

Table des matières

- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations

INTRODUCTION	7
CHAPITRE I	9
QUELQUES GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE, CHRONOLOGIE DES ESSAIS NUCLEAIRES ET DES TRAITES LIES A LEUR INTERDICTION	9
I.1 QUELQUES GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE	10
INTRODUCTION	10
I.1.1 RADIOACTIVITE NATURELLE	10
I.1.2 RADIOACTIVITE ARTIFICIELLE	10
I.1.2.1 Les retombées globales	11
I.1.2.2 Les rejets contrôlés	13
I.1.2.3 Les situations accidentnelles	13
I.2 LES ESSAIS NUCLEAIRES	14
I.2.1. Le début de l'ère nucléaire	14
I.2.2 les types d'essais nucléaires :	16
I.2.2.1 Les essais atmosphériques	16
I.2.2.2 Les essais sous l'eau	16
I.2.2.3 Les essais souterrains	17
I.2.2.4 Le développement des arsenaux nucléaires	18
Conclusion	18
I.3 LES TRAITES LIES A L'INTERDICTION DES ESSAIS NUCLEAIRES	19
I.3.1 Traite d'interdiction partielle des essais nucléaires	19
I.3.2 Traite de non-prolifération (TNP)	21
I.3.2.1 Historique	21
I.3.2.2 Résumé du traité	22
I.3.2.3 Protocole additionnel de l'AIEA	22
I.3.2.4. Pays membres du TNP	23
I.3.3 Traite d'interdiction complète des essais nucléaires et la création de l'OTICE	23
I.3.3.1 Historique du traité	23
I.3.3.2 Résumé du traité	24
CHAPITRE II	28
ORGANISATION DU TRAITE D'INTERDICTION COMPLETE DES ESSAIS NUCLEAIRES	28
II.1 LA COMMISSION PREPARATOIRE	29

II.2 L'OTICE PROPREMENT-DIT	30
II.2.1 Le CTBTO après l'entrée en vigueur	30
II.2.2 Les organes de l'OTICE après son entrée en vigueur :	30
II.2.2.1 La Conférence des Etats parties :	30
II.2.2.2 Le Conseil exécutif	31
II.2.2.3 Le Secrétariat technique	31
II.3 Le régime de vérification :	31
Introduction	31
II.3.1 Le système de surveillance international (SSI)	32
II.3.1.1- Le réseau du SSI	32
II.3.1.2- Les technologies de surveillance :	32
II.3.1.3 Les technologies de surveillance : fonctionnement	33
a) <i>Les stations sismiques</i>	33
b) <i>Les stations infrasonores</i>	36
c) <i>Les stations hydroacoustiques</i>	37
d) <i>Les stations de détection de radionucléides</i>	38
e) <i>Les laboratoires de radionucléides</i>	38
II.3.1.4 Les données du système de surveillance internationale	41
II.3.2 Centre international de collecte des données (CDI)	41
II.3.2.1 Produits du CDI de type I	42
II.3.2.2 Produits du CDI de type II	42
II.3.3. Infrastructure mondiale des communications	45
II.3.4- Inspections sur le site :	45
II.3.5 Consultation et clarification	45
II.3.6 Mesures de confiance	46
II.4 LES APPLICATIONS CIVILES ET SCIENTIFIQUES DES TECHNOLOGIES DE VERIFICATION DU CTBT	46
II.5.1 AutoDRM	48
II.5.2 Par Abonnement :	50
II.5.3 Le site web sécurisé	51
II.5.4-Base de données externe	53
.....	54
CHAPITRE III	54
TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES ISSUES DES STATIONS DE PARTICULES DU REGIME INTERNATIONAL DE VERIFICATION DE LA CTBTO	54
III.1 Libération de radionucléides des explosions nucléaires	55
III.2 Principe de fonctionnement des stations de radionucléides	56
III.2.1 Liste des radionucléides pertinents dans le cadre du CTBT	56

