libérée lors de cette conversion se retrouve sous forme d'une particule appelée positon.
2. Emission d'un positon : Le positon, symbolisé par β^+ , est l'antiparticule de l'électron. Il possède la même masse que l'électron, mais une charge électrique opposée, positive. Le positon est éjecté du noyau à grande vitesse, emportant avec lui une partie de l'énergie libérée lors de la transformation du proton en neutron.

3. Emission d'un neutrino antineutrino : Pour maintenir l'équilibre des forces et des charges, un neutrino antineutrino ($\bar{\nu}_e$) accompagne l'émission du positon. Cette particule élémentaire, quasiment sans masse et sans interaction avec la matière ordinaire, est invisible aux détecteurs actuels. Elle joue néanmoins un rôle crucial dans la conservation du nombre leptonique et de l'énergie dans la désintégration.
4. Modification du noyau : En conséquence de la désintégration bêta plus, le noyau initial perd un proton et gagne un neutron. Cela se traduit par une diminution du nombre atomique (Z) d'une unité, tandis que le nombre de masse (A) reste inchangé. Le noyau résultant est un isotope différent de l'élément d'origine.

Exemple :

Le béryllium 7 (${}^7\text{Be}$) est un isotope instable qui se désintègre par émission bêta plus pour se transformer en Lithium 7 (${}^7\text{Li}$) : [5]

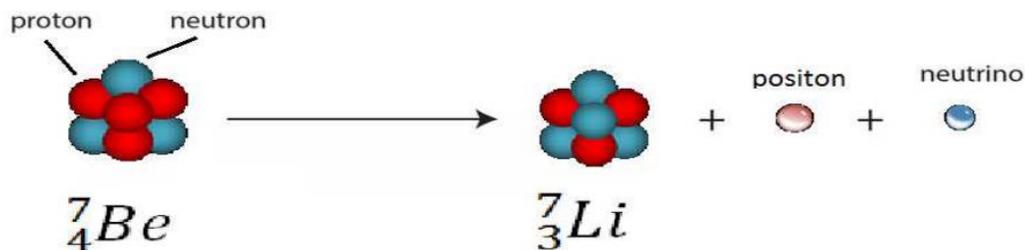
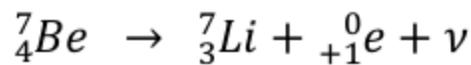


Figure 06 : Désintégration bêta du noyau Be -7

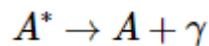
I.5.3. Le rayonnement gamma (γ) :

Le rayonnement gamma est un phénomène radioactif qui peut se produire dans un noyau. La différence entre ce type de désintégration et la désintégration alpha ou la désintégration bêta réside dans le fait qu'aucune particule n'est éjectée du noyau lors de ce type de désintégration. Plutôt que cela, une forme de rayonnement électromagnétique à haute énergie – un photon de

rayon gamma – est émise. Les rayons gamma ne sont rien d'autre que des photons très énergétiques et très ionisants. En outre, le rayonnement gamma est particulier dans la mesure où la désintégration gamma ne modifie pas la structure ou la composition de l'atome. Il ne change en revanche que l'énergie de l'atome, car le rayon gamma ne porte aucune charge et n'a pas de masse.

La désintégration gamma d'un noyau nécessite qu'il soit dans une forme d'état énergétique excité. Il a été démontré par des expériences que les protons et les neutrons se trouvent dans des états d'énergie discrets à l'intérieur du noyau, qui ne diffèrent guère des états excités que peuvent occuper les électrons dans les atomes. Donc, si un proton ou un neutron se trouve à l'intérieur du noyau, il se transforme en état excité. En règle générale, après une désintégration alpha ou bêta, le nouveau noyau fils doit, de manière ou d'autre, libérer de l'énergie afin de permettre au proton ou au neutron de revenir à l'état primitive. Un photon gamma est émis lorsque le nucléon passe d'un état de haute énergie à un état de basse énergie.

L'équation générale qui représente ce processus est la suivante :



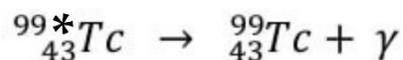
Avec :

A* : est l'atome excité

A : est un état neutre de l'atome excité initial

γ : est le photon du rayon gamma libéré

Exemple : Le technétium (^{99}Tc) donne du technétium 99 par transition isomérique n'émettant qu'un rayonnement γ . [6]



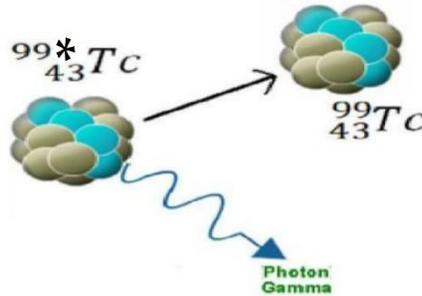


Figure 07 : Désintégration gamma du noyau Tc-99

I.5.4. Le rayonnement X :

Les rayons X, ou rayons Roentgen, sont une forme de rayonnement électromagnétique qui est invisible à l'œil nu. Ils occupent la partie supérieure du spectre électromagnétique, entre les rayons ultraviolets et les rayons gamma. Les rayons X sont générés par l'action d'électrons accélérés sur des atomes. En utilisant un tube à rayons X, on projette des électrons à haute énergie sur une cible métallique, dans la plupart des cas en tungstène. L'interaction de ces électrons avec les atomes de la cible engendre deux phénomènes principaux :

Les électrons incidents ont la capacité d'éjecter des électrons internes de la cible, ce qui peut entraîner la formation de "trous" ou de vacances dans les couches électroniques. Les atomes excités de la cible combinent ces trous pour se stabiliser en transférant de l'énergie d'électrons provenant de couches supérieures vers des niveaux d'énergie inférieurs. Lors de ces transitions, l'énergie supplémentaire libérée peut être émise sous forme de photons de rayons X. Ils peuvent ioniser la matière, c'est-à-dire arracher des électrons des atomes. En règle générale, la fabrication des rayons X suit le même procédé que celui employé en imagerie médicale. Un champ électrique intense (tension de 50 kV) accélère les électrons arrachés à un filament de tungstène chauffé électriquement afin de bombarder une anode (ou anticathode) composée de matériaux variés en fonction des applications visées. Le cuivre ^{29}Cu et le molybdène ^{42}Mo sont les deux métaux les plus fréquemment employés pour l'anode, avec une longueur d'onde de

rayons X de 1,54 Å et 0,709 Å. Il est nécessaire d'utiliser un rayonnement de longueur d'onde de même ordre de grandeur que la taille du réseau, ici l'espace interatomique, afin d'obtenir une diffraction optimale. C'est la raison pour laquelle les sources contenant du molybdène conviennent à résoudre la structure monocristal de petites molécules. Le cuivre est employé dans le domaine des macromolécules (protéines) et des analyses de poudres, car il favorise une meilleure séparation des taches de diffraction.[7]

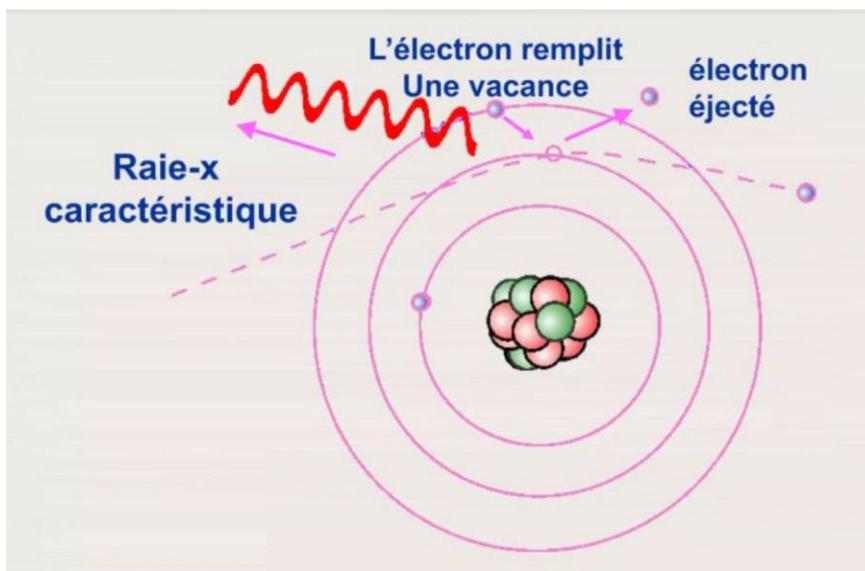


Figure 08 : Production des rayons – X

I.5.5. Le rayonnement neutronique :

Le rayonnement neutronique se compose de neutrons, des particules neutres qui ne possèdent aucune charge électrique. À la différence des autres particules subatomiques, les neutrons ne participent pas directement à la structure des atomes, mais ils jouent un rôle essentiel dans les réactions nucléaires et ont des utilisations en sciences et en technologies.

Il est une émission de neutrons libres, souvent générés par des réactions nucléaires, qui se propage dans l'espace et peut interagir avec la matière. n représente ces neutrons, qui n'ont ni charge électrique ($Z = 0$) ni masse atomique ($A = 1$).

L'absence de charge est une caractéristique essentielle qui facilite la pénétration des neutrons dans la matière par rapport aux particules chargées telles que les protons et les électrons, qui interagissent avec le champ électrique des atomes.

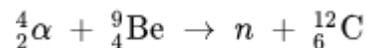
Les neutrons interagissent principalement avec les noyaux atomiques en utilisant une forte force nucléaire. La réaction nucléaire peut entraîner différentes réactions, comme la fission, la capture radiative ou la création de nouveaux isotopes radioactifs.

Types de neutrons : Les neutrons peuvent être classés en fonction de leur énergie cinétique :

- **Neutrons rapides :** Possédant une énergie élevée (de l'ordre de MeV), ils sont très efficaces pour induire la fission des noyaux lourds.
- **Neutrons modérés :** Ayant une énergie cinétique réduite (de l'ordre de keV), ils sont plus facilement absorbés par les noyaux.
- **Neutrons thermiques :** En équilibre thermique avec leur environnement, ils possèdent une énergie très faible (meV) et présentent une forte probabilité d'être capturés par les noyaux.

Exemple de Sources alpha-béryllium :

Mélange chimique intime d'un corps émetteur alpha et de béryllium de façon à exploiter la réaction :



Le mélange doit être intime car les particules alpha électriquement chargées sont rapidement arrêtées dans la matière.

Les émetteurs alpha utilisés peuvent être : radium, polonium, plutonium ou américium (l'américium représente un bon compromis pour les sources en réacteurs) [8]

I.6. Fission nucléaire

La fission nucléaire est un processus physique au cours duquel le noyau d'un atome lourd, comme l'uranium-235 ou le plutonium-239, se divise en deux noyaux plus légers, généralement accompagnés de la libération de plusieurs neutrons et d'une grande quantité d'énergie. Ce phénomène est à la base du fonctionnement des réacteurs nucléaires et des bombes atomiques.

I.6.1. Processus de Fission Nucléaire

1. Absorption d'un Neutron:

- Un noyau fissile, comme celui d'uranium-235, capture un neutron. Cette absorption rend le noyau instable.

2. Division du Noyau:

- L'instabilité provoque la division du noyau en deux fragments plus petits, appelés produits de fission. Ces fragments sont des éléments chimiques différents du noyau d'origine.

3. Libération de Neutrons:

- En plus des produits de fission, plusieurs neutrons (généralement 2 à 3) sont libérés. Ces neutrons peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux d'uranium, entraînant une réaction en chaîne.

4. Libération d'Énergie :

- Une partie de la masse du noyau est convertie en énergie selon la célèbre équation d'Einstein $E=mc^2$. Cette énergie se manifeste principalement sous forme de chaleur, ce qui est utilisé pour produire de l'électricité dans les réacteurs nucléaires.[9]

I.6.2. Réaction en Chaîne

Dans un réacteur nucléaire, la fission d'un atome entraîne la fission de plusieurs autres atomes, créant une réaction en chaîne auto-entretenu. Cette réaction est contrôlée par des barres de contrôle qui absorbent les neutrons excédentaires, régulant ainsi la vitesse de la réaction.[10]

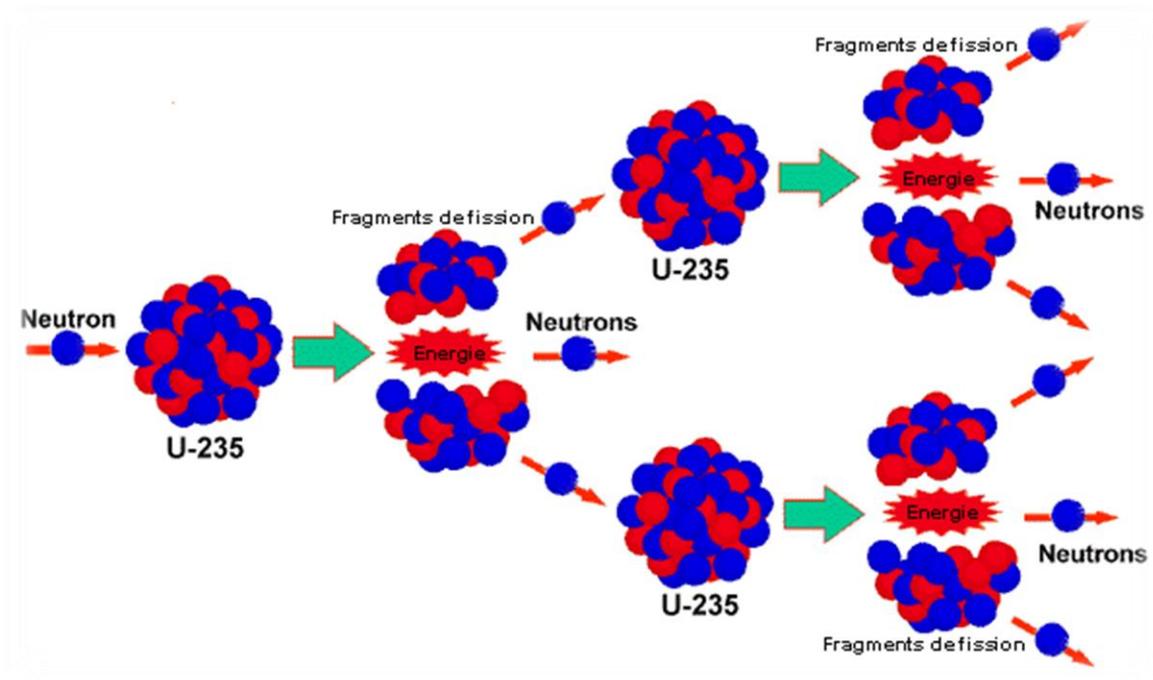


Figure 09 : Le principe de la réaction en chaîne avec la fission d'un noyau d'uranium 235 absorbant un neutron.

I.7. La pénétration des rayonnements dans la matière

I.7.1. Particules alpha : Pénétration très faible dans l'air. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium. Bien qu'elles ne pénètrent pas très profondément dans un tissu vivant, elles sont très dangereuses, car l'ionisation du tissu humain peut provoquer des troubles graves et des cancers. Ceci est d'autant plus dangereux si les particules α sont inhalées ou ingérées.

I.7.2. Particules bêta moins (électrons) : Pénétration faible. Parcourent quelques mètres dans l'air. Une feuille d'aluminium de quelques millimètres peut arrêter les électrons. Ils peuvent pénétrer jusqu'à environ un centimètre de profondeur dans un tissu vivant avant

d'être arrêtés. Ils peuvent être capturés par les bio-molécules qui sont en conséquence ionisées.