III.2.2 Chronologie du traitement et de l'analyse des données.....	56
III.2.3 Collecte de données dans les stations de particules.	57
a) Principe de fonctionnement	57
b) Exigences minimales pour les systèmes de particules	59
c) Données sur les radionucléides	59
d) Types de données spectrales de radionucléides	60
III.2.4 Traitement automatique et l'analyse interactive des données.....	61
III.2.4.1 Traitement automatique des données :	61
III.2.4.2 Traitement interactive des données :	65
III.2.5 Catégorisation des spectres particulaires	65
III.2.6 Produits du CID	67
a) Rapport automatique de radionucléides (ARR)	67
a) Rapport révisé sur les radionucléides (RRR)	67
b) Bulletin d'événement standard pour les radionucléides filtrés (SSREB)	67
III.2.7 Modélisation du transport atmosphérique (ATM).	68
III.2.7.1 Le modèle lagrangien de dispersion de particules FLEX-PART	68
III.2.7.5 Utilité du logiciel WEB-GRAPE	71
III.3 Résumé des étapes de traitement des radionucléides du CDI.....	72
III.4 Schéma général de surveillance des radionucléides	73
III.5 Analyse du Césium 137 provenant de la station radionucléide de la Mauritanie RN43.....	73
III.5.1 Description et statut de la station	73
III.5.2 Détection du nucléide et résultats du traitement du CDI.	75
III.5.3 Interprétation des résultats :	78
Conclusion et Perspectives :	79
REFERENCES	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1: chaîne de désintégration du thorium	11
Figure 2: Radionucléides émis lors d'une explosion nucléaire [17]	12
Figure 3: sites d'essais nucléaires depuis 1945 à 2017 [3]	16
Figure 4: Les différents types d'essai [4].....	17
Figure 5: chronologie des essais nucléaires de 1945-2017 [3].....	19
Figure 6: Signataire du traité d'interdiction partielle des essais nucléaires [6].	20
Figure 7: Etats ayant ratifiés le TNP [6].....	23
Figure 8: Etat des ratifications du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires en 2017 [3]	27
Figure 9: Exemple de forme d'onde sismique [10].	36
Figure 10: Domaines du spectre des ondes infrasonores [15].	36
Figure 11: Station infrasonore et l'onde générée [5].....	37
Figure 12: station hydroacoustique et onde générée [5].....	37
Figure 13: station hydroacoustique et onde générée.....	38
Figure 14: Le réseau complet du SSI [11].....	40
Figure 15: transmission des données SSI du régime de vérification [11].	41
Figure 16: produits standards du CID [5].....	44
Figure 17: Modélisation de transport atmosphérique [14].	47
Figure 18: site web sécurisé [15]	51
Figure 19: particules et gaz dans les explosions nucléaires [11].....	55
Figure 20: Chronologie de libération à la détection des radionucléides [11].....	57
Figure 21: Schéma du principe de fonctionnement d'une station de particules à filtrage manuel [11].	58
Figure 22: Systèmes automatisés (RASA et ARAME) de traitement des données des stations de particules [4].	59
Figure 23: Pipeline de traitement des radionucléides [11].	66
Figure 24: les étapes de traitement des radionucléides [14].....	72
Figure 25: Station RN43 Mauritanie [21].....	75
Figure 26: Evolution de la concentration en activité du Cs-137 de Novembre 2017	76
Figure 27: Nombre de niveaux observés dans les rejets [25].	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste des principaux radionucléides constituant les retombées des essais d'armes nucléaires [17].....	13
Tableau 2: Liste des produits de fission (bleu) et des produits d'activation (rouge), principalement rejetés en cas d'accident d'une centrale nucléaire [29].	14
Tableau 3: Statut de signature et de ratification au 13 Février 2020.....	25
Tableau 4: Etat du programme d'installation et de certification des stations du SSI [9].	33
Tableau 5: Etat du programme d'installation et de certification des systèmes de détection des gaz rares [9].....	33
Tableau 6: Etat du programme d'homologation des laboratoires de radionucléides [9].....	33
Tableau 7: Résumé de la catégorisation :	52
Tableau 8: Radioactivité de produits de fission :	52
Tableau 9: Concentration détectable minimale pour nucléides clés.....	52
Tableau 10: Résultats de recherche pics	52
Tableau 11: Radionucléides pertinents comme indicateurs de l'essai nucléaire [11].	56
Tableau 12: Exigences minimales pour les systèmes à particules [4]......	59