I.7.3. Rayonnements X et gamma : Pénétration très grande, dépendant de l'énergie du rayonnement, plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger. En traversant des tissus vivants comme le corps humain, ils peuvent provoquer des dommages en ionisant des molécules situées sur leur chemin, ce qui peut induire un dysfonctionnement de l'ADN et provoquer l'apparition de cancers[11]

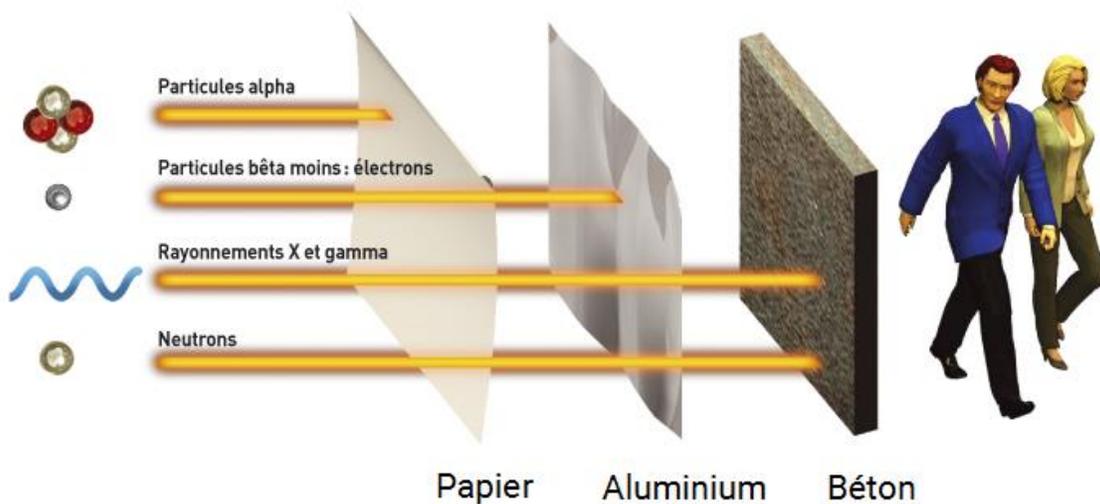


Figure 10 : La pénétration des rayonnements dans la matière

I.8. Les différents types de rayonnements ionisants et leurs caractéristiques :

Type de rayonnement	Exemples d'émetteurs	Nature	Spécificité	Pouvoir pénétrant
alpha α	Américium 241 Plomb 210 Radon 222 Thorium 232 Uranium 235 Uranium 238	Particules constituées de 2 protons et 2 neutrons (charge électrique positive)	Directement ionisant	Faible pénétration - parcourt quelques centimètres dans l'air - arrêté par la couche cornée de la peau ou une feuille de papier
bêta β	Césium 137 Iridium 192 Phosphore 32 Soufre 35 Tritium (ou Hydrogène 3)	Electrons porteurs d'une charge électrique positive (positons β^+) ou négative (β^-)	Directement ionisant	Pénétration limitée - parcourt quelques mètres dans l'air - arrêté par une feuille d'aluminium ou par des matériaux de faible poids atomique (plexiglas, etc.) - ne pénètre pas en profondeur dans l'organisme (pour une source située dans son environnement extérieur)

Gamma γ	Césium 137 Iridium 192 Or 198 Technétium 99	Photons énergétiques	Indirectement ionisant	Pénétration importante - parcourt quelques centaines de mètres dans l'air - traverse les vêtements et le corps - arrêté ou atténué par des écrans protecteurs (épaisseurs de béton, d'acier ou de plomb)
X	Générateur électrique de rayons X	Photons énergétiques	Indirectement ionisant	Pénétration importante - parcourt quelques centaines de mètres dans l'air - traverse les vêtements et le corps - arrêté ou atténué par des écrans protecteurs (épaisseurs de béton, d'acier ou de plomb)
neutronique	Couple Américium-Béryllium Lors de la fission de l'Uranium 235 Accélérateurs de particules	Neutrons	Indirectement ionisant	Pénétration importante - parcourt quelques centaines de mètres dans l'air - traverse les vêtements et le corps - arrêté par des écrans de paraffine

I.9. Conclusion :

Cette exploration de la radioactivité nous a conduit de la compréhension des atomes aux interactions complexes des rayonnements avec la matière. Nous avons étudié la stabilité des noyaux, régie par les forces nucléaires et l'énergie, et vu comment certains deviennent radioactifs en émettant des particules ou des rayonnements. Nous avons également approfondi les rayonnements ionisants, capables de modifier chimiquement la matière et les tissus biologiques. Enfin, nous avons examiné la pénétration des rayonnements, observant comment leur nature et leur énergie influencent leurs interactions et leur capacité de pénétration dans la matière.

Chapitre II

Réacteurs Nucléaires

II.1. Introduction

La sécurité des infrastructures nucléaires est un défi complexe, visant à protéger les populations, l'environnement et les biens dans l'exploitation des réacteurs, usines de traitement, et sites de stockage des déchets radioactifs. Les principes de conception, construction, fonctionnement et maintenance sont cruciaux pour prévenir et gérer les accidents. Les leçons des catastrophes de Tchernobyl et Fukushima, ainsi que le renforcement de la culture de sûreté et de la coopération internationale, ont permis d'améliorer les normes. À l'heure de la transition énergétique, assurer la sécurité nucléaire est essentiel pour une utilisation durable et pacifique de l'énergie atomique.

II.2. Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire:

II.2. 1. Définition et constitution

Un réacteur nucléaire permet de produire une réaction de fission en chaîne et d'en contrôler l'intensité, pour produire de l'énergie sous forme de chaleur, utilisée principalement pour générer de l'électricité.

Quatre constituants principaux sont nécessaires pour concevoir un réacteur nucléaire :

- **Un combustible** dans lequel se produit la fission
- **Un fluide caloporteur**, liquide ou gazeux, qui transporte la chaleur hors du cœur du réacteur pour ensuite actionner une turbine (turboalternateur) permettant la production d'électricité
- **Un modérateur** (sauf pour les réacteurs à neutrons rapides) qui permet de ralentir les neutrons afin de favoriser la réaction en chaîne
- **Un moyen de contrôle de la réaction en chaîne**. Il en existe deux types :

* Des barres de commande constituées de matériaux absorbant les neutrons que l'on fait plus ou moins rentrer dans le cœur du réacteur ;

* Des corps dissous dans l'eau dont on peut faire varier la concentration au cours du temps (par exemple du bore sous forme d'acide borique).

- **Le cœur du réacteur** est la partie du réacteur nucléaire où se déroulent les réactions de fission nucléaire, contenant le combustible nucléaire (comme l'uranium ou le plutonium), les barres de contrôle, et le modérateur qui ralentit les neutrons pour maintenir la réaction en chaîne.

- **La cuve du réacteur** est un grand récipient en acier épais et robuste qui contient le cœur du réacteur nucléaire, le fluide caloporteur (souvent de l'eau sous pression), ainsi que les barres de contrôle. Elle joue un rôle crucial en assurant l'intégrité structurelle du réacteur, en conférant un confinement physique pour le combustible nucléaire et en facilitant le transfert de chaleur depuis le cœur vers le générateur de vapeur tout en protégeant contre les radiations.

- Fission

La fission nucléaire consiste à casser des noyaux lourds, comme ceux de l'uranium 235 ou du plutonium 239. Sous l'effet de l'impact d'un neutron, les noyaux lourds se divisent en deux atomes plus petits, libèrent de l'énergie et des neutrons. C'est cette énergie qui est utilisée dans les réacteurs nucléaires. Les neutrons libérés peuvent alors aller percuter un autre atome lourd qui va se diviser en deux à son tour, etc. C'est la réaction en chaîne.

Les neutrons émis par la fission d'un atome d'uranium 235 ont une vitesse de 20 000 km/s. Pour entretenir la réaction en chaîne, ces neutrons sont ralentis par le modérateur jusqu'à une vitesse de 2 km/s.

- Réaction en chaîne

La réaction en chaîne est maintenue dans le cœur du réacteur si le nombre de neutrons produits par les fissions des atomes lourds est égal au nombre de neutrons qui disparaissent (par exemple absorbés par l'uranium 238). Le rapport de ces deux nombres (production divisée par disparition) est appelé coefficient de multiplication (ou « criticité ») et doit être égal à 1.

Si ce rapport est inférieur à 1, alors les neutrons disparaissent plus vite qu'ils ne sont produits et la réaction en chaîne va finir par s'arrêter et le réacteur aussi : le cœur est alors dit « sous-critique ». À l'inverse, si le coefficient de multiplication est supérieur à 1, alors le nombre de neutrons présents dans le cœur va augmenter très rapidement, ce qui entraînera une augmentation du nombre de fissions et de l'énergie dégagée. La réaction en chaîne va donc s'emballer et le réacteur est dit « sur-critique ».

II.2. 3. Chaîne énergétique

La chaîne énergétique d'une centrale nucléaire fonctionne de la manière suivante :

- 1- Fission nucléaire :** Dans le cœur du réacteur, des atomes de combustible nucléaire (comme l'uranium-235 ou le plutonium-239) subissent des fissions lorsque des neutrons les percutent. Cette réaction libère une grande quantité de chaleur.
- 2- Production de chaleur :** La chaleur générée par les fissions nucléaires est transférée au fluide caloporteur (souvent de l'eau sous pression) qui circule dans le cœur du réacteur.
- 3- Génération de vapeur :** Le fluide caloporteur chauffé passe par un générateur de vapeur où il transfère sa chaleur à de l'eau secondaire, produisant de la vapeur.
- 4- Turbine à vapeur :** La vapeur produite est dirigée vers une turbine à vapeur, où elle fait tourner les pales de la turbine.
- 5- Génération d'électricité :** La rotation de la turbine entraîne un générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- 6- Condensation de la vapeur :** Après avoir traversé la turbine, la vapeur est refroidie et condensée en eau dans un condenseur, souvent en utilisant de l'eau de refroidissement provenant d'une source externe (comme une rivière ou un système de refroidissement à eau).
- 7- Recyclage :** L'eau condensée est renvoyée dans le générateur de vapeur pour être réchauffée et le cycle recommence.

- 8- Distribution de l'électricité :** L'électricité produite est ensuite acheminée via des lignes de transmission vers le réseau électrique pour être distribuée aux consommateurs.

Ce processus permet de convertir l'énergie nucléaire en électricité de manière efficace et continue.

II.2. 4. Les différentes filières

Plusieurs technologies permettent de transformer l'énergie issue de la réaction de fission en électricité. On les caractérise par famille en fonction des composants principaux : combustible, modérateur (ou absence de modérateur) et caloporteur.

II.2. 4.1. La filière à eau « ordinaire » ou « légère » et à uranium enrichi en U235

Dans cette filière, il existe deux types de réacteurs : les Réacteurs à Eau Pressurisée ou sous pression (REP ou PWR) et les Réacteurs à Eau Bouillante (REB ou BWR). Plus de 80% du parc nucléaire en fonctionnement dans le monde est constitué de réacteurs exploitant cette filière. Les réacteurs REP sont les plus utilisés dans le monde (73% des réacteurs dans le monde à fin septembre 2023 selon l'AIEA et équipent tout le parc électronucléaire français (56 réacteurs en fonctionnement). Dans les REP et REB, l'eau joue le rôle de fluide caloporteur et de modérateur.

II.2. 4.2. La filière à eau lourde et à uranium naturel

Avec de nombreuses variantes, ces filières utilisent un combustible peu ou pas enrichi et un modérateur qui est l'eau « lourde » (oxyde de deutérium). Les grands pays utilisant cette filière sont le Canada et l'Inde. La France a exploité une centrale de ce type à Brennilis, en Bretagne.

II.2. 4.3. La filière à neutrons rapides et à combustible plutonium et uranium naturel

Dans cette filière, le combustible utilisé est l'uranium 238 (99,28% de l'uranium naturel), transformé en plutonium 239 par absorption de neutrons rapides. Le plutonium généré est lui-même fissionné par une partie des neutrons.

Cette filière constitue une voie d'avenir parce qu'elle permet d'organiser une réaction en chaîne avec du plutonium issu du retraitement des combustibles usés de tous les types et de transformer l'uranium 238 en plutonium. Ces réacteurs génèrent donc plus de matière fissile qu'ils n'en consomment et permettent donc de beaucoup mieux utiliser le minerai naturel.

II.2.5. Fonctionnement des centrales nucléaires

Le principe de fonctionnement des réacteurs dépend d'une filière à l'autre.

II.2.5.1. La filière à eau « ordinaire » ou « légère » :

Dans les réacteurs REP, tout comme dans les REB, le cœur du réacteur avec le combustible nucléaire est placé dans une cuve elle-même en contact avec de l'eau. La réaction en chaîne chauffe les assemblages de combustible qui chauffent alors l'eau, appelée eau « primaire ». En exerçant une forte pression (155 atmosphères), le pressuriseur empêche cette eau de bouillir. L'eau « primaire » reste donc sous forme liquide. Grâce aux pompes primaires, l'eau « primaire » circule en circuit fermé entre la cuve du réacteur et le Générateur de Vapeur (GV). Le GV est un échangeur qui va permettre la transmission de la chaleur de l'eau du circuit primaire à l'eau du circuit secondaire. L'eau secondaire — qui ne sera jamais en contact avec le combustible — étant soumise à une pression beaucoup plus faible (70 atmosphères), va entrer en ébullition. La vapeur alors produite est acheminée vers le turboalternateur. Une fois actionné par la vapeur, le turboalternateur produit de l'électricité.

À la sortie du turboalternateur, la vapeur est retransformée en eau dans un « condenseur » refroidi par de l'eau de mer ou de rivière ou encore par de l'air frais et humide qui s'engouffre dans les tours en béton appelées « aéroréfrigérantes ». Cette eau est donc un troisième circuit totalement indépendant de l'eau secondaire.

L'eau secondaire est ramenée vers le réacteur nucléaire pour être à nouveau transformée en vapeur refermant ainsi le cycle.

Principe des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

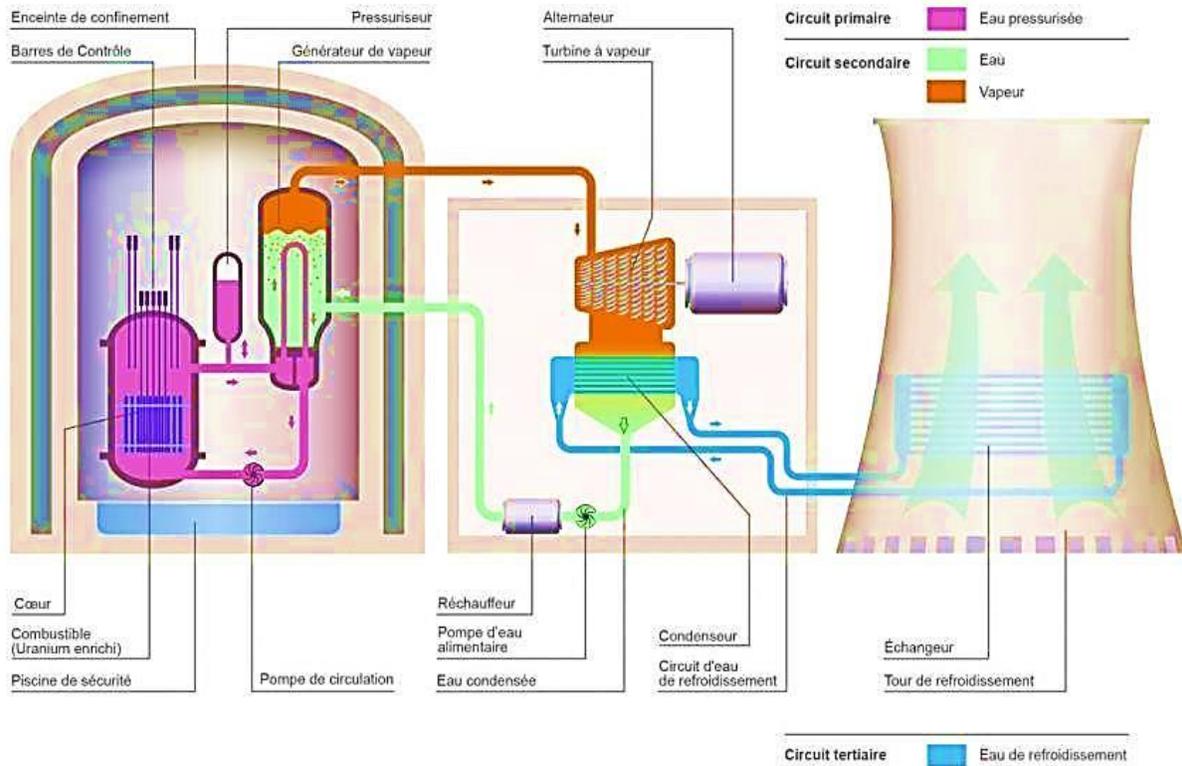


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée

II.2.5.2. Les Réacteurs à Eau Bouillante (REB)

Dans un REB, à l'inverse d'un réacteur REP, il n'y a pas d'eau secondaire, l'eau chauffée par les assemblages de combustible nucléaire entre en ébullition à l'intérieur même de la cuve.

La vapeur produite est acheminée vers le turboalternateur à l'aide des tuyauteries « vapeur » (l'eau qui n'aurait pas été vaporisée est remise en circulation dans le cœur du réacteur au moyen des pompes de recirculation). Actionné par la vapeur, le turboalternateur produit de l'électricité. La vapeur suit alors le même cycle que dans un REP. Elle est recondensée dans le condenseur refroidi par un circuit indépendant et est ramenée vers le cœur du réacteur.