ABREVIATIONS

CD : Conférence sur le Désarmement

CID : Centre International des Données

CTBT : Comprehensive Nuclear-test-Ban Treaty (CTBT)

GCI : L'Infrastructure de Communication Globale

GES : Groupe d'Expert Scientifique

ISP : Inspection Sur Place

OTICE : Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires

MRP : Mauritanie Radionucléide de Particules

TIPE : Traité d'Interdiction Partielle des Essais Nucléaires

TICE ou CTBT : Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires

TNP : Traité de Non-prolifération

SSI : Système de Surveillance International

STP : Secrétariat Technique Provisoire

SLSD : liste standard des détections de signaux

SEL : liste d'évènement standard

BER : bulletin d'évènement revu

SEB : bulletin d'évènement standard

RAR : rapport automatisé sur les radionucléides

RRR : rapport révisé sur les radionucléides

RLR : rapport de laboratoire sur les radionucléides

ATM : modélisation de transport atmosphérique

BERN : bulletin des évènements sur les radionucléides normalisés

MDC : concentration minimum détectable

AutoDRM : Automated data request manager (accès aux données et aux produits par le biais de demandes)

CLA : couche atmosphérique limite

INTRODUCTION

Les préoccupations internationales concernant les retombées radioactives résultant des essais nucléaires se sont intensifiées durant la deuxième guerre mondiale avec son bilan horrible : les deux bombes atomiques larguées par les Etats-Unis sur les deux villes japonaises Hiroshima et Nagasaki ont tué environ deux cent milles (200.000) personnes avec des décès supplémentaires dus au cancer et à d'autres maladies attribuables à l'exposition aux rayonnements. Dès la fin de la guerre en 1945, une course à l'arme nucléaire s'ensuivit entre les deux superpuissances émergentes les Etats-Unis et l'URSS. Des tensions exacerbées et une atmosphère de peur et de suspicion envahissantes ont entraîné la compétition pour construire des bombes plus puissantes et sophistiquées (bombes à hydrogène, conception d'armes à fission améliorées).

Conscients du danger majeur de risque de prolifération des armes nucléaires, les Etats ont engagé de multiples discussions au sein des Nations-Unies ou de façon bilatérale pour parvenir à un contrôle des arsenaux nucléaires. C'est ainsi que plus d'une dizaine de traités et accords bilatéraux et multilatéraux ont été signés pour conclure des traités afin de contrôler les arsenaux nucléaires. Les plus importants sont ceux qui constituent le régime international de non – prolifération à savoir :

Le traité d'interdiction partielle des essais nucléaires (TIPE) est un traité bilatéral signé le 05 août 1963 à Moscou par les Etats Unis, l'Union Soviétique et le Royaume-Uni, il est entré en vigueur le 10 octobre 1963. Le traité sur la non-prolifération (TNP) et le traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) sont des traités multilatéraux négociés respectivement en 1968 et entre 1994 et 1996 dans le cadre de la conférence du désarmement des Nations-Unies et sont gérées par des organisations internationales indépendantes à savoir l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et l'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE).

Le TNP est entré en vigueur depuis le 05 mars 1970 mais le TICE, ouvert à la signature de tous les Etats le 24 septembre 1996, attend toujours d'être pleinement effectif.

Malgré ces traités, le monde continue d'être sous la menace de l'apocalypse nucléaire.

Les accidents majeurs survenus au cours des quatre dernières décennies (Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011) et les différents tests nucléaires effectués par certaines puissances nucléaires ont engendré d'importantes quantités de radionucléides rejetés dans l'atmosphère pouvant présenter un risque sanitaire non négligeable pour les populations humaines [1]. Il était donc impératif pour la communauté internationale de prévoir la création de l'organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) ou, en anglais, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty organisation (CTBTO). Elle répond à la volonté des Etats d'interdire à tout jamais tous les essais d'armes nucléaires et toutes les autres explosions nucléaires. L'un de ces objectifs est d'établir le régime de surveillance

(détection) et de vérification international (inspection sur place) permettant de fournir des indications cruciales sur l'augmentation des niveaux de radioactivité.

Lors de la conférence de facilitation de l'entrée en vigueur du T.I.C.E tenue à New York, le 12 Novembre 2001, le Sénégal a confirmé d'appartenir à des cercles de solidarité régionale et transrégionale qui réprouvent la prolifération nucléaire. Le Sénégal a signé et ratifié le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires et il collabore de bonne foi avec le Secrétaire Technique Provisoire.

L'objet de notre mémoire est orienté vers l'utilisation de la technologie des radionucléides puisqu'elle complète celle des formes d'onde et permet de confirmer une éventuelle explosion nucléaire.

Le but de notre travail est de faciliter au personnel technique de tous les Etats partie de l'OTICE, l'exploitation des produits radionucléides du centre de données international (CDI)

Le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre s'intéresse sur quelques généralités sur la radioactivité ; l'historique des essais nucléaires et une revue des principaux traités liés à leur interdiction.

Le deuxième chapitre portera sur la structuration et le fonctionnement du secrétariat technique provisoire (STP) et de l'organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) après son entrée en vigueur du TICE.

Le troisième chapitre traite la description du principe de fonctionnement des stations de mesures de radionucléides, de la collecte, du traitement automatique et de l'analyse interactive des données recueillies par les stations du CTBTO. Dans cette partie nous allons aussi examiner les résultats issus du traitement du césium 137 de la station MRP43 durant la période du 21 Novembre 2017 au 21 Octobre 2018. Nous nous sommes intéressés à suivre sa concentration en activité pendant douze mois et ensuite déterminer son niveau de risque dans cette partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest.

Le choix de l'étude de l'isotope du césium 137 s'explique par le fait que cet isotope est très répandu sur terre lors des essais dans l'atmosphère des armes atomiques. Cet isotope contribuait dans les années 1960 entre 1 et 4 % de la radioactivité naturelle du corps humain.

Le césium-137 est également un des principales sources de contamination radioactive lors des accidents de réacteurs. Il est un sujet de préoccupation car sa durée de vie est longue et il voyage aisément à travers la chaîne alimentaire tout en continuant à émettre ses rayonnements. Des atomes de césium participent au cycle végétal, entrant dans les plantes par les racines et retournant à la terre quand la plante meurt. Lors de l'accident de Tchernobyl, une quantité importante de cet isotope a été disséminée [1].

La communauté scientifique internationale s'accorde à dire que le césium se diffuse de manière homogène dans la masse musculaire. Cependant, selon des études de médecins chercheurs russes suites à l'accident de Tchernobyl, le césium a tendance à se concentrer dans le muscle cardiaque et il pourrait y avoir un lien entre le césium-137 et des pathologies cardiaques, comme des arythmies [2].

CHAPITRE I

QUELQUES GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE,

CHRONOLOGIE DES ESSAIS NUCLEAIRES ET DES TRAITES

LIES A LEUR INTERDICTION.

I.1 QUELQUES GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE

Introduction.

La radioactivité est un phénomène de désintégration aléatoire spontané d'atomes, qui peuvent se décomposer en un ou plusieurs noyaux, habituellement accompagné de l'émission d'un rayonnement émettant un rayonnement constitué de particules chargées α , β , p ou neutre γ , n etc. Le noyau obtenu peut être lui-même instable ou dans un état excité qui va évoluer en se désexcitant, souvent en émettant ou plusieurs protons. On parle souvent de noyaux père pour le noyau initial et de noyau fils pour le noyau final. L'importance d'une source radioactive est appréciée par son activité qui traduit son taux de désintégration (nombre de désintégrations par unité de temps). Il existe deux types de radioactivité : la **radioactivité naturelle** (radioactivité de radionucléides qui existent dans la nature, réactions nucléaires spontanées) et la radioactivité artificielle (radioactivité produite au cours de réactions nucléaires).