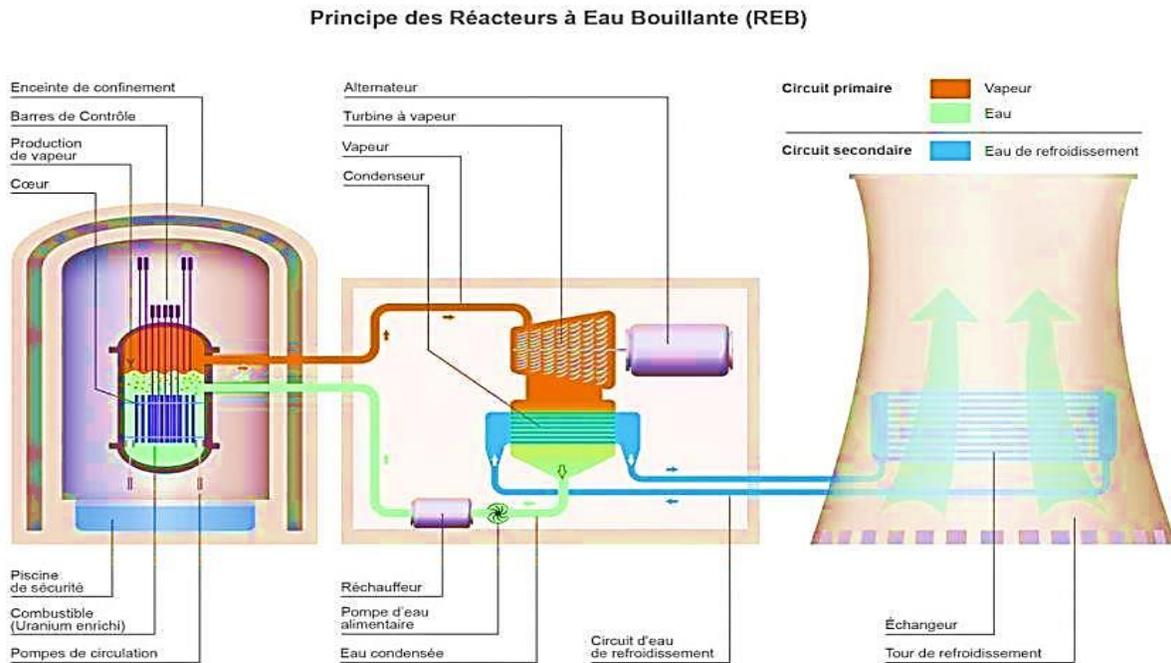


Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau bouillante

II.2.5.3. La filière à eau lourde

L'eau « lourde » (D₂O) est une combinaison d'oxygène et de deutérium (atome d'hydrogène lourd). Elle est utilisée comme modérateur dans des réacteurs surtout développés au Canada. L'eau lourde absorbe moins les neutrons que l'eau classique. Ainsi de l'uranium naturel transformé en plutonium peut être directement utilisé comme combustible dans ces réacteurs.

L'étape d'enrichissement de l'uranium n'a donc pas lieu dans le cycle du combustible utilisé dans ces réacteurs. L'eau lourde peut également être utilisée comme fluide caloporteur, car ses propriétés physiques sont proches de celles de l'eau classique.

II.2.5.4. La filière à neutrons rapides : Les réacteurs à neutrons rapides

Dans les réacteurs à neutrons rapides, il n'y a pas de modérateur. Les neutrons ne sont donc pas ralentis (d'où le nom des réacteurs) et gardent toute leur énergie. Ils ont ainsi la capacité de produire plus de matière fissile qu'ils n'en consomment. Ils utilisent presque toute l'énergie

contenue dans l'uranium. De plus, les neutrons rapides ont la qualité de détruire au sein même du réacteur les déchets nucléaires en les transformant en noyaux plus légers par fission.

Le fluide caloporteur peut être un gaz inerte (hélium) ou un métal liquide (sodium). L'eau ne peut pas être utilisée car elle ralentirait les neutrons. Le combustible est constitué de plutonium et d'uranium 238, matière non fissile, qui se transforme en plutonium en absorbant un neutron. [12]

II.6. Les principaux types d'accidents et leur Conséquences.

II.6.1. Les différents types d'accidents

II.6.1.1. Les accidents de contamination

Ils conduisent à un rejet de produits radioactifs à l'extérieur des enceintes où ils sont contenus et donc à une contamination de l'environnement. Celle-ci provoque des irradiations externes, puis des irradiations internes par inhalation d'air contaminé ou ingestion d'eau ou d'aliments contaminés. Les accidents les plus graves survenant dans les centrales électronucléaires font partie de cette catégorie. Les installations de retraitement du combustible peuvent aussi donner lieu à des accidents de contamination, mais ceux-ci sont moins probables que pour les centrales.

II.6.1.2. Les accidents d'irradiation

Ils ont lieu lorsqu'une source radioactive intense sort de ses protections. De tels accidents peuvent se produire dans les cas suivants :

- Les accidents de transport : des sources radioactives intenses sont transportées quotidiennement par route, rail, bateau. Leurs emballages, constitués de blindages importants, arrêtent les rayonnements et sont conçus et testés de façon à résister à tout accident, y compris aux incendies. Cependant, une fuite au cours d'un accident ne peut être totalement exclue.
- Utilisations industrielles de radioéléments : les appareils de contrôle des soudures (gammagraphes) sont à l'origine des incidents les plus fréquents : la source radioactive relativement intense est sortie de son conteneur de protection pour effectuer le contrôle de soudure. Il arrive que le mécanisme assurant la rentrée de la source se bloque. Il en résulte une

zone autour de la source où règne un danger d'irradiation grave pour toute personne non avertie manipulant l'appareil ou la source (une bonne part des irradiés graves dans le monde l'a été au cours de tels incidents).

- Les utilisations médicales de sources radioactives : les appareils de radiothérapie, dont certains contiennent des sources radioactives intenses, sont principalement visés. Ils peuvent donner lieu à des accidents de même type que les précédents.

Les accidents les plus graves combinent en général les deux risques. Cependant, le risque d'irradiation grave sera localisé à l'intérieur et aux abords immédiats de l'installation accidentée, alors que le risque de contamination pourra toucher des zones étendues.

II.6.2. L'accident grave dans une centrale électronucléaire et ses conséquences pour l'environnement

L'accident le plus grave sur une telle installation est une rupture importante dans le circuit primaire de refroidissement du cœur du réacteur. La conséquence en est que l'eau du circuit primaire s'échappe et que le cœur n'est plus refroidi. Continuant à s'échauffer, celui-ci peut fondre. Des circuits de secours d'injection d'eau entrent alors en action et rétablissent petit à petit le refroidissement du cœur, avant que celui-ci n'ait fondu. Un tel accident est dit accident de dimensionnement. En supposant que tous ces systèmes de refroidissement de secours ne fonctionnent pas, le cœur continue à s'échauffer et fond, en libérant tous les produits radioactifs qu'il contient. Cet accident est dit accident hors dimensionnement ou accident grave. Cependant, un tel accident ne se traduit pas par une explosion nucléaire, car une centrale électronucléaire ne peut pas se transformer en bombe atomique. Les centrales ont été conçues pour que l'enceinte de confinement, enceinte béton qui contient le réacteur, résiste à toutes les contraintes pouvant résulter de l'accident grave pendant au moins vingt-quatre heures. Au-delà, si la pression dans l'enceinte augmentait jusqu'à risquer de dépasser la limite de résistance de celle-ci, il est possible de la dépressuriser à travers des filtres qui retiendraient la majeure partie de la radioactivité répandue à l'intérieur. Ceci étant, on considère qu'il pourrait être nécessaire d'évacuer la population dans un rayon de cinq kilomètres autour de la centrale, avant que ne se produisent des rejets substantiels de radioactivité, et qu'il y aurait

lieu de demander à la population de se mettre à l'abri à l'intérieur d'habitations ou de locaux fermés dans un rayon de dix kilomètres.[13]

II.6.3. L'indicateur de gravité des accidents nucléaires : l'échelle INES

II.6.3.1. Description : Créée par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), l'échelle INES est un outil utilisé pour communiquer au public la gravité des incidents ou accidents nucléaires et radiologiques.

II.6.3.2. Niveaux de l'échelle :

- **Niveau 0** : Écart sans importance pour la sûreté (anomalie technique sans conséquence).
- **Niveaux 1 à 3** : Incidents, de simple anomalie à incident grave (sans conséquence significative à l'extérieur du site).
 - **Niveau 1** : Anomalie (déviation sans conséquence sur la sûreté).
 - **Niveau 2** : Incident (anomalie significative pour la sûreté, mais avec des conséquences mineures).
 - **Niveau 3** : Incident grave (exposition de personnes au-delà des limites prescrites, mais sans effet sanitaire à long terme).
- **Niveaux 4 à 7** : Accidents, allant de l'accident sans conséquence extérieure significative à la catastrophe majeure.
 - **Niveau 4** : Accident avec conséquences locales (fusion partielle du cœur sans rejets importants).
 - **Niveau 5** : Accident avec conséquences étendues (fusion du cœur avec rejets limités).
 - **Niveau 6** : Accident sérieux (rejets importants nécessitant la mise en œuvre des plans d'urgence).

- **Niveau 7** : Accident majeur (rejet majeur de matières radioactives, avec impacts graves sur la santé et l'environnement sur une vaste zone, ex. Tchernobyl, Fukushima).[14]

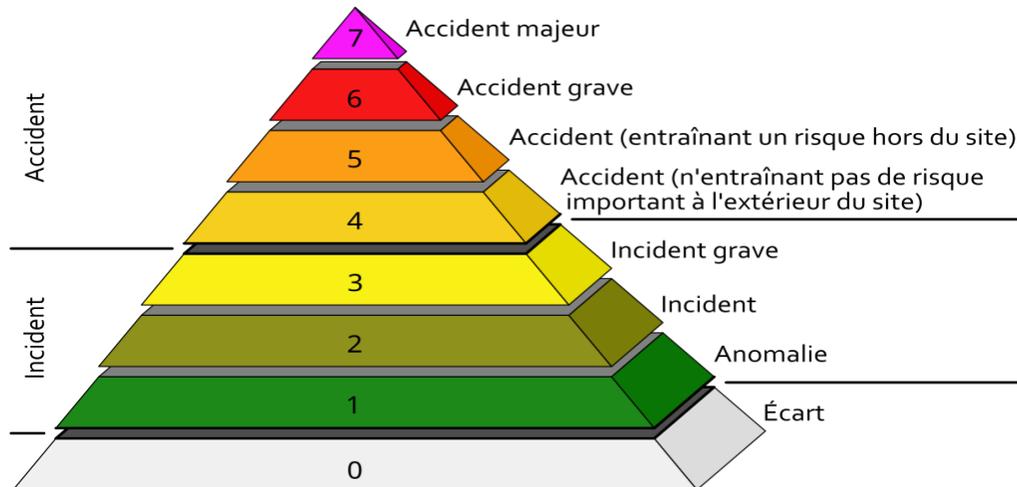


Figure 3 : Échelle internationale des événements nucléaires.

II.7. La prévention des accidents

II.7.1. La réglementation des installations nucléaires en Algérie

La réglementation des installations nucléaires est encadrée par une série de lois, décrets, et organismes régulateurs visant à assurer la sûreté, la sécurité et la protection de l'environnement et de la santé publique. Ces textes prennent en compte les standards internationaux, notamment ceux de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Voici un aperçu des principales dispositions et des institutions concernées par la réglementation des installations nucléaires en Algérie.

II.7.2. Cadre juridique général

Le cadre juridique algérien pour la régulation des activités nucléaires repose sur plusieurs textes de lois et décrets :

- Loi n° 19-05 du 17 juillet 2019 relative aux activités nucléaires : Cette loi régit les activités nucléaires en Algérie, en mettant l'accent sur la sûreté, la sécurité, la

protection radiologique et la gestion des déchets radioactifs. Elle instaure les bases de la réglementation des installations nucléaires, y compris leur conception, construction, exploitation, et démantèlement.

- Décret présidentiel n° 20-42 du 4 février 2020 : Ce décret organise l'Autorité algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN), un organisme qui joue un rôle crucial dans la supervision de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires.
- Loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 modifiée et complétée : Relatif à la sûreté des installations classées pour la protection de l'environnement, cette loi inclut des dispositions relatives aux installations nucléaires.

II.7.3. Autorités de réglementation

II.7.3.1. Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN)

L'ASSN est l'organisme central pour la régulation des installations nucléaires en Algérie. Ses fonctions incluent :

- La délivrance des autorisations et des licences pour les activités nucléaires.
- L'inspection des installations nucléaires pour garantir le respect des normes de sûreté et de sécurité.
- La surveillance et l'évaluation des risques radiologiques liés aux installations nucléaires.
- L'encadrement de la gestion des déchets radioactifs et du démantèlement des installations.
- La formation et l'information sur la sûreté nucléaire.

II.7.3.2. Commissariat à l'énergie atomique (COMENA)

Créé en 1996, le COMENA est l'organisme scientifique et technique chargé de la promotion, de la coordination et du contrôle de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire en Algérie. Il supervise le développement de la recherche nucléaire et la mise en place d'infrastructures nucléaires.

Les autorités telles que l'ASSN et le COMENA jouent un rôle central dans le contrôle des activités nucléaires, en conformité avec les normes internationales. L'Algérie accorde une

importance particulière à la gestion des déchets radioactifs, à la prévention des accidents et à la protection radiologique des travailleurs et du public. [15]

II.7.4. Les principes de sûreté au niveau de centrale nucléaire :

Dans une centrale, toutes les dispositions sont généralement prises afin d'éviter tout incident ou accident. Toutefois, on estime qu'ils peuvent toujours se produire et on met en œuvre des mesures pour en réduire les conséquences à un niveau acceptable. Cependant, on envisage également les situations les plus graves qui pourraient survenir, même si on n'a pas réussi à en identifier les causes et à identifier la succession de défaillances pouvant y conduire. Les mesures sont alors mises en œuvre pour faire face à de telles situations.

II.7.4.1. Sécurité approfondie

Cinq niveaux sont actuellement reconnus pour les réacteurs :

- Le premier niveau : Il s'agit de prévenir les dysfonctionnements et les pannes des systèmes. Afin d'accomplir cela, chaque composant et chaque structure sont préalablement identifiés avec les contraintes les plus strictes (mécaniques, thermiques...) auxquelles il peut être exposé. Ces mesures sont donc prises afin de faire face à ces contraintes tout en maintenant des marges de sécurité adéquates.

Ces mesures sont donc prises afin de faire face à ces contraintes tout en maintenant des marges de sécurité adéquates. Ce niveau comprend la formation et la qualification des employés, ainsi que l'organisation du travail et les procédures de fonctionnement. Il est important que toutes les mesures soient prises pour prévenir toute perturbation du fonctionnement normal de l'installation en cas d'événements internes ou externes tels que la chute d'avions, le risque sismique ou les inondations. Elles offrent la possibilité de déterminer le domaine d'activité autorisé ainsi que les règles générales d'utilisation.

- deuxième niveau : L'objectif de ce niveau est de garantir le bon fonctionnement de l'installation dans le domaine autorisé et comprend les mesures et les équipements qui permettent d'empêcher l'installation de quitter ce domaine autorisé et de l'y ramener en cas de dérive de service. Ces mesures visent à prévenir que les dispositifs relevant du premier niveau ne soient exposés à des conditions supérieures à celles pour lesquelles ils ont été élaborés.

Tous les systèmes de régulation des différents paramètres de fonctionnement de la centrale (puissance, température des fluides...) sont responsables de ce niveau. Ce deuxième niveau comprend également les systèmes de mesure de la radioactivité à l'intérieur du réacteur, le dispositif de contrôle permanent des paramètres de fonctionnement et les contrôles et essais périodiques des équipements et des dispositifs.

- Le troisième niveau : L'objectif est de gérer les accidents. Selon l'opinion, même si les mesures sont considérées comme relevant des deux premiers niveaux, des pannes peuvent néanmoins entraîner des défauts graves de l'installation (rupture d'une tuyauterie principale...). La détermination de cette approche conduit à l'implantation de systèmes qui n'ont aucun impact sur le fonctionnement normal, mais qui visent à réduire les conséquences de ces accidents à l'intérieur de l'installation. L'objectif de ces systèmes qui se mettent en marche automatiquement dans certaines situations est d'éviter la fusion du cœur du réacteur (le plus grave événement pour un réacteur), en garantissant le refroidissement en toutes circonstances.
- Le quatrième niveau a pour objectif de prendre en considération les multiples défaillances qui pourraient entraîner une fusion du cœur, même si les mesures prises au titre des trois premiers niveaux ont été prises, afin de réduire la probabilité et de limiter les rejets ou de retarder leur nécessité. Ce niveau comprend les mesures visant à maintenir le confinement de l'enceinte du réacteur, ainsi que les mesures prises dans le cadre du plan d'urgence interne (PUI).
- Le cinquième niveau : englobe les mesures prises pour limiter les conséquences radiologiques pour l'environnement et la population en cas de rejet important.

La probabilité de rejets importants de radioactivité dans l'environnement, bien que très faible en raison des mesures prises au niveau des quatre premiers niveaux, est considérée comme faible. Il est donc nécessaire de prendre des mesures afin de restreindre les conséquences des instructions de confinement de la population, la distribution de plaquettes d'iode, etc.

Ce niveau ultime concerne toutes ces mesures prévues dans les plans particuliers d'intervention (PPI). [16]

II.7.4.2. Les barrières de Sécurité

La défense en profondeur est mise en œuvre, notamment, par le système des "barrières", qui implique l'installation d'une série de barrières entre les éléments radioactifs présents dans le cœur du réacteur et l'environnement extérieur, qui sont en principe indépendantes les unes des autres.