I.1.1 Radioactivité naturelle

La radioactivité naturelle présente deux composantes principales : tellurique et cosmique. La radioactivité naturelle terrestre est issue des trois familles radioactives naturelles dont les radionucléides sont en filiation, celle de ^{232}Th , de ^{235}U et de ^{238}U . On retrouve également ces différents radionucléides dans les autres compartiments comme les eaux ou l'air et même dans le corps humain suite à l'ingestion de denrées alimentaires.

On peut voir dans la chaîne de désintégration du ^{232}Th qu'il y 'a des émetteurs α et β . Dans toutes les mesures nucléaires réalisées, on note la présence de traces de ces radionucléides naturels. Le radon est un gaz radioactif qui possède trois isotopes dans chaque famille radioactive naturelle : ^{219}Rn (^{235}U), ^{220}Rn (^{232}Th) et ^{222}Rn (^{238}U). Le ^{222}Rn , descendant de la famille de ^{238}U est présent en grande quantité dans l'atmosphère de par la forte proportion de sa famille radioactive et de sa période (3,82 jours) assez longue pour permettre sa migration dans l'environnement. Sa décroissance engendre des descendants radioactifs. Son accumulation dans des atmosphères confinées en fait l'élément radioactif naturel le plus dosant pour la population et augmente le risque de cancer du poumon.

I.1.2 Radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle est une radioactivité provoquée par des activités humaines au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire. La radioactivité artificielle est présente dans l'environnement depuis le début du xx^e siècle. Elle comprend l'ensemble des phénomènes de transmutation des radio-isotopes créés artificiellement en bombardant des éléments stables

(aluminium, beryllium, iodine, etc.) avec divers faisceaux de particules (neutron, proton, particule α , deuton).

Historiquement, ce furent Frédéric Joliot-Curie et Irène Joliot-Curie qui, les premiers en 1934, découvrirent le phénomène en produisant du phosphore 30 en bombardant de l'aluminium 27 avec une particule α provenant généralement d'une source de radium. La famille ($4n+1$) artificielle qui a pu exister après la formation de la terre. Il est à noter que du Np-237 est fabriqué dans les réacteurs.

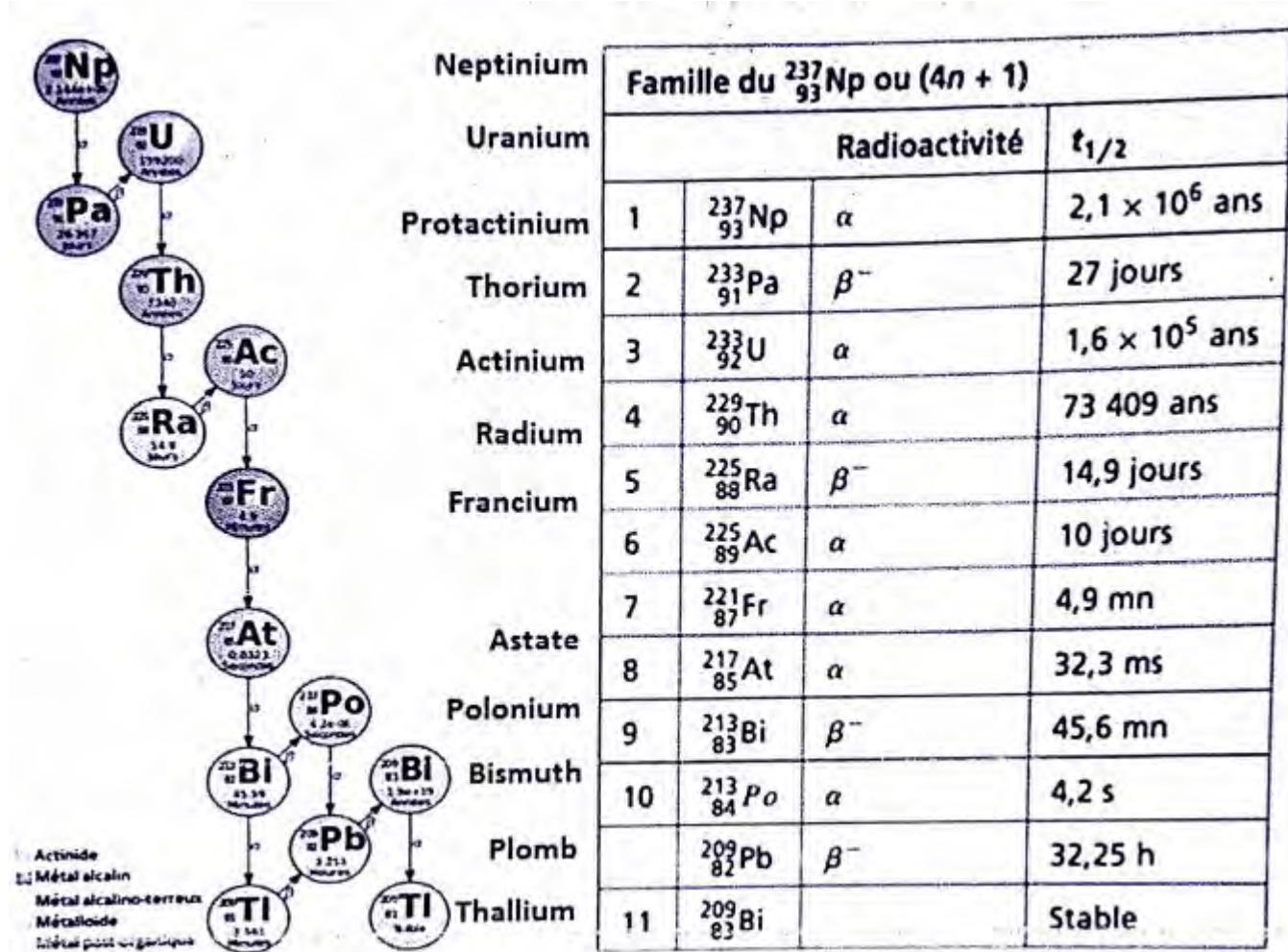


Figure 1: chaîne de désintégration du Neptunium.

I.1.2.1 Les retombées globales

Les retombées globales regroupent les essais atmosphériques d'armes nucléaires et les accidents ayant engendré d'importants rejets de radioactivité dans l'environnement. Les essais nucléaires militaires ont conduit à l'apparition dans l'environnement à l'échelle mondiale de nombreux radionucléides, surtout des produits d'activation et de fission ainsi que des radionucléides transuraniens. Aujourd'hui on retrouve essentiellement le ^{137}Cs comme émetteur dans l'environnement dû aux essais militaires.

Les accidents nucléaires atmosphériques ont aussi contribué à l'apparition de la radioactivité artificielle dans l'environnement, le plus important est l'accident de Tchernobyl, dont les rejets de ^{137}Cs sont encore aujourd'hui mesurables sur tout le territoire français.

Une explosion nucléaire est due à la fission (cassure) d'atomes lourds comme l'Uranium 235 (^{235}U) ou le Plutonium 239 (^{239}Pu). Elle entraîne un dégagement d'énergie considérable et l'émission de produits de fission et d'activation.

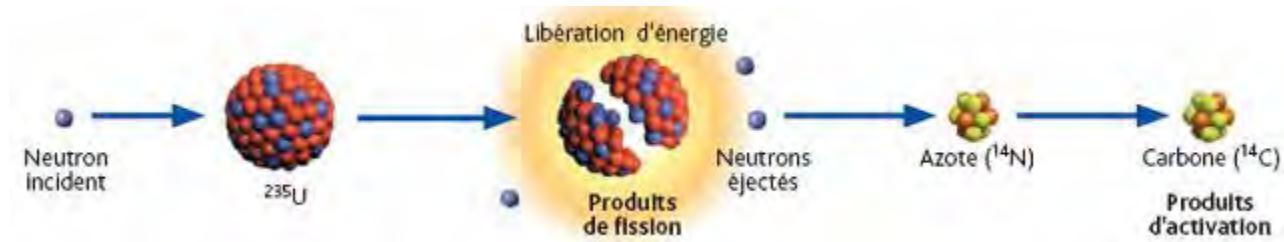


Figure 2: Radionucléides émis lors d'une explosion nucléaire [17].