- La première barrière : La gaine du combustible, un tube en métal et imperméable, est composé de pastilles d'oxyde d'uranium et éventuellement de plutonium.
- La deuxième barrière : Le circuit de refroidissement primaire est composé de la cuve et des tuyaux où le fluide primaire de refroidissement circule.
- La troisième barrière : est constituée par l'enceinte du réacteur en acier ou en béton de forte épaisseur qui constitue la barrière ultime. [17]

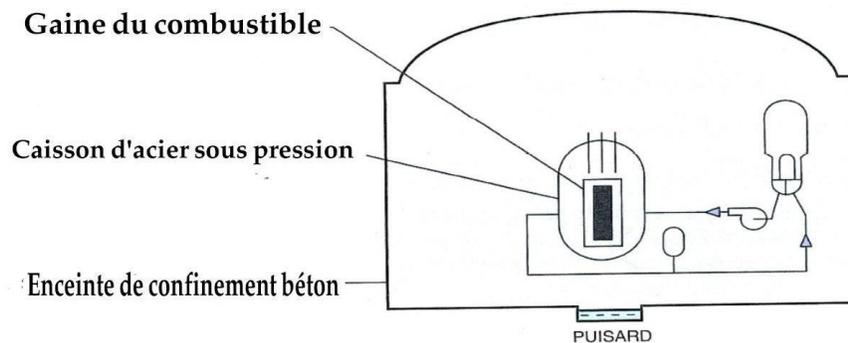


Figure 4 : Les trois barrières de sécurité

II.7.5. Moyen de protection contre d'exposition aux rayonnements :

Les moyens de protection contre l'exposition aux rayonnements dans une installation nucléaire sont essentiels pour minimiser les risques pour les travailleurs, le public et l'environnement.

Ces mesures reposent sur des principes fondamentaux de radioprotection, tels que l'éloignement, le blindage, et la limitation du temps d'exposition, ainsi que sur des équipements spécifiques et des procédures rigoureuses

II.7.5.1. Protection collective :

Le principe de protection contre la contamination est d'interposer entre la source de contamination et l'extérieur, une succession de barrières qui est assurée par l'installation elle-même et par ses équipements :

II.7.5.1.1. Systèmes de Ventilation et de Filtration

La ventilation joue un rôle crucial dans le contrôle des contaminations atmosphériques :

- Ventilation en cascade : Le flux d'air est conçu pour circuler des zones les moins contaminées vers les zones les plus contaminées, empêchant ainsi la dispersion des particules radioactives.
- Systèmes de filtration HEPA (High-Efficiency Particulate Air) : Ces filtres capturent les particules radioactives en suspension dans l'air avant que l'air ne soit rejeté à l'extérieur ou recyclé dans l'installation.
- Confinement dynamique : Les systèmes de ventilation maintiennent une pression négative dans les zones contaminées, assurant que l'air circule toujours vers l'intérieur de ces zones et non vers l'extérieur.

II.7.5.1.2. Réseau d'Incendie :

Le réseau d'incendie dans une installation nucléaire est un ensemble de canalisations, de pompes, de réservoirs, et de dispositifs d'extinction qui sont conçus pour fournir de l'eau ou d'autres agents extincteurs en cas d'incendie.

En cas de détection d'un incendie, les pompes d'incendie se mettent en marche pour fournir de l'eau à haute pression dans le réseau, permettant une intervention rapide pour maîtriser le feu. Le réseau d'incendie est régulièrement testé et entretenu pour s'assurer de son bon fonctionnement.

II.7.5.1.3. Système de Détection et d'Alarme Incendie

Le système de détection et d'alarme incendie est un réseau de détecteurs, de dispositifs d'alerte, et de contrôleurs qui permettent de détecter un incendie rapidement et de déclencher les mesures d'urgence nécessaires.

- Dès que les détecteurs identifient un incendie, le système d'alarme se déclenche, activant à la fois des alarmes locales (sirènes, lumières stroboscopiques) et des notifications au centre de contrôle. Le système peut également activer des systèmes de protection supplémentaires, comme les volets coupe-feu ou les sprinklers.

II.7.5.1.4. Système de Clapet Anti-incendie

Les clapets anti-incendie sont des dispositifs installés dans les conduits de ventilation et de climatisation pour empêcher la propagation du feu et de la fumée d'une zone à l'autre.

- En cas d'incendie, les détecteurs de chaleur activent les clapets, qui se ferment pour contenir le feu et la fumée, limitant leur propagation à travers les conduits de ventilation. Ces systèmes sont critiques pour maintenir l'intégrité des zones de confinement et protéger les systèmes sensibles de l'installation nucléaire.

II.7.5.1.5. Les dosimètres de zone : c'est un des détecteurs portatifs utilisé pour la détection des niveaux des rayonnement dans le poste de travail, Un grand détecteur de rayonnement est installé aux sorties de la zone rouge pour détecte si vous étés contamine ou non.

II.7.5.1.6. Douche et lavabo : si le travailleur et contaminée totalement alors il faut prendre un douche, et si les mains sont les seul contaminée il peut se laver dans lavabo seulement. [18]

II.7.5.1.7. Limitation du temps d'exposition : Réduire le temps passé dans une zone à forte radiation diminue la dose totale reçue. Les travailleurs doivent :

- Planifier les interventions pour passer le moins de temps possible dans des zones à haut niveau de radiations.

- Utiliser des techniques de travail à distance lorsque cela est possible, par exemple à l'aide de bras manipulateurs ou de robots dans les zones à forte radioactivité.

II.7.5.1.8. Distance (Éloignement)

Le niveau de radiation diminue avec l'éloignement de la source. Ce principe est basé sur la loi de l'inverse du carré de la distance, selon laquelle l'intensité des rayonnements diminue rapidement avec l'augmentation de la distance :

- Éloignement des sources de rayonnement : En maintenant une distance adéquate entre les personnes et les sources de radiation, les doses reçues peuvent être considérablement réduites.
- Utilisation d'outils à longue portée pour manipuler les objets radioactifs à distance.

II.7.5.1.9. Blindage (Les écrans)

Des matériaux spécifiques sont utilisés pour atténuer ou stopper les rayonnements avant qu'ils n'atteignent les individus. Le type de blindage dépend du type de radiation :

- **Rayonnements alpha α** : Une simple feuille de papier ou une couche mince de vêtements suffit pour les arrêter.
- **Rayonnements bêta β** : Des matériaux comme le plastique ou l'aluminium sont utilisés comme protection contre ces particules.
- **Rayonnements gamma et rayons X** : Ces radiations nécessitent des matériaux plus lourds, tels que le plomb, le béton, ou des couches épaisses d'eau pour les arrêter.
- **Neutrons** : Les matériaux de faible numéro atomique et surtout l'hydrogène, sont les plus utilisés pour arrêter les neutrons rapides.

Généralement l'eau, la paraffine, le cadmium, le bore et le graphite sont les plus utilisées.[19]

II.7.5.2. Équipements de Protection Individuelle (EPI)

Les travailleurs des installations nucléaires sont équipés de dispositifs individuels de protection contre les radiations :

II.7.5.2.1. Combinaisons de protection

- **Combinaisons anti-radiations** : Elles offrent une barrière physique contre la contamination radioactive, bien que leur efficacité contre les rayonnements ionisants dépende du type de combinaison et du type de rayonnement.
- **Gants, bottes et casques spécialisés** : Ces équipements protègent les parties du corps les plus exposées lors des opérations en milieu radioactif.
-



Figure 5 : Combinaisons anti-radiations

II.7.5.2.2. Protection respiratoire

Les masques respiratoires équipés de filtres spécifiques sont utilisés pour éviter l'inhalation de particules radioactives lors des interventions dans des zones potentiellement contaminées :

- **Masques avec filtres HEPA** (High-Efficiency Particulate Air) qui capturent les particules radioactives en suspension dans l'air.

- **Appareils respiratoires autonomes (ARA)** en cas de risque d'exposition à des gaz radioactifs ou à des particules dangereuses en grande quantité. [20]



Figure 6 : Appareils respiratoires autonomes (ARA)

II.7.5.2.3. Dosimètres individuels

Chaque travailleur est équipé d'un **dosimètre** qui mesure en temps réel la dose de radiation reçue. Il existe différents types de dosimètres :

- **Dosimètre passif** : Mesure la dose cumulée pendant une période donnée (ex. dosimètre à film).
 - **Dosimètre actif** : Affiche la dose reçue en temps réel, permettant ainsi de suivre l'exposition au fur et à mesure du travail.
- Des **alarmes dosimétriques** peuvent être programmées pour émettre des alertes lorsque la dose reçue approche des limites admissibles. [21]



Figure 7 : Dosimètre passif



Figure 8 : Dosimètre actif

II.8. Surveillance et contrôle des zones de travail

II.8.1. Classification des zones de travail :

Le degré de contamination est lié directement aux zones de travail ; la contamination est très élevée dans la zone chaude c'est pour ça on a classé les zones de travail en différentes zones.

II.8.1.1. Zones contrôlées :

Toutes les zones dans lesquelles les personnes sont susceptibles de recevoir, dans les conditions normales de travail, pour l'organisme entier, une dose efficace supérieure à 6 mSv par an ou, pour les extrémités (mains, avant-bras, pieds, cheville), une dose équivalente supérieure à 3/10 de la limite fixée par le code de travail.

II.8.1.2. Zones surveillées : Zones où les niveaux de radiation sont faibles mais nécessitent tout de même une surveillance.



Figure 9 : Panneaux de danger Panneau Zone surveillée

II.8.1.3. Zone contrôlée verte :

- Pour l'exposition externe et interne de l'organisme entier, la dose efficace reçue en heure est comprise entre 0.065 et 0.25mSv (soit 7.5 et 25 μ Sv).
- Pour l'exposition externe des extrémités la dose équivalente reçue en heure est comprise entre 0.065 et 0.2mSv (soit 65 et 200 μ Sv).

Ces zones sont signalées à l'entrée par un trisecteur vert. La surveillance de l'exposition externe est assurée au moyen de dosimètre passifs et actif (appelés également dosimètre opérationnellement). L'accès est réservé aux travailleurs de catégorie A et B. exceptionnellement, des travailleurs non classés peuvent accéder à ces zones s'ils n'y réalisent pas d'intervention.



Figure 10 : Panneaux de danger zone contrôlée verte

II.8.1.4. Zones contrôlées à accès spécialement réglementé :

A l'intérieur de la zone contrôlée, si l'exposition est susceptible de dépasser certains débits de dose ou certains niveaux de contamination, le chef d'établissement délimite, s'il y a lieu, les zones spécialement réglementées ou interdites suivantes :

II.8.1.5. Zone jaune présente les caractéristiques suivantes :

- Pour l'exposition externe et interne de l'organisme entier, la dose efficace reçue en une heure est comprise en 0.025 et 2mSv (soit 25 et 2000 μ Sv).

- Pour l'exposition externe des extrémités (mains, avant-bras, pieds, chevilles), la dose équivalente reçue en une heure est comprise entre 0.2 et 50mSv (soit 200 et 50000 μ Sv).

Le débit d'équivalent de dose pour l'organisme entier ne doit pas dépasser 2mSv.h pour l'exposition externe de l'organisme entier.

Ces zones sont signalées à l'entrée par un trisecteur jaune. La surveillance de l'exposition externe est assurée au moyen de dosimètres passifs et actifs. L'accès est réservé, pour un temps limité, aux travailleurs de catégories A et B.



Figure 11 : Panneaux de danger zone contrôlée jaune

II.8.1.6. Zone rouge (ou interdite) :

La zone contrôlée rouge présente les caractéristiques suivantes :

- Pour l'exposition externe et interne de l'organisme entier, la dose efficace reçue en une heure est supérieure à 100 mSv ou dès lors que le débit d'équivalent de dose atteint 100 mSv/h .
- Pour l'exposition externe des extrémités (mains, avant-bras, chevilles), la dose équivalente reçue en heure est supérieure à 2.5 Sv.



Figure 12 : Panneaux de danger zone contrôlée rouge

Ces zones sont signalées à l'entrée par un trisecteur rouge et l'accès est rendu impossible par un dispositif matériellement infranchissable. Exceptionnellement et sur autorisation spécial du chef d'établissement, écrite et enregistrer, sur un registre ou dans un système informatisé régulièrement sauvegardé en précisant le nom de l'intervenant et la durée de l'intervention.

A plus forte raison, l'accès est interdit aux travailleurs aux contacts précaires (contrat à durée déterminée ou temporaire). [22]

II.8.2. Classification des travailleurs aux différentes catégories :

On tenu compte des risques lié à l'exposition aux rayonnements ionisants et dans un souci de protection maximale des travailleurs, le code du travail définit deux catégories des travailleurs auxquelles sont associées des valeurs limites d'exposition distinctes. La première dite catégorie A correspondons aux travailleurs susceptibles d'être les plus exposés, la seconde dite catégorie B recouvre tous les autres travailleurs exposés précédemment définis.

Pour les travailleurs de catégorie B, les valeurs à ne pas dépasser correspondent au 3/10 des limites quelles qu'elle soient de la catégorie A.

II.8.2.1. Les limites d'exposition fixées pour les travailleurs de catégorie A

Organisme entier	20 mSv
Peau (rapporté à 1cm ²)	500 mSv
Cristallin	150 mSv
Mains, avant-bras, pieds, chevilles	500 mSv

II.8.2.2. Les limites d'exposition fixées pour les travailleurs de catégorie B

Organisme entier	6 mSv
Peau (rapporté à 1cm ²)	150 mSv
Cristallin	45 mSv
Mains, avant-bras, pieds, chevilles	150 mSv

Quelles que soit leur catégorie, les limites pour le personnel féminin au travail sont identiques à celles du personnel masculin, sauf en cas de grossesse ou d'allaitement.[23]

II.9. L'organisation des secours

II.9.1. Le plan d'urgence interne (PUI) :

Le Plan d'Urgence Interne (PUI) d'une installation nucléaire est un document stratégique essentiel qui décrit les mesures et actions à entreprendre par l'exploitant de l'installation en cas d'incident ou d'accident nucléaire. Il a pour objectif de protéger le personnel, la population environnante et l'environnement en minimisant les conséquences d'un accident nucléaire.

II.9.1.1. Structure et Contenu du PUI

II.9.1.1.1. Identification des Scénarios d'Acciden

- Identification des situations pouvant générer une urgence, comme :

Fuite de matières radioactives.

Perte de refroidissement du réacteur.

Incendie ou explosion dans une zone sensible. Défaillance des systèmes de sûreté.

- Classification des incidents selon leur gravité (incident mineur, incident grave, accident majeur).

II.9.1.1. 2. Organisation des Interventions

- **Mise en place d'une équipe d'urgence interne :**

Chargée de gérer la crise dans les premières heures.

Composée de personnel formé pour intervenir sur les installations nucléaires.

Communication rapide avec les autorités de sûreté (ASSN en Algérie).

- **Équipe de commandement :** Responsable de la gestion stratégique de la crise (activation du plan d'urgence, priorisation des actions).

II.9.1.1. 3. Procédures d'Urgence

- **Alarme et Avertissement :**

Procédures pour activer rapidement les alarmes en cas d'urgence.

Notification immédiate aux autorités locales, à l'ASSN et aux services de secours.

- **Évacuation du Personnel :**

Plan d'évacuation détaillé pour l'ensemble du personnel de l'installation, avec des itinéraires et des points de rassemblement sûrs.

- **Confinement :**

Mise en place de procédures pour confiner les substances radioactives dans des zones spécifiques pour limiter les rejets.

- **Procédures de refroidissement d'urgence :**

Utilisation de systèmes de secours pour éviter la surchauffe du réacteur.

- **Surveillance radiologique :**

Surveillance constante des niveaux de radiation dans et autour de l'installation.

II.9.1.1. 4. Moyens Techniques

Description des équipements et moyens disponibles pour gérer une urgence, par exemple :

Systèmes de confinement : Barrières pour limiter les rejets radioactifs.

Systèmes de refroidissement d'urgence : Utilisation de systèmes alternatifs en cas de défaillance du système principal.

Moyens de communication : Radios, téléphones satellites, systèmes de communication internes.

Équipements de protection : Combinaisons anti-radiations, masques à gaz.

II.9.1.1. 5. Coordination avec les Autorités Externes

- **Liaison avec l'ASSN :** L'Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire doit être informée immédiatement pour superviser la gestion de la crise.
- **Collaboration avec les services de secours :** Pompiers, équipes médicales et de décontamination doivent être prêts à intervenir.
- **Coordination avec le Plan Particulier d'Intervention (PPI) :** Ce plan est déclenché par les autorités locales lorsque l'accident nucléaire a des conséquences à l'extérieur du site.

II.9.1.1. 6. Plan de Communication

Interne : Informer en temps réel tout le personnel de la situation et des actions à suivre.

Externe : Communication transparente avec les médias, les autorités locales, et la population environnante pour prévenir la panique.

II.9.1.1. 7. Exercices et Simulations

Le PUI doit être régulièrement testé par des exercices d'urgence (au moins une fois par an). Ces simulations permettent d'évaluer l'efficacité des procédures et de former le personnel à répondre rapidement et efficacement à une situation de crise.

II.9.1.1. 8. Retour d'Expérience (REX)

Après chaque incident ou exercice, un bilan doit être effectué pour identifier les points à améliorer et ajuster le PUI en conséquence.