a) Les produits de fission :

Sous l'impact d'un neutron, le noyau de l'atome d'Uranium 235 ou de Plutonium 239 se casse en deux radionucléides, libérant de l'énergie et des neutrons. Une cinquantaine de radionucléides « primaires » peuvent ainsi être produits. En se désintégrant, ils vont engendrer plus de 200 radionucléides « secondaires », parmi lesquels le Césium 137 (^{137}Cs), le Strontium 90 (^{90}Sr), le Zirconium 95 (^{95}Zr) et l'Iode 131 (^{131}I).

b) Les produits d'activation :

Certains noyaux présents dans l'environnement peuvent capturer des neutrons et devenir radioactifs. C'est le cas de l'hydrogène qui se transforme en Tritium (^3H) et de l'Azote 14 (^{14}N) qui se transforme en Carbone 14 (^{14}C).

c) Particules et gaz nobles

La plupart des produits de fission et d'activation se condensent et se fixent aux aérosols. Ces radionucléides s'appellent des particules. Les gaz nobles sont chimiquement non réactifs et restent gazeux. Le xénon est le gaz noble avec le plus haut rendement de fission.

Dans les explosions nucléaires souterraines, les particules sont retenues dans le sol et les gaz rares sont plus susceptibles de s'échapper.

Tableau 1: Liste des principaux radionucléides constituant les retombées des essais d'armes nucléaires [17].

Radionucléides	Symbol	Période	Radionucléides	Symbol	Période
Iode 131	^{131}I	8 jours	Fer 55	^{55}Fe	2,7 ans
Baryum 140	^{140}Ba	13 jours	Antimoine 125	^{125}Sb	2,8 ans
Césium 141	^{141}Ce	33 jours	Tritium	^3H	12 ans
Ruthénium 103	^{103}Ru	39 jours	Plutonium 241	^{241}Pu	14 ans
Strontium 89	^{89}Sr	51 jours	Strontium 90	^{90}Sr	29 ans
Yttrium 91	^{91}Y	59 jours	Césium 137	^{137}Cs	30 ans
Zirconium 95	^{95}Zr	64 jours	Américium 241	^{241}Am	433 ans
Césium 144	^{144}Ce	280 jours	Carbone 14	^{14}C	5700 ans
Manganèse 54	^{54}Mn	310 jours	Plutonium 240	^{240}Pu	6600 ans
Ruthénium 106	^{106}Ru	370 jours	Plutonium 239	^{239}Pu	24000 ans

I.1.2.2 Les rejets contrôlés

En fonctionnement normal, les installations nucléaires de base rejettent des radio-isotopes sous trois formes : rejets gazeux, rejets liquides et rejets diffus. Les principaux radioéléments rejetés sont : ^3H , ^{14}C , les isotopes de l'iode, des gaz rares et quelques produits d'activation et de fission. Ces derniers sont principalement : ^{58}Co , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{54}Mn , ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{60}Co , ^{108m}Ag , ^{110m}Ag .

Certains de ces radionucléides sont également rejetés lors du démantèlement des installations nucléaires de base ou du retraitement des déchets de combustibles usés, auxquels il faut ajouter des rejets de radionucléides transuraniens.

Dans le domaine médical, la médecine nucléaire est le principal contributeur de rejets dans l'environnement du fait de l'utilisation de sources liquides. On retrouve essentiellement des émetteurs à courte durée de vie dont la dispersion dans l'environnement est brève. La médecine nucléaire, pour le diagnostic, utilise par exemple ^{99m}Tc ($T=6$ h), ^{201}Tl ($T=3$ j) ou ^{123}I ($T=13$ h) pour réaliser des scintigraphies ou encore le ^{18}F ($T=2$ h) lors des examens de Tomographie par Emissions de Positons.

La curiethérapie, à but curatif, utilise des émetteurs à durée de vie plus longue, on retrouve par exemple le ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{125}I , ^{103}Pd ou encore ^{106}Rh , mais les sources sont sous forme solide et leur dispersion est moins probable.