Le (PUI) est un élément crucial dans la gestion des risques nucléaires. Il garantit que l'exploitant de l'installation nucléaire a des procédures claires et efficaces pour répondre rapidement et réduire l'impact d'un incident ou d'un accident. L'efficacité du PUI dépend non seulement de la qualité des procédures décrites mais aussi de la formation et de la préparation continue du personnel par le biais d'exercices réguliers. [24]

II.9.2. Le plan particulier d'intervention (PPI)

Le (PPI) est un plan de protection civile mis en place par les autorités publiques pour gérer les conséquences d'un accident nucléaire ou radiologique qui pourrait avoir des effets au-delà du périmètre d'une installation nucléaire. Ce plan s'articule avec le (PUI), mais à la différence de ce dernier, qui est de la responsabilité de l'exploitant de l'installation, le PPI est de la responsabilité des autorités publiques, telles que les préfets ou les gouverneurs, pour assurer la protection de la population environnante.

II.9.2.1. Contenu du PPI**II.9.2.1.1. Identification des Scénarios d'Accidents Majeurs**

- Le PPI est conçu pour répondre à différents scénarios d'accidents nucléaires, tels que :
Perte de confinement primaire entraînant des rejets radioactifs.
Incendie majeur dans une installation de stockage de matières radioactives.
Défaillance des systèmes de refroidissement du réacteur ou des systèmes de secours.

Explosion ou libération accidentelle de matériaux dangereux.

II.9.2.1.2. Zone d'intervention

Le PPI définit une zone d'urgence autour de l'installation nucléaire, généralement divisée en deux :

- Zone de Protection Immédiate (ZPI) : Une zone proche du site où des mesures immédiates de protection (confinement ou évacuation) peuvent être ordonnées.

- Zone de Protection Etendue (ZPE) : Une zone plus large où des mesures de protection différées peuvent être envisagées, comme la distribution de comprimés d'iode pour protéger la glande thyroïde contre les effets des rejets radioactifs.

II.9.2.1.3. Coordination des Acteurs

- Préfecture et autorités locales : En cas d'accident, les autorités locales, en collaboration avec les services de l'État, déclenchent le PPI et prennent les mesures appropriées.

- Services de secours : Les pompiers, la police, et les équipes médicales sont mobilisés pour intervenir sur le terrain.

- Autorités de sûreté nucléaire : En Algérie, c'est l'Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN) qui supervise la situation et conseille les autorités locales sur les mesures à prendre.

- Communication : Une cellule de communication de crise est mise en place pour informer en continu la population et les médias de l'évolution de la situation.

II.9.2.1.4. Mesures de Protection de la Population

• Le PPI prévoit des mesures adaptées à la gravité de la situation :

- Confinement : La population doit rester à l'intérieur, fermer portes et fenêtres et écouter les consignes des autorités.

- Évacuation : Pour les zones proches du site où le risque est élevé, une évacuation organisée par les autorités est possible.

- Distribution de comprimés d'iode : Des comprimés d'iode sont distribués pour saturer la glande thyroïde et limiter l'absorption d'iode radioactif.
- Contrôle des produits alimentaires et de l'eau : Des contrôles stricts sont effectués sur les aliments et l'eau pour détecter toute contamination radioactive.

II.9.2.1.5. Formation et Exercices

Le PPI doit être testé régulièrement à travers des exercices de simulation pour s'assurer que les autorités et les services d'urgence sont prêts à intervenir en cas de crise. Ces exercices permettent également de sensibiliser la population aux comportements à adopter en cas d'urgence nucléaire.

Le (PPI) est un mécanisme de gestion des situations d'urgence pour les installations nucléaires, géré par les autorités publiques. Il permet de répondre efficacement aux accidents nucléaires et de protéger la population et l'environnement. En Algérie, l'élaboration et la mise en œuvre du PPI reposent sur une coordination étroite entre l'ASSN, les services de secours et les autorités locales, avec des procédures claires et régulièrement testées. [25]

II.9.3. Le plan ORSEC

Le **Plan ORSEC** (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) pour une installation nucléaire est un plan de gestion de crise spécifique aux risques technologiques majeurs, dont les accidents nucléaires. Il a pour objectif d'organiser l'intervention des différents acteurs de la sécurité civile face à une situation d'urgence. Ce plan est activé par les autorités lorsque la situation dépasse les capacités de gestion courante d'un incident ou d'un accident. Il s'applique aux installations nucléaires de base (INB), notamment les réacteurs nucléaires, les centres de traitement de déchets radioactifs, ou toute autre infrastructure manipulant des matières radioactives.

II.9.3.1. Structure du Plan ORSEC Nucléaire

Le **Plan ORSEC** pour les installations nucléaires se déploie à trois niveaux :

Niveau Local:

- Le plan est géré par la préfecture, en étroite collaboration avec les services de secours locaux (pompiers, police, hôpitaux).
- Il peut inclure des mesures de confinement immédiat pour les populations proches, ainsi que des actions pour garantir la protection des travailleurs dans les installations nucléaires.

Niveau Régional:

- Le gouverneur de la région peut prendre des mesures plus larges, notamment l'évacuation de zones plus étendues en cas de contamination radioactive significative.
- Les hôpitaux régionaux sont préparés pour accueillir les victimes de radiations et traiter les blessures ou maladies liées à une exposition aux rayonnements.

Niveau National :

- Le gouvernement coordonne les efforts de réponse à travers différents ministères (santé, intérieur, environnement). Les forces armées peuvent être mobilisées pour apporter un soutien logistique et technique.
- L'Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN) joue un rôle de conseiller pour l'évaluation des risques et la gestion de l'accident.[26]

II.9.3.2. Phases du Plan ORSEC

Le Plan ORSEC Nucléaire s'articule autour de plusieurs phases d'intervention :

Alerte et mobilisation : Lorsqu'un accident survient ou qu'il existe un risque d'incident nucléaire, un processus d'alerte est lancé pour mobiliser les ressources nécessaires. L'alerte est donnée aux populations via des sirènes, des messages d'urgence et des notifications par téléphone mobile.

Intervention initiale : Les premières mesures d'urgence sont prises pour protéger les travailleurs de l'installation ainsi que la population environnante. Cela inclut l'établissement d'une zone de sécurité, la mise en place de barrages routiers, et l'envoi d'équipes d'évaluation des radiations.

Gestion de l'urgence : Les services d'urgence se coordonnent pour limiter les conséquences de l'accident. Les pompiers interviennent pour contrôler tout incendie ou explosion, tandis que les équipes spécialisées mesurent le taux de radioactivité.

Décontamination et suivi : Une fois la situation maîtrisée, des équipes spécialisées se chargent de la décontamination des personnes, des bâtiments, et des terrains affectés. Des contrôles réguliers de la radioactivité sont effectués pour surveiller la situation à long terme.

II.9.3.3. Acteurs impliqués dans le Plan ORSEC

Autorités locales : La gestion est assurée par la préfecture, qui coordonne les services de sécurité civile et les autorités sanitaires locales.

Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN) : Elle fournit des recommandations techniques sur la gestion des accidents nucléaires.

Services de secours : Les pompiers, les équipes médicales et les forces de l'ordre sont mobilisés pour intervenir rapidement.

Forces armées : Si la situation l'exige, l'armée peut être appelée en renfort pour sécuriser la zone et apporter un soutien logistique.

Le Plan ORSEC pour une installation nucléaire est une réponse coordonnée aux risques technologiques majeurs, mettant en œuvre des ressources humaines et matérielles considérables pour protéger la population, limiter la contamination environnementale et assurer la gestion d'une crise nucléaire.[27]

II.10. L'information de la population

En Algérie, l'information de la population en cas de crise nucléaire est une priorité pour les autorités, car elle permet de prévenir la panique, de guider les comportements et de minimiser les risques pour la santé publique. Ce processus inclut des documents d'information disponibles en temps normal et des protocoles spécifiques d'information en cas de crise.

II.10.1. Les documents d'information

Les documents d'information comprennent des brochures, des guides, et des affiches distribuées par les autorités compétentes, telles que l'Autorité Algérienne de Sûreté et de Sécurité Nucléaire (ASSN). Ces documents expliquent les risques liés à l'énergie nucléaire, les mesures de protection, et les actions à entreprendre en cas d'urgence.

- Brochures et guides : Ces documents sont régulièrement mis à jour et distribués dans les zones proches des installations nucléaires. Ils expliquent les procédures de confinement, l'importance de l'absorption de pastilles d'iode, et les consignes d'évacuation.
- Affiches d'information : Affichées dans les lieux publics, elles rappellent les consignes de sécurité et les numéros d'urgence à contacter.

II.10.2. L'information en temps normal

En temps normal, l'information est assurée par des campagnes de sensibilisation et d'éducation. Les autorités organisent des sessions d'information, des exercices de simulation d'incidents nucléaires, et diffusent des informations via les médias nationaux.

- Campagnes de sensibilisation : Elles sont menées régulièrement pour éduquer la population sur les risques nucléaires et les mesures de sécurité à respecter.
- Exercices de simulation : Organisés périodiquement, ces exercices visent à préparer la population et les services d'urgence à réagir efficacement en cas d'incident.

II.10.3. L'information en cas de crise

Lorsqu'une crise nucléaire survient, l'information de la population est gérée de manière centralisée par les autorités, en collaboration avec les médias. Le but est de fournir des informations précises et continues pour permettre à la population de réagir adéquatement.

- Communiqués d'urgence : En cas d'incident, des communiqués officiels sont immédiatement diffusés via la radio, la télévision, et les réseaux sociaux pour informer la population des mesures à prendre.
- Cellules de crise : Elles sont activées pour centraliser les informations et coordonner les actions des différents acteurs (services de secours, forces de l'ordre, etc.).

II.10.4. Les consignes à appliquer

Les consignes à appliquer en cas de crise nucléaire sont établies pour protéger la santé publique. Elles incluent principalement le confinement, l'absorption de pastilles d'iode, et l'évacuation si nécessaire.

II.10.4.1. Le confinement

Le confinement est la première mesure à prendre en cas de crise nucléaire. Il consiste à rester à l'intérieur des bâtiments pour éviter l'exposition aux radiations. Les bâtiments offrent une barrière contre les particules radioactives et réduisent l'inhalation d'air contaminé.

Fermer les fenêtres et les portes : Il est conseillé de sceller les ouvertures pour empêcher les particules radioactives de pénétrer à l'intérieur.

Arrêter la ventilation : Les systèmes de ventilation doivent être coupés pour éviter d'introduire l'air extérieur potentiellement contaminé.

II.10.4.2. L'absorption de pastille d'iode

L'absorption de pastilles d'iode est une mesure préventive destinée à saturer la thyroïde en iode stable, réduisant ainsi l'absorption d'iode radioactif par cet organe. Cette mesure est recommandée principalement pour les populations vivant à proximité des centrales nucléaires.

Distribution de pastilles : En cas de crise, les autorités organisent la distribution de pastilles d'iode dans les zones concernées.

Moment de l'absorption : Les pastilles doivent être prises dès que l'exposition est imminente, selon les instructions des autorités.[28]

II.10.5. L'indemnisation

L'indemnisation des victimes en cas de crise nucléaire est prévue par la législation algérienne, en conformité avec les standards internationaux. Elle couvre les dommages corporels, matériels, et éventuellement les pertes économiques liées à l'incident.

Indemnisation des dommages corporels : Les victimes exposées aux radiations peuvent recevoir une compensation pour les soins médicaux, ainsi que pour les séquelles à long terme.

Réparation des dommages matériels : Les biens endommagés par un incident nucléaire (habitations, véhicules, etc.) sont éligibles à une indemnisation selon les conditions établies par les autorités.

Perte économique : Dans certains cas, une compensation est prévue pour les pertes de revenus dues à l'évacuation ou à l'interdiction d'exploiter des terres contaminées.[29]

II.10.6. Conclusion

Le réacteur nucléaire, élément central des installations modernes, produit de l'énergie via la fission nucléaire, un processus convertissant l'énergie des noyaux atomiques en électricité. Ce mécanisme complexe exige une gestion stricte des risques pour assurer la sécurité des installations. Les normes internationales et nationales encadrent chaque étape, de la conception au démantèlement, avec une surveillance continue en Algérie par des organismes de contrôle.

La prévention des accidents repose sur des plans d'urgence, des dispositifs de confinement et des protections contre les rayonnements pour minimiser les risques. La sûreté des réacteurs dépend ainsi du respect des normes, des mesures de prévention et de la préparation aux situations d'urgence. L'amélioration continue de ces mesures vise à garantir un usage sécurisé et responsable de l'énergie nucléaire.

Chapitre III

Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

III.1. Introduction

Le risque nucléaire est l'une des préoccupations majeures de notre époque. Depuis la découverte de la fission au début du XXe siècle, l'énergie nucléaire s'est révélée à la fois comme une source importante d'énergie et une menace potentielle pour l'humanité. Bien que la production d'électricité nucléaire contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, les accidents tels que Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011 illustrent les dangers considérables qu'elle peut représenter. De plus, la gestion des déchets radioactifs, la prolifération des armes nucléaires et les impacts environnementaux à long terme soulèvent des questions cruciales sur la durabilité de cette énergie. Une approche globale, intégrant aspects scientifiques, technologiques, politiques et sociaux, est essentielle pour gérer ces risques tout en tirant parti des avantages de l'énergie nucléaire.

III.2. Le phénomène

Le risque nucléaire désigne la probabilité et les conséquences potentielles des événements indésirables liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire et des matières radioactives ils se divisent principalement en deux catégories : le risque d'irradiation et le risque de contamination. Chacun de ces risques présente des dangers spécifiques pour la santé humaine, l'environnement et les infrastructures.

III.3 Risque d'Irradiation

L'irradiation survient lorsqu'une source radioactive émet des rayonnements ionisants sur les êtres vivants. Ce genre de lumière peut entrer dans les tissus biologiques et causer des dommages aux cellules et à l'ADN, ce qui peut avoir différents effets sur la santé.

Types de Rayonnements : Les rayons alpha, bêta, gamma et les neutrons sont des rayonnements ionisants. Chaque catégorie présente ses propres capacités de pénétration et ses propres niveaux de danger.

Effets à Court Terme : Le syndrome d'irradiation aiguë (SIA) est une exposition aiguë à des niveaux élevés de rayonnement qui se traduit par des nausées, des vomissements, une fatigue extrême et, dans les cas graves, la mort.

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

Effets à Long Terme : Une exposition prolongée ou répétée à des doses de rayonnement plus faibles peut augmenter le risque de cancer, de maladies cardiovasculaires et d'autres problèmes de santé chroniques.[30]



Figure 1 : Risque d'Irradiation

III.4. Risque de Contamination

La contamination se produit lorsque des substances radioactives sont libérées dans l'environnement, se déposant sur les surfaces, les objets et les êtres vivants. Contrairement à l'irradiation, la contamination implique la présence de matières radioactives sur ou à l'intérieur du corps.

-Contamination Interne : Cela se produit lorsque des substances radioactives sont inhalées, ingérées ou absorbées par la peau. Les particules radioactives peuvent alors émettre des radiations à l'intérieur du corps, causant des dommages cellulaires et des effets sanitaires similaires à ceux de l'irradiation.

- Contamination Externe : Dans cette situation, la substance radioactive est présente sur la peau, les cheveux ou les ongles de la personne exposée. Les émetteurs de rayonnements bêta (β) sont les radionucléides les plus inquiétants, car ils vont attaquer spécifiquement les cellules très radiosensibles qui contribuent au renouvellement de l'épiderme. Il en va de même pour de nombreux produits de fission, les rejets radioactifs (xénon 133, césium 137, strontium 90, iode 131...) et quelques transuraniens (comme le neptunium 239 et le plutonium 241) sont principalement composés de ces substances. En plus du risque d'exposition à l'irradiation de la peau, il existe également le risque de transformer une contamination externe en contamination interne. Cela peut survenir en cas de lésion cutanée ou plus rarement à travers la peau intacte, mais le plus souvent par le transfert des particules radioactives des surfaces contaminées vers les doigts, puis des doigts vers le nez et la bouche.[31]

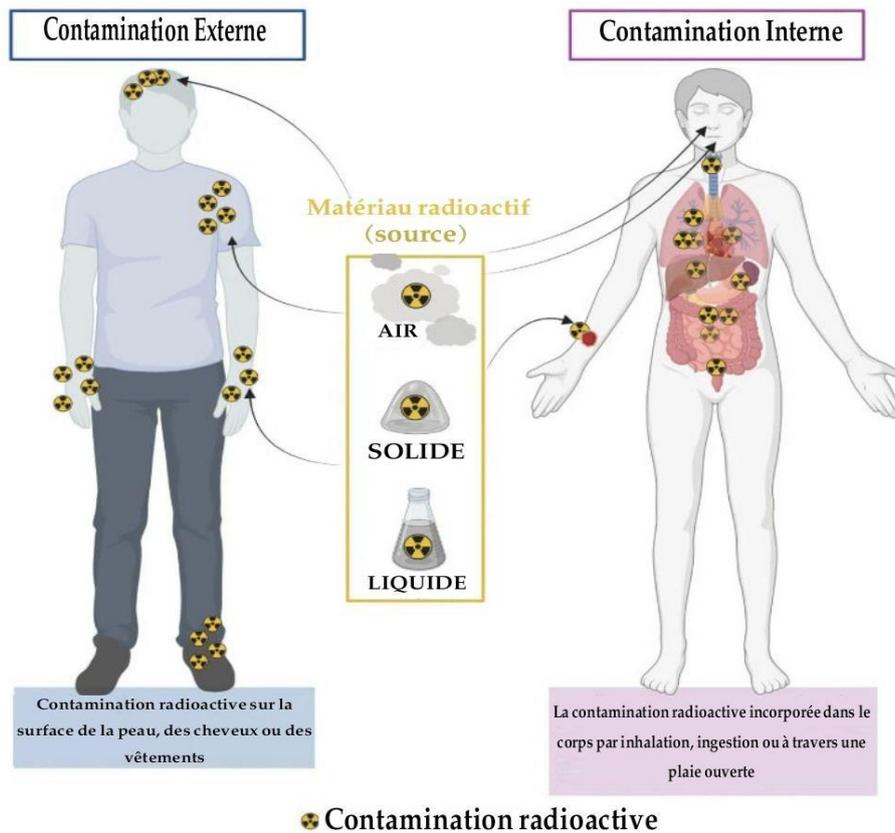


Figure 2 : Risque de Contamination interne et externe

III.5. Dose absorbée et débit de dose absorbée :

Pour évaluer l'impact biologique d'une irradiation, ce qui est l'objet de la « dosimétrie », il est donc logique de mesurer le phénomène qui en est responsable, c'est-à-dire l'énergie transmise aux tissus par le rayonnement. La dose absorbée est une grandeur dosimétrique introduite dans le but de mesurer les effets des rayonnements. La quantité absorbée est définie comme l'énergie ΔE transmise à une masse Δm de matière dans un matériau irradié de manière homogène, divisée par cette masse Δm , ainsi.

$$D_a = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Si dans la formule définissant la dose absorbée, on exprime l'énergie ΔE en joules et la masse Δm en kilogrammes, la dose absorbée sera exprimée en joule par kilogramme (j/kg^{-1}).

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

En fait, les spécialistes en dosimétrie ont donné un nom particulier à l'unité de dose absorbée: c'est le gray (Gy).

$$1 \text{ gray} = 1 \text{ joule par kg} \quad (1\text{Gy} = 1\text{j} / \text{kg})$$

La dose absorbée caractérise donc la quantité d'énergie qu'aura reçue un matériau irradié pendant le temps qu'a duré cette irradiation. Mais le temps peut être plus ou moins long et donc le rythme auquel a été délivrée cette énergie plus ou moins rapide. Ce rythme est alors caractérisé par la grandeur appelée « débit de la dose absorbée » ($D^{\circ}a$), qui est définie comme le quotient de la dose absorbée par le temps durant lequel elle a été délivrée. On aura donc :

$$D^{\circ}a = \frac{Da}{t}$$

Et on exprimera ce débit de dose absorbée le plus souvent en gray par heure (Gy/h) ou en gray par minute ou seconde (Gy/min, Gy/s).[32]

III.6. Transfert linéique d'énergie

Comme on l'a vu, la dose absorbée caractérise l'énergie que le rayonnement cède à un tissu qu'il irradie, énergie qui est responsable des perturbations apportées dans le fonctionnement des cellules de ce tissu, donc de l'effet biologique des rayonnements. Regrettant, les radiobiologistes ont rapidement réalisé que la dose absorbée n'était pas adéquate pour expliquer cet effet biologique. Ils ont observé que cet effet variait en fonction de la dose absorbée, en fonction du type de rayonnement à l'origine de l'irradiation. En d'autres termes, une dose absorbée de 1 Gy n'a pas d'effet dans un tissu, que ce soit des rayonnements α ou des rayonnements γ qui en sont à l'origine. Il y a donc des facteurs autres que l'énergie transférée qui interviennent. En réalité, il a été constaté que non seulement l'énergie cédée au milieu irradié était impliquée, mais aussi la façon dont celle-ci était cédée.

À dose absorbée égale, les radiobiologistes ont observé que le dommage biologique était plus élevé si l'énergie était transmise par quelques gros paquets plutôt que par un grand nombre de petits paquets. Contrairement à une multitude de piqûres d'épingles, l'effet d'une seule balle est plus sévère. Afin d'évaluer physiquement la transmission d'énergie par un

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

rayonnement à un matériau irradié, une grandeur a été introduite, connue sous le nom de transfert linéique d'énergie (TLE).

La quantité d'énergie que cède une particule chargée (β , p , α) lors de son parcours, par unité de parcours, est connue sous le nom de TLE.

$$L = \frac{DE}{dx}$$

On exprime en général la perte d'énergie en kiloélectronvolt (keV) et le parcours en micron (μm) : le transfert d'énergie sera donc exprimé en keV/ μm .

Selon sa définition, le rayonnement directement ionisant (TLE) ne semble être présent que pour des particules chargées. En ce qui concerne les rayonnements qui ne sont pas directement ionisants (X, γ , neutrons), il a été observé que ces rayonnements transmettaient leur énergie au matériau traversé en utilisant des particules chargées secondaires qu'ils propulsaient lors de leurs interactions primaires avec les atomes. En réalité, le TLE de ces rayonnements non directement ionisants correspondra au TLE de ces particules secondaires (électrons pour les rayons X et γ , protons principalement pour les neutrons). Le tableau 1 présente certaines valeurs de ces TLE. Il est évident que les rayonnements présentent de faibles TLE, tandis que les α , voire les neutrons, présentent des TLE élevés. Cela implique que, de manière biologique, les rayonnements γ à des doses absorbées équivalentes seront moins préjudiciables aux tissus vivants que les rayonnements α ou neutrons.[33]

Tableau 1 - Quelques valeurs des transferts linéiques d'énergie

Type de rayonnement	TLE en keV/ μm (dans l'eau)
Rayons γ	0,36
Rayons X (> 200 keV)	3.2
α (5MeV)	140
Neutrons (10 MeV)	35

III.7. Groupes de radiotoxicité

Les groupes de radiotoxicité classifient les radionucléides en fonction de leur dangerosité pour l'organisme humain lorsqu'ils sont ingérés ou inhalés. Cette classification aide à

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

déterminer les précautions nécessaires lors de la manipulation de ces substances et les mesures de protection à adopter.

III.7.1. Classification des Groupes de Radiotoxicité

Les radionucléides sont classés en quatre groupes de radiotoxicité selon leur potentiel de danger pour la santé :

III.7.2. Groupe 1 : Très forte radiotoxicité

Ce groupe comprend les radionucléides les plus dangereux, qui présentent un risque élevé même en très petites quantités. Ils nécessitent des mesures de protection très strictes et sont souvent manipulés dans des environnements hautement contrôlés.

Tableau 1 : Groupe 1 - Très Forte Radiotoxicité

Radionucléide	Symbole	Type de Rayonnement Principal
Plutonium-239	Pu-239	Alpha
Curium-242	Cm-242	Alpha
Americium-241	Am-241	Alpha
Radium-226	Ra-226	Alpha

III.7.3. Groupe 2: Forte radiotoxicité

Les radionucléides de ce groupe sont également dangereux, mais légèrement moins que ceux du Groupe 1. Ils nécessitent des précautions importantes, surtout en cas de manipulation régulière ou de stockage.

Tableau 2 : Groupe 2 - Forte Radiotoxicité

Radionucléide	Symbole	Type de Rayonnement Principal
Strontium-90	Sr-90	Bêta
Césium-137	Cs-137	Bêta, Gamma
Iode-131	I-131	Bêta, Gamma

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

Uranium-235	U-235	Alpha, Gamma
-------------	-------	--------------

III.7.4. Groupe 3 : Moyenne radiotoxicité

Ces radionucléides présentent une radiotoxicité modérée. Les mesures de protection doivent être adaptées selon les quantités manipulées et les types d'exposition possibles.

Tableau 3 : Groupe 3 - Moyenne Radiotoxicité

Radionucléide	Symbole	Type de Rayonnement Principal
Tritium	H-3	Bêta
Carbone-14	C-14	Bêta
Technétium-99m	Tc-99m	Gamma
Iode-123	I-123	Gamma

III.7.5. Groupe 4 : Faible radiotoxicité

Ce groupe regroupe les radionucléides ayant une faible radiotoxicité. Ils sont moins dangereux que ceux des autres groupes, mais des précautions sont tout de même nécessaires pour éviter une exposition prolongée ou accidentelle.[34]

Tableau 4 : Groupe 4 - Faible Radiotoxicité

Radionucléide	Symbole	Type de Rayonnement Principal
Carbone-11	C-11	Bêta+
Fluor-18	F-18	Bêta+
Phosphore-32	P-32	Bêta
Technétium-99	Tc-99	Bêta

III.8. Effets biologiques des rayonnements :

III.8.1. Effets aux niveaux moléculaire

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

Sans entrer dans le détail de l'action des rayonnements sur les cellules et les tissus, ce qui est du domaine de la radiobiologie, il est cependant utile d'avoir une vue un peu plus précise sur les processus de dégradation cellulaire par l'effet des rayonnements ionisants.

Action directe : De cette manière, les rayonnements entraînent des ionisations et des excitations d'atomes qui font partie de molécules qui peuvent jouer un rôle crucial dans le fonctionnement de la cellule, notamment la molécule d'ADN. L'action directe se produit lorsque l'équilibre est rétabli, ce qui entraîne l'émission de photons de fluorescence et éventuellement la rupture d'une liaison de covalence dans la molécule.

Action indirecte : L'eau représente près de 80% du poids de l'organisme humain. L'action des rayonnements sur ces molécules d'eau se traduit par une radiolyse qui aboutit à l'apparition de radicaux libres », qui sont des fragments d'atomes ou de molécules portant sur leur couche électronique périphérique un ou plusieurs électrons dits célibataires », c'est-à-dire non appariés à un autre électron. Lors de la radiolyse de l'eau, on voit apparaître principalement des radicaux HO° et H° . Ces radicaux sont particulièrement réactifs chimiquement : HO° est un oxydant puissant, à l'inverse H° est réducteur.

Ces radicaux se propageront sur de courtes distances, mais pendant leur cheminement, ils pourront exercer une action chimique sur les molécules voisines et, éventuellement, sur la molécule d'ADN, ce qui peut entraîner une altération de celle-ci, comme une rupture de la chaîne des éléments qui la composent. En réalité, ces radicaux ont une durée de vie très courte (10s), ce qui signifie que leur distance de diffusion est très courte. Seuls les radicaux générés à une distance limitée de la double hélice d'ADN pourront modifier celle-ci.

- À l'heure actuelle, il est admis que les actions directes et indirectes sont au même titre responsable des dommages causés par les rayonnements ionisants aux cellules d'un tissu irradié.[35]

III.8.2. Effet au niveau cellulaire :

Bien que les lésions de l'ADN puissent être réparées, certaines peuvent être irréversibles. Dans cette situation, cela pourra se manifester de diverses manières : La cellule ne peut pas se reproduire, ce qui entraîne la mort de celle-ci : Une reproduction de la cellule implique des modifications constantes de l'ADN, ce qui entraîne des modifications dans le patrimoine héréditaire. Il y a donc une mutation génétique et, si elle concerne une cellule germinative, une anomalie héréditaire peut être

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

présente. Lorsqu'il s'agit d'un autre type de cellule, celle-ci peut présenter des caractéristiques qui favorisent la formation de cancérogènes. Il est donc supposé que des tissus jeunes ou se reproduisant rapidement (cellules germinatives, tissus hématopoïétiques...) sont plus sensibles à la radioactivité et que, d'autre part, certains effets ne se manifestent qu'après.[36]

III.8.3. Effets sur l'homme

Les rayonnements ont un impact sur les tissus qui forment les organes d'un être vivant, ce qui est le résultat de la combinaison des effets cellulaires. Les effets sur l'homme varient en fonction des organes ou des tissus irradiés. On a également observé que la date d'apparition de l'effet peut varier selon les organes ou les tissus irradiés. Certains effets sont immédiats ou précoces (de quelques heures à quelques semaines), tandis que d'autres sont tardifs et peuvent survenir après plusieurs années (leucémies), plusieurs dizaines d'années (cancers divers) ou même plusieurs générations (effets génétiques).

Effets déterministes : Ce sont des effets qui surviennent systématiquement à partir d'un certain seuil. Leur gravité est proportionnelle à la dose reçue. On les appelle aussi effets « non aléatoires ou non stochastiques ». La valeur du seuil dépend de l'effet considéré et également de la distribution dans le temps de la dose reçue : la valeur du seuil est plus élevée lorsque la dose est étalée dans le temps que lorsqu'elle est délivrée instantanément.

Les conséquences de l'irradiation varient en fonction de l'importance de celle-ci, allant de la simple modification de la formule sanguine à l'apparition de certains troubles (mal des rayons) tels que des malaises, des nausées et des vomissements, jusqu'au décès de la personne à l'irradiation (dose létale 50 environ 4 à 5 Gy, dose d'irradiation qui provoque la mort dans 50% des cas) Ces effets ne se manifestent que lorsque l'organisme entier est soumis à des irradiations importantes (au-dessus de 0,2 Gy). Si une irradiation partielle concerne un seul organe, les effets sont moins graves, comme on peut le voir par exemple en fonction de l'importance de la dose d'irradiation et de l'organe en question :

- Pour la peau, les symptômes physiques d'une brûlure sont généralement accompagnés d'un érythème (coup de soleil).

- pour les testicules, une baisse passagère du nombre de spermatozoïdes peut apparaître au-dessus de 0,5 Gy.

• **Effets non déterministes :**

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

C'est ce que l'on appelle les effets aléatoires (« stochastiques »). Ils ont une nature probabiliste et semblent se distribuer de manière aléatoire. Leur fréquence d'apparition est liée à la dose, mais leur gravité n'est pas liée à la dose.

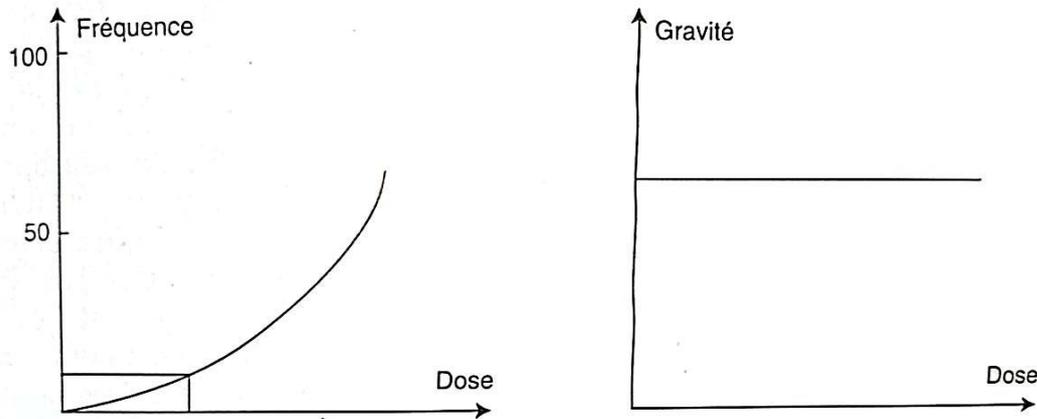


Figure 3 - Les effets aléatoires en fonction de la dose

Les effets aléatoires ne se produisent que chez certains individus d'une population exposée ; ils ne se produisent qu'après un temps de latence plus ou moins long selon l'effet considéré, mais toujours long ; enfin, ils sont non spécifiques, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de façon de différencier l'effet produit par les rayonnements du même effet produit par un autre type d'atteinte ou celui qui se produit spontanément dans une population donnée sans cause connue. Les effets cancérogènes et les effets génétiques sont les deux principaux facteurs aléatoires.[37]

III.8.4. Effets cancérogènes

En réalité, l'émergence d'un cancer après une exposition aux rayonnements est un phénomène complexe qui comprend de nombreuses étapes successives qui ne sont pas interdépendantes les unes des autres. Le rôle du dysfonctionnement du système oncogènes-antioncogènes identifiés dans les chromosomes des cellules animales et humaines a été mis en lumière par les études les plus récentes. Différentes altérations non ou mal réparées de ces gènes se produisent simultanément à des moments différents, en raison de l'action d'agents différents, dont les rayonnements pourraient finalement entraîner ce dysfonctionnement et entraîner l'apparition d'un cancer. Une telle méthode permet de saisir notamment le long laps de temps qui peut s'écouler entre l'irradiation et l'apparition du cancer. Ce délai varie en fonction du type de cancer détecté. Les leucémies ont une durée

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

moyenne de 5 à 7 ans et les autres tumeurs n'ont jamais une durée inférieure à 10 ans, pouvant atteindre 40 ans pour certains types de cancers.[38]

III.8.5. Facteurs influençant la fréquence des cancers radio-induits

La dose et le débit de dose sont les facteurs principaux. Toutes les enquêtes épidémiologiques portent sur les irradiations à fortes doses et forts débits de dose et nous verrons ultérieurement les problèmes posés par l'utilisation de ces observations, dans le domaine de la radioprotection et de la fixation des normes, domaines qui concernent, rappelons-le, les doses faibles délivrées à faible débit de dose.

-La nature des rayonnements : les observations confirment bien qu'à doses absorbées égales les neutrons sont plus nocifs que les X et les gammas.

-La partie du corps et la nature des tissus irradiés : conditionnent bien évidemment les types de cancers observés avec leur temps de latence et l'existence éventuelle de seuils pratiques. -Le sexe : la radiosensibilité semble plus importante chez la femme que chez l'homme.

-L'âge : les enfants et les personnes âgées sont plus radiosensibles que les adultes jeunes.[39]

III.8.6. Effets génétiques

Les rayonnements ionisants ont un effet mutagène, comme de nombreuses substances chimiques et autres agents physiques. Ce phénomène a été découvert en 1927 chez la mouche drosophile et beaucoup étudié chez la souris. Les anomalies génétiques se classent en anomalies chromosomiques (nombre ou structure des chromosomes) et anomalies génétiques (affectant un ou plusieurs gènes sans altération de la morphologie des chromosomes).

Les sources d'information incluent :

1. Expérimentation animale : principalement sur la souris, avec des doses de 2 à 6 Gy administrées sur plusieurs générations (jusqu'à 100). Les résultats montrent une baisse de fécondité mais pas d'augmentation significative des anomalies génétiques. La dose doublante, ou la dose qui double la fréquence des anomalies génétiques spontanées, est estimée à 1 Gy.

Chapitre III. Effets de l'activité nucléaire sur la santé humaine

2. Enquêtes épidémiologiques : la plus notable concerne les survivants d'Hiroshima et Nagasaki. Une comparaison entre 30 000 enfants de parents irradiés et 40 000 enfants de parents non irradiés n'a montré aucune augmentation des anomalies génétiques. Des enquêtes sur les descendants de radiologistes ou de patients traités par radiothérapie, et sur des populations exposées à une irradiation naturelle élevée, n'ont pas non plus montré de résultats significatifs.

Donc, bien que les rayonnements ionisants aient un effet génétique, leur impact est très faible comparé aux effets spontanés. Cependant, ce risque n'est pas négligé dans les normes de radioprotection.[40]

III.8.7. Effets tératogènes

Ce terme fait référence aux anomalies et aux malformations qui se produisent suite à l'action d'agents différents, tels que les rayonnements ionisants, sur le fœtus ou l'embryon pendant la fertilité. Il est donc important de distinguer les anomalies congénitales des anomalies génétiques causées par des agressions survenues avant la fécondation. Quant aux rayonnements ionisants, les études humaines sont peu nombreuses et inexactes. Nous nous basons donc surtout sur l'expérimentation animale dont l'application à l'homme doit bien sûr être faite avec précaution. Les propriétés tératogènes des rayonnements ionisants sont les suivantes :

- La sensibilité du fœtus ou de l'embryon est beaucoup plus élevée que celle de l'enfant après sa naissance : la sensibilité à la radio varie en fonction du stade de développement de l'embryon et est d'autant plus grande que le stade est précoce ; les différents effets tératogènes sont permanents. Ainsi, les conséquences observées sont les suivantes :
 - conséquences fatales, que ce soit par fausse-couche ou par augmentation de la mortalité prénatale et postnatale.
- L'effet leucémogène des rayonnements semble être trois à quatre fois plus important chez le fœtus en fin de grossesse que chez l'adolescent ou l'adulte, selon les résultats de diverses enquêtes. Pour une dose de 0,02 Gy, la fréquence ajoutée serait de 0,05%.[41]

III.9. Conclusion

La gestion des risques technologiques, ainsi que leur perception par les individus et les entreprises, revêt une grande importance. L'évaluation des risques permet d'ajuster les critères de sûreté des installations industrielles et de situer le risque nucléaire par rapport à d'autres dangers en mesurant sa gravité. Dans le domaine nucléaire, des commissions internationales, comme la CIPR, ont mis en place des systèmes de limitation des expositions aux rayonnements. Leur objectif est de garantir que les travailleurs et le public soient exposés à des niveaux de radiation aussi bas que raisonnablement possible.

Chapitre IV

Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

IV.1. Introduction

La perception du risque par un individu dépend de nombreux facteurs, tels que ses connaissances, son expérience, ainsi que des éléments liés au contexte sociétal et à la nature du risque. L'analyse des risques vise à améliorer la sûreté en se basant sur trois étapes : l'estimation, l'évaluation et la gestion des risques. Elle permet d'identifier les principaux facteurs de risque, d'analyser les conséquences potentielles et de mettre en place des mesures pour les maîtriser. Ce chapitre présente l'entreprise CRNB, où nous avons réalisé notre stage, et propose une analyse des risques présents en utilisant la méthode APR pour leur estimation et prévention.

IV.2. Présentation de l'entreprise (Centre de Recherche Nucléaire de Birine):

IV.2.1. Mission de entreprise :

Le CRNB, créé le 15 Avril 1999 par Décret Présidentiel n° 99 – 86, est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre des programmes de recherche scientifiques et Techniques nécessaires au développement de la physique et des technologies des réacteurs, de l'instrumentation et du contrôle d'installations nucléaires, des techniques et processus de production de radio-isotopes, des applications neutroniques, de la sûreté nucléaire et de l'environnement, de la gestion et du traitement des déchets radioactifs.

Il est d'autre part, chargé d'assurer l'exploitation sûre des installations nucléaires en place. En outre, le centre participe dans les conditions et selon les modalités prévues par la réglementation en vigueur, à la formation de techniciens, ingénieurs et chercheurs dans les domaines d'activités spécifiques du centre ainsi qu'à celle d'opérateurs de réacteurs nucléaires. Le centre est un établissement public à caractère spécifique, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Il est régi par les règles applicables à l'administration dans ses relations avec l'état et est réputé commerçant dans ses rapports avec les tiers. L'organisation interne du centre est fixée par arrêté pris sur proposition du commissaire à l'énergie atomique. Le centre est dirigé par un directeur général assisté d'un secrétaire général.

IV.2.4.1. Divisions réacteurs :

- ▶ Conduite des opérations sur les installations ;
- ▶ Planification et la gestion de l'exploitation et l'utilisation du réacteur ;
- ▶ La maintenance spécifique

IV.2.4.2. Division des Techniques et Applications Nucléaires :

- ▶ Analyse par activation neutronique
- ▶ Spectrométrie neutronique
- ▶ Dopage du Silicium,
- ▶ Neutronographie
- ▶ Production de radio-isotopes
- ▶ Physique nucléaire

IV.2.4.3. Division Sûreté et Radioprotection Nucléaires :

- ▶ Sûreté nucléaire et radioprotection,
- ▶ Gestion des déchets radioactifs
- ▶ Surveillance de l'environnement ;
- ▶ Radioprotection des installations nucléaires.

IV.2.4.4. Division de Technologie Nucléaire :

- ▶ Physique des réacteurs,
- ▶ Thermo-hydraulique nucléaire,
- ▶ Turbo-machines,
- ▶ Etudes mécaniques,

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

- ▶ Essais des matériaux post-irradiation,
- ▶ Chimie des réacteurs,
- ▶ Engineering.

IV.2.4.5. Division des Services Techniques Spécialisés :

- ▶ Maîtrise d'ouvrage pour les projets de construction du Centre.
- ▶ Assistance technique aux structures de recherche.
- ▶ Gestion des utilités communes du centre.
- ▶ Maintenance hors installations nucléaires
- ▶ Gestion des systèmes informatiques et réseaux de communication

IV.2.5. Service De Sécurité Industrielle :

IV.2.5.1. La sécurité du travail dans le centre :

Le centre de recherche nucléaire dispose d'un service de sécurité industrielle rattachée directement au secrétariat général du centre.

Sous la responsabilité d'un attaché de recherche en sûreté nucléaire le service a pour fonction de :

- Prévenir les accidents de travail en veillant à l'application stricte et rigoureuse de la législation et de la réglementation en matière de sécurité de travail ;
- Intervenir afin de réduire les conséquences, pour les personnes et les installations, en cas d'accident et ce malgré les mesures de sécurité mises en œuvre.

IV.2.5.2. L'effectif du service de sécurité industrielle est composé de :

Ingénieur en hygiène et sécurité industrielle

Agent d'intervention incendie qualifié

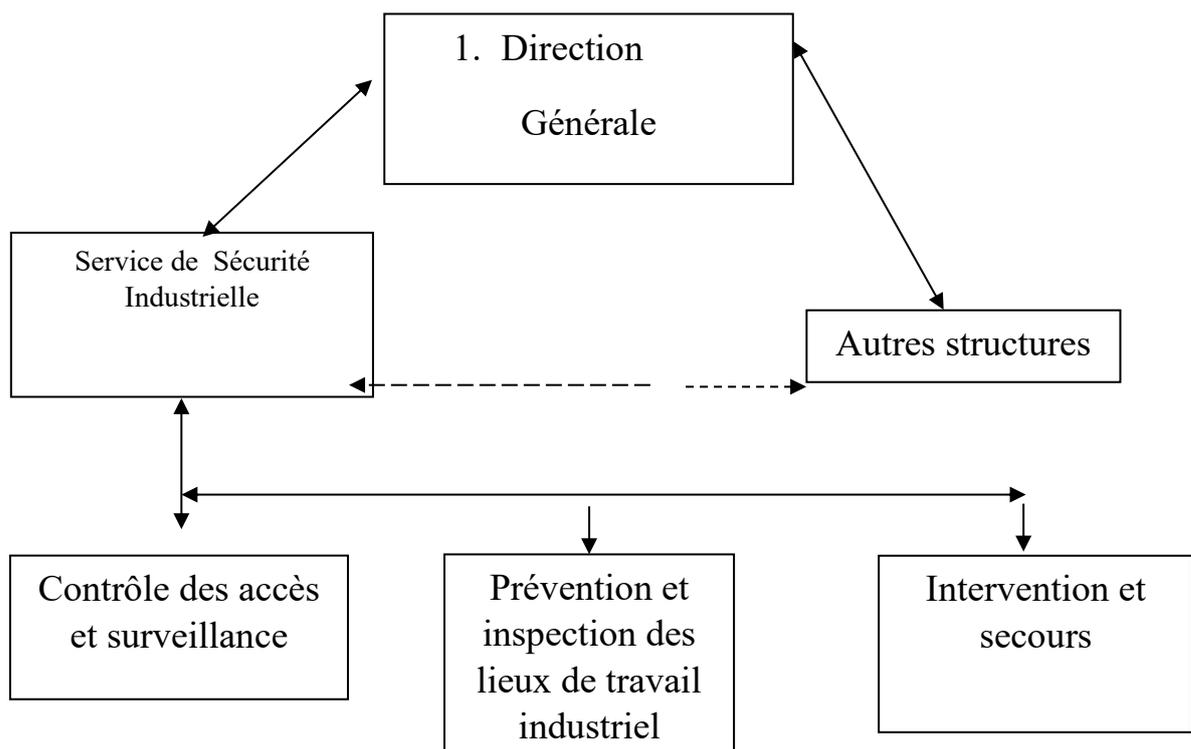
Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

Agent d'intervention incendie spécialisé

Agent de surveillance qualifié

Agent de surveillance spécialisé

IV.2.5.3. Organigramme du service sécurité industrielle



IV.2.5.4. Groupe de contrôle d'accès et surveillance :

Composé de quatre (04) groupes de travail et reparti sur les différentes postes de contrôle du centre ainsi que les annexes d'Ain Oussera avec une répartition temporaire de 3x8 en continu.

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

Les missions assignées à ce groupe sont :

- contrôler et enregistrer les entrées et les sorties des personnels et de matériels ;
- veiller à l'application des consignes de sécurité établies par la direction ;
- effectuer des rondes systématiques des lieux de travail durant et après les heures de travail ;
- assurer la première intervention en cas d'incidents et/ ou d'accidents.
- Assurer la surveillance des installations par vidéosurveillance.

IV.2.5.4.1. Groupe de prévention et d'inspection :

Il a pour mission :

- De détecter les risques existants dans l'installation et prévoir les mesures de sécurité à appliquer ;
- De prévoir les accidents qui pourraient se produire malgré les mesures de sécurité mises en œuvre, et de déterminer quelles seraient, pour chaque cas les dispositions à prendre ;
- D'évaluer les besoins du centre en moyens humains et matériels en matière de prévention et d'intervention.
- Tenue des registres réglementaires : registre d'hygiène et de sécurité, registre des vérifications techniques, registre des accidents de travail

IV.2.5.4.2. Groupe d'intervention et secours :

Le groupe d'agents d'intervention incendie a pour missions :

- Veiller au bon fonctionnement des équipements d'intervention (moyens légers et lourds de lutte anti-incendie, réseau d'incendie, etc...) ;
- Intervenir en cas d'accidents, exemple : les incendies, explosions, etc... [42]

IV.3. Présentation de la méthode APR (L'analyse Préliminaires des Risque) :

IV.3.1. Analyse préliminaire des risques :

Une analyse préliminaire des risques (APR), permet d'identifier les éléments dangereux de l'installation, les situations de danger, les causes et les conséquences (phénomènes dangereux). Cette étape permet de mettre en lumière des éléments ou des situations nécessitant une attention particulière et en conséquence l'emploi de méthodes d'analyse de risques plus détaillées.

IV.3.2. Accidents potentiels/ sources d'agression possibles

Risques induits par le fonctionnement normal et/ou dégradé de l'installation

Dans le tableau synthétique suivant sont résumés les différents scénarios d'accidents graves, d'origine interne ou externe pouvant survenir en fonctionnement normal ou dégradé des installations et de détailler chacun des points présentés dans ce tableau.

IV.3.3. Présentation de la démarche

L'APR est une méthode couramment utilisée dans le domaine de l'analyse des risques. Il s'agit d'une méthode inductive, systématique et assez simple à mettre en œuvre. Concrètement, l'application de cette méthode réside dans le renseignement d'un tableau en groupe de travail pluridisciplinaire.

Le tableau utilisé est présenté ci-après :

1 – Identifier les dangers				2 – Estimer les risques			3 - Prévenir les risques
Causes/ Scénarios	Situation Dangereuse	L'accident	Conséquences	Probabilité	Gravité	Criticité	Mesures de prévention

IV.3.4. Présentation de la grille d'analyse des risques :

La première rangée sert à localiser la zone de l'installation examinée. Les modes de fonctionnement normal, transitoire et dégradé sont étudiés dans l'analyse des risques. Seuls ceux retenus sont inclus dans l'étude.

IV.3.4.1. Identifier les dangers:

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

- Causes/Scénarios : Indique les numéros des scénarios analysés ainsi que les causes éventuelles pouvant conduire à une situation dangereuse.
- Événement Redouté Central : Fait référence à la situation de danger, telle que la suspension de poussières, la fuite de gaz ou l'inflammation de matières combustibles.
- **L'accident**

Fait référence aux phénomènes dangereux qui peuvent résulter de l'Événement Redouté Central, tels que l'explosion, l'incendie, la pollution des eaux superficielles, et ainsi de suite.

- **Conséquences :**

- Identifier les personnes potentielles (individus, structures,...) susceptibles d'être touchées par le phénomène dangereux en question et évaluer l'intensité du phénomène : Sur place et/ou à l'extérieur. Cette donnée permet d'évaluer la gravité (G). Lorsque le groupe de travail rencontre des problèmes pour évaluer les effets du Phénomène dangereux lors de l'analyse des risques, il est possible de réaliser une modélisation dès cette étape afin de dissiper cette incertitude.

IV.3.4.2. Estimer les risques :

- **Probabilité :**

- Examine la probabilité de la survenue de l'événement dangereux.

- **Gravité :** Affiche le niveau de gravité (G) des conséquences prévisibles sur les individus, qui découlent de l'intensité des effets du phénomène dangereux et de la vulnérabilité des individus susceptibles d'être exposés. Il convient de souligner que la classification en gravité des phénomènes dangereux est effectuée sans prendre en considération les Mesures de Maîtrise des Risques en place.

- **La criticité :** consiste à évaluer à la fois la probabilité et la gravité afin de déterminer l'importance du risque.

IV.3.4.3. Prévenir les risques:

Mesures de prévention:

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

Expose les principales barrières de sécurité indépendantes pour les scénarios identifiés. Deux sous-colonnes sont utilisées pour distinguer les barrières de protection et de prévention. Il n'a été choisi que des événements plausibles, en tenant compte des conditions de mise en œuvre des produits ou des installations. Les tableaux ne reproduisent pas les enchaînements d'événements physiquement impossibles. Les accidents majeurs potentiels ne sont considérés que dans les scénarios pouvant avoir des conséquences à l'extérieur de l'établissement et sont donc retenus dans la suite de l'Étude des Dangers.[43]

IV.3.5. Matrice d'estimation des risques :

	Mineur (1)	Significatif (2)	Grave (3)	Très grave (4)	Catastrophique (5)
1(Très faible)	1 (Acceptable)	2 (Acceptable)	3 (Acceptable)	4 (Acceptable)	5 (Acceptable)
2 (Faible)	2 (Acceptable)	4 (Acceptable)	6 (Acceptable)	8 (Tolérable)	10 (Tolérable)
3 (Modérée)	3 (Acceptable)	6 (Acceptable)	9 (Tolérable)	12 (Inacceptable)	15 (Inacceptable)
4(fort)	4 (Acceptable)	8 (Tolérable)	12 (Inacceptable)	16 (Inacceptable)	20 (Inacceptable)

Acceptabilité des risques :

- **1-6:** Acceptable (Opération permissible)
- **8-10:** Tolérable (Risque minimum)
- **12-20:** Inacceptable (Risque élevé)

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques

Nucléaires

IV.3.6. Tableau d 'analyse préliminaire des risques au niveau de centre nucléaire :

1 – Identifier les dangers				2 – Estimer les risques			3 - Prévenir les risques
Causes/ Scénarios	Situation Dangereuse	L'accident	Conséquences	Probabilité	Gravité	Criticité	Mesures de prévention
Défaillance du système de refroidissement primaire	Température du réacteur en augmentation	Fusion partielle ou totale du cœur	Libération massive de radioactivité, contamination large	2 (Faible)	5 (Catastrophique)	10	<ul style="list-style-type: none"> - Installation d'un système de refroidissement de secours. - Maintenance régulière des pompes et tuyauteries. - Surveillance continue des températures critiques du réacteur.
Erreur humaine lors des opérations de maintenance	Non-respect des procédures de sécurité	Fuite de matière radioactive due à une erreur de manipulation	Contamination locale, exposition des travailleurs	3 (Modérée)	4 (Très Grave)	12	<ul style="list-style-type: none"> - Formation renforcée pour le personnel de maintenance. - Double vérification des procédures critiques. - Utilisation d'équipements automatisés pour certaines tâches.
Intrusion ou cyberattaque	Compromission des systèmes de contrôle	Prise de contrôle non autorisée du réacteur	Dysfonctionnement du réacteur, accident nucléaire potentiel	2 (Faible)	4 (Très Grave)	8	<ul style="list-style-type: none"> - Renforcement des mesures de sécurité informatique. - Surveillance constante des systèmes. - Collaboration avec les forces

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques

Nucléaires

							de l'ordre pour répondre aux menaces potentielles.
Tremblement de terre	Dommages structurels aux installations nucléaires	Rupture des systèmes de confinement	Libération de radioactivité dans l'environnement	1 (Très faible)	5 (Catastrophique)	5	<ul style="list-style-type: none"> - Conception antisismique des installations. - Évaluation et mise à jour des normes de sécurité sismique. - Installation de capteurs sismiques avec déclenchement automatique des mesures de sécurité.
Défaillance des barres de contrôle	Impossibilité de réguler la réaction nucléaire	Réaction nucléaire incontrôlée	Surchauffe du réacteur, dommages au cœur, risque de fusion	2 (Faible)	5 (Catastrophique)	10	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance préventive des barres de contrôle. - Mise en place d'un système de contrôle automatisé de secours. - Scénarios d'urgence pour intervenir rapidement en cas de défaillance.
Fuite de matière radioactive	Perte d'intégrité du confinement	Fuite continue de matière radioactive	Contamination environnementale, danger pour la santé publique	2 (Faible)	4 (Très Grave)	8	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance renforcée du confinement. - Inspection

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

							<ul style="list-style-type: none"> - régulière des installations. - Maintenance proactive des systèmes de confinement.
Panne des systèmes électriques	Perte de contrôle des systèmes de sécurité	Arrêt des systèmes de refroidissement	Fusion du cœur, libération de radioactivité	2 (Faible)	5 (Catastrophique)	10	<ul style="list-style-type: none"> - Redondance des systèmes électriques. - Tests réguliers de fonctionnement en cas de perte d'alimentation. - Installation de générateurs de secours.
Erreur de conception ou défaut de fabrication	Défauts non détectés dans les équipements critiques	Défaillance soudaine des composants	Incident grave, arrêt d'urgence, exposition à la radioactivité	1 (Très faible)	4 (Très Grave)	4	<ul style="list-style-type: none"> - Révision régulière des conceptions techniques. - Tests rigoureux des composants avant installation. - Audits de qualité pendant et après la construction.
Corrosion des matériaux	Dégradation progressive des structures	Perforation ou rupture des systèmes de confinement	Fuite de matières dangereuses, nécessité de réparations coûteuses	3 (Modérée)	4 (Très Grave)	12	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection et remplacement réguliers des matériaux à risque. - Utilisation de matériaux résistants à la

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques

Nucléaires

							corrosion. - Surveillance en temps réel de l'état des structures
Erreur dans les calculs de réactivité	Calcul incorrect des paramètres de sécurité	Réaction nucléaire instable	Surchauffe ou arrêt brutal du réacteur	2 (Faible)	4 (Très Grave)	8	- Double vérification des calculs critiques. - Formation continue des ingénieurs sur les méthodes de calcul. - Scénarios de simulation pour valider les résultats des calculs.
Problèmes de gestion des déchets nucléaires	Accumulation de matières radioactives	Risques d'accidents lors de la manipulation	Contamination radioactive, impact à long terme sur l'environnement	2 (Faible)	4 (Très Grave)	8	- Renforcement des infrastructures de stockage des déchets. - Formation spécialisée pour le personnel manipulant les déchets. - Audits réguliers de la gestion des déchets.
Perte de confinement secondaire	Rupture du confinement secondaire	Libération de produits radioactifs dans l'environnement	Contamination large, évacuations nécessaires	1 (Très faible)	5 (Catastrophique)	5	- Inspection et maintenance régulières du confinement secondaire. - Tests des

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques

Nucléaires

							<p>systèmes de confinement en conditions extrêmes.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Scénarios d'urgence pour interventions rapides.
Défaillance des systèmes d'alerte et de communication	Retard dans la détection d'un incident	Manque de coordination dans les réponses d'urgence	Aggravation des conséquences de l'incident	2 (Faible)	5 (Catastrophique)	10	<ul style="list-style-type: none"> - Redondance des systèmes d'alerte. - Formation régulière du personnel sur les procédures d'urgence. - Tests des systèmes de communication en cas d'urgence.
Problèmes de refroidissement en cas de blackout station	Perte totale de l'alimentation électrique	Surchauffe du réacteur	Fusion du cœur, libération de radioactivité	2 (Faible)	5 (Catastrophique)	10	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance préventive des systèmes électriques. - Installation de systèmes de secours supplémentaires. - Tests réguliers des scénarios de blackout station.

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques

Nucléaires

Défaut de la génération de vapeur	Défaillance du générateur de vapeur	Manque de production d'électricité	Interruption de la production et du réseau	2 (Faible)	3 (Grave)	6	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance préventive régulière des générateurs de vapeur - Systèmes de surveillance thermique pour détecter toute défaillance imminente - Redondance des générateurs
Surpression dans la turbine à vapeur	Mauvaise gestion de la pression	Explosion de la turbine	Dommages mécaniques et risques pour le personnel	2 (Faible)	4 (Très grave)	8	<ul style="list-style-type: none"> - Soupapes de sécurité et mécanismes de décharge de pression - Contrôles automatisés pour surveiller les niveaux de pression - Formation continue des opérateurs

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

Défaillance du condenseur	Panne du système de refroidissement secondaire	Accumulation de vapeur, surpression dans le circuit	Arrêt non contrôlé, dommages	3 (Modérée)	4 (Très grave)	12	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection régulière du condenseur et des systèmes associés - Systèmes de refroidissement secondaire redondants - Capteurs pour détecter les fluctuations de température
Défaut dans la distribution d'électricité	Problème de ligne de transmission	Panne du réseau de distribution	Interruption de l'alimentation électrique	3 (Modérée)	3 (Grave)	9	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance constante du réseau de distribution - Systèmes de redondance pour éviter les surcharges - Maintenance préventive des lignes et transformateurs

IV.3.7. Conclusion

La réalisation d'une analyse de risques a permis d'apporter une contribution à l'amélioration de la sûreté de l'entreprise. De plus, les analyses de risques peuvent servir à évaluer et à comparer les différentes installations, qui devraient tous répondre aux exigences de sûreté souhaitée.

Le centre nucléaire CNRB présente un ensemble de risques variés qui, bien que majoritairement sous contrôle, nécessitent des efforts continus pour maintenir un niveau de sécurité optimal. La gestion proactive des risques identifiés, associée à des mesures de

Chapitre IV. Partie Pratique : Présentation de l'entreprise CRNB et analyse des risques Nucléaires

prévention appropriées et à une culture de sécurité robuste, permettra de garantir la sûreté de l'installation et la protection du personnel, du public, et de l'environnement. Les scénarios présentant un risque inacceptable doivent être traités en priorité pour réduire leur criticité à un niveau tolérable ou acceptable, assurant ainsi la pérennité des opérations dans des conditions sécurisée

CONCLUSION GENERALE

La gestion des risques nucléaires représente un défi complexe et multidimensionnel qui repose sur une compréhension approfondie des phénomènes radioactifs, des systèmes de réacteurs, ainsi que des effets sur la santé humaine. Ce mémoire a exploré ces différents aspects à travers une analyse scientifique et technique, tout en proposant une étude de cas pratique, centrée sur l'entreprise CRNB, pour illustrer les enjeux réels de la prévention et de l'intervention face aux risques nucléaires.

Dans le Chapitre I, nous avons abordé les bases théoriques de la radioactivité et des réactions nucléaires. Il est essentiel de comprendre comment les particules subatomiques interagissent et comment ces réactions peuvent être maîtrisées ou, au contraire, échapper à tout contrôle. La radioactivité, bien que naturelle dans certains cas, pose des risques importants dans un contexte industriel, nécessitant des connaissances techniques solides pour prévenir les accidents.

Le Chapitre II a présenté les réacteurs nucléaires, technologies au cœur de la production d'énergie nucléaire. En analysant leur fonctionnement et les différents types de réacteurs, il est apparu que chaque modèle présente des avantages et des inconvénients en termes de sécurité et de gestion des risques. La complexité des réacteurs rend cruciale la mise en place de systèmes de surveillance et de contrôle rigoureux pour éviter toute défaillance.

Le Chapitre III a mis en lumière les effets potentiels de l'activité nucléaire sur la santé humaine. Les radiations peuvent avoir des conséquences graves, à court et à long terme, notamment en cas d'exposition accidentelle ou prolongée. Ce chapitre a souligné l'importance des dispositifs de protection pour les travailleurs des installations nucléaires ainsi que pour la population vivant à proximité de ces sites.

Enfin, dans le Chapitre IV, l'analyse des risques menée au sein de l'entreprise CRNB a permis de confronter la théorie aux réalités industrielles. Cette partie pratique a démontré que la gestion des risques nucléaires ne se limite pas à la seule application des mesures techniques, mais doit également inclure une approche systémique de la prévention et de la préparation aux interventions d'urgence. La culture de la sûreté et les protocoles d'urgence doivent être continuellement renforcés pour assurer une protection optimale.

En conclusion, ce mémoire a mis en évidence que la prévention et l'intervention contre les risques nucléaires reposent sur une combinaison de connaissances scientifiques, de technologie avancées et d'une organisation rigoureuse. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés, la gestion des risques nucléaires demeure un domaine en évolution constante, face à des défis nouveaux tels que le vieillissement des installations ou le développement de nouvelles technologies nucléaires. Il est donc essentiel de poursuivre les efforts dans le domaine de la sûreté nucléaire, tant au niveau de la recherche que de la réglementation, afin de garantir un avenir où les bénéfices de l'énergie nucléaire peuvent être exploités en toute sécurité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yannick ARNOUD Cours de Radioactivité. 2008-2009.
- [2] Yanick AROUND, « Cours de radioactivité », 2007
- [3] document, Rayonnements ionisants - notions fondamentales
(https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/radioprotection/Chapitre2_RI_Notions_fondamentales.pdf
)
- [4] <https://lpsc.in2p3.fr/schien/PHY113a/Cours%20radioactivite%202009-2010.pdf>
- [5] <https://www.mirion.com/fr/discover/knowledge-hub/articles/education/types-of-ionizing-radiation>
- [6] https://energyeducation.ca/fr/D%C3%A9sint%C3%A9gration_gamma#:~:text=La%20d%C3%A9sint%C3%A9gration%20gamma%20est%20un,subit%20ce%20type%20de%20d%C3%A9sint%C3%A9gration.
- [7] document, Rayons X.ppt : <https://www.slideshare.net/slideshow/rayons-xppt/255779837>
- [8] https://laradioactive.com/categories/le-phenomene/rayonnement_neutronique
- [9] Encyclopédie Britannica : Définition et processus de la fission nucléaire. www.britannica.com
- [10] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fission-nucleaire-2462/>
- [11] <https://www.assistancescolaire.com/enseignant/lycee/ressources/base-documentaire-en-physique-chimie/cea039>
- [12] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/principes-de-fonctionnement-dun-reacteur-nucleaire#:~:text=La%20cha%C3%A9ne%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20d'une,une%20grande%20quantit%C3%A9%20de%20chaleur.>
- [13] Rapport sur la gestion des accidents graves dans les centrales nucléaires. www.irsn.fr
- [14] <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/lechelle-ines-international-nuclear-event-scale>
- [15] <https://www.comena.dz/organisation>
- [16] La sûreté nucléaire en France et dans le monde, J. Bourgeois, P. Tauguy, F. Cogné. J. Petit; Éditions Polytechnica, 1996.
- [17] Sûreté des réacteurs et accidents graves « D. Quéniart, Revue générale
- [18] Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) : La CIPR émet des recommandations sur les limites d'exposition et les principes de radioprotection.

www.icrp.org

[19] Formation de la Personne Compétente en Radioprotection, Institut Algérien de Génie Nucléaire, Draria du 19 janvier au 06 février 2020, Risques & Moyens de protection employés.

[20] Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) : L'AIEA définit les standards internationaux en matière de radioprotection dans ses Safety Standards Series. www.iaea.org

[21] <https://www.landauer-fr.com/mediatheque/base-de-connaissance/dosimetrie/>

[22] document, Identification des zones vitales des installations nucléaires : https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1505f_web.pdf

[23] <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/reglementation.html>

[24] L'AIEA fournit de nombreuses directives sur la sûreté et la sécurité nucléaires, notamment le Guide de sûreté GS-G-2.1 qui traite de la planification des situations d'urgence dans les installations nucléaires.

[25] Les directives de l'AIEA sur la gestion des situations d'urgence, notamment la publication GSR Part 7 – Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, servent de référence pour l'élaboration des PPI au niveau international.

[26] Loi n° 19-05 du 18 juillet 2019 : Cette loi régit les activités nucléaires en Algérie et encadre la sécurité des installations nucléaires.

[27] : L'IRSN propose des analyses et des recommandations sur la gestion des accidents nucléaires et les plans ORSEC dans le contexte français, qui peuvent être adaptés au contexte algérien: www.irsn.fr

[28] Manuel de protection contre les risques nucléaires, IRSN : Le manuel de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) fournit des informations sur la gestion des crises nucléaires, la protection des populations, et les protocoles à suivre en cas d'urgence.

[29] Décret Exécutif N° 05-117 du 11 avril 2005, relatif à la sûreté et à la sécurité nucléaires : Ce décret fixe les modalités de gestion des installations nucléaires et les mesures d'urgence à mettre en place pour informer la population et protéger la santé publique.

[30] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-effets-des-rayonnements-ionisants-sur-vivant.aspx>

[31]:<https://www.msmanuals.com/fr/professional/blessures-empoisonnement/exposition-aux-rayonnements-et-contamination-radioactive/exposition-aux-rayonnements-et-contamination-radioactive>

- [32] Manuel de radioprotection à usage des sapeurs-pompiers, Ministère de l'Intérieur. Direction de la sécurité civile, 1992
- [33] Memento du risque nucléaire, Institut des risques majeurs, 9 rue Lesdiguières 38000 Grenoble, 1990.
- [34] Code de la Santé Publique – France : egifrance.gouv.fr
- [35] Les Effets biologiques des rayonnements ionisants, Docteur M. Bertin, EDF 1994
- [36] Les Effets biologiques des rayonnements ionisants, Docteur M. Bertin; Éditions Sodel. 1991
- [37] Long term mortality after single treatment course with X-rays in patients treated for ankylosing spondylitis», S.C. Darby, R. Doll, S.K. Gill, P.G. Smith, Brit. J. Cancer, 1987-55: 179-180.
- [38] Biophysique, Radiobiologie, Radiopathologie, P. Galle. R. Paulin: Masson. 1992.
- [39] Consequences of pre-natal exposure for post-natal development, a review, Int. J. Radiat. Biol., 1982-2, 1-12.
- [40] Genetic and somatic effects of ionising radiations; UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation) United Nations, New York, 1988. Doc Le photocopie по
- [41] Le risque nucléaire, CHOUDENS Henri, 2001
- [42] Rapport de stage entreprise CRNB, LHAMROUCHE Mammar 2023/2024
- [43] <https://www.nord.gouv.fr/contenu/telechargement/42505/291275/file/APR+-+FINALE.pdf>
- [44] memoire les risques lies a l'activite de l'entreprise , MAMOU Billal 2024