I.1.2.3 Les situations accidentelles

Dans le cas d'un accident sur un réacteur nucléaire, un panel assez large de radionucléides est susceptible d'être rejeté dans l'environnement, panel dépendant du type d'accident. Les principaux radionucléides

rejetés sont répertoriés dans le tableau 2. Il s'agit essentiellement de produits de fission et d'activation. Certains comme ^{131}I ont un impact dosimétrique très important et devraient donc être quantifiés rapidement pour en limiter l'impact sur les populations proches de l'accident. Un accident dans le transport des radionucléides médicaux pourrait engendrer une contamination dans l'environnement. Mais comme précisé plus haut, les émetteurs employés en médecine nucléaire ont des durées de vies courtes et leur présence serait restreinte dans l'environnement. Enfin, la curiethérapie utilise des sources scellées généralement solides et peuvent donc difficilement se disperser dans l'environnement.

Tableau 2: Liste des produits de fission et des produits d'activation principalement rejetés en cas d'accident d'une centrale nucléaire [29].

Radionucléides	Rayonnements dominants	Période
Produits de fission		
^{144}Ce	β, γ	285 jours
^{137}Cs	β, γ	30 ans
^{129}I	β, γ	$1,6 \cdot 10^7$ an
^{131}I	β, γ	8,02 jours
^{85}Kr	β, γ	10,8 ans
^{103}Ru	β, γ	39,26 ans
^{106}Ru	β, γ	372,6 jours
^{89}Ru	β, γ	50,6 jours
^{90}Ru	β	28,8 ans
^{133}Xe	β, γ	5,2 jours
^{95}Zr	β, γ	64 jours
Produits d'activation		
^{110m}Ag	β, γ	250 jours
^{155}Ba	β, γ	10,54 ans
^{58}Co	β, γ	70,8 jours
^{60}Co	β, γ	5,27 ans
^{134}Cs	β, γ	2,07 ans
^{55}Fe	β, γ	2,7 ans
^3H	β, γ	12,3 ans
^{54}Mn	β, γ	312 jours
^{65}Zn	β, γ	244 jours

I.2 LES ESSAIS NUCLEAIRES

I.2.1. Le début de l'ère nucléaire

Le premier essai de l'histoire, du nom de code Trinity, a lieu le 16 Juillet 1945 à Alamogordo dans le désert du nouveau Mexique, concrétisant les recherches scientifiques menées conjointement par les Etats-Unis, le Royaume-Uni et le Canada depuis 1942 sous la bannière du projet Manhattan.

Le but initial de cet essai était de confirmer la faisabilité d'une arme nucléaire de type implosion.

Trois semaines plus tard, les forces américaines larguent little boy et fat man sur les villes d’Hiroshima et de Nagasaki les 6 et 8 Aout 1945.

La course aux armements nucléaires démarre réellement suite à l’explosion le 29 Aout 1949 de la première bombe RDS-1 (bombe atomique de 22kt) conçue par l’Union des républiques socialistes soviétiques (URSS).

Durant la guerre froide, les essais nucléaires essentiellement atmosphériques jusqu’aux années 1960 se multiplient. Le premier Mars 1954, la plus puissante bombe H américaine est testée, causant des désastres écologiques dus aux retombées radioactives.

Entre 1945 et l’ouverture à la signature du traité d’interdiction des essais nucléaires en 1996, plus de 2000 essais nucléaires ont été effectués dans le monde entier.

Les Etats-Unis ont effectué 1032 tests entre 1945 et 1992.

L’Union soviétique a effectué 715 tests entre 1949 et 1990.

Le Royaume-Uni a effectué 45 essais entre 1952 et 1991.

La France a effectué 210 tests entre 1960 et 1996.

La Chine a effectué **45** essais entre 1964 et 1996.

Après l’ouverture du Traité d’interdiction complète des essais nucléaires, en septembre 1996, dix essais nucléaires ont été réalisés :

L’Inde a effectué deux essais en 1998

Le Pakistan a effectué deux tests en 1998.

La République populaire démocratique de Corée a effectué un essai nucléaire en 2006, 2009 et 2013, deux en 2016 (janvier et septembre) et un en 2017 [5].

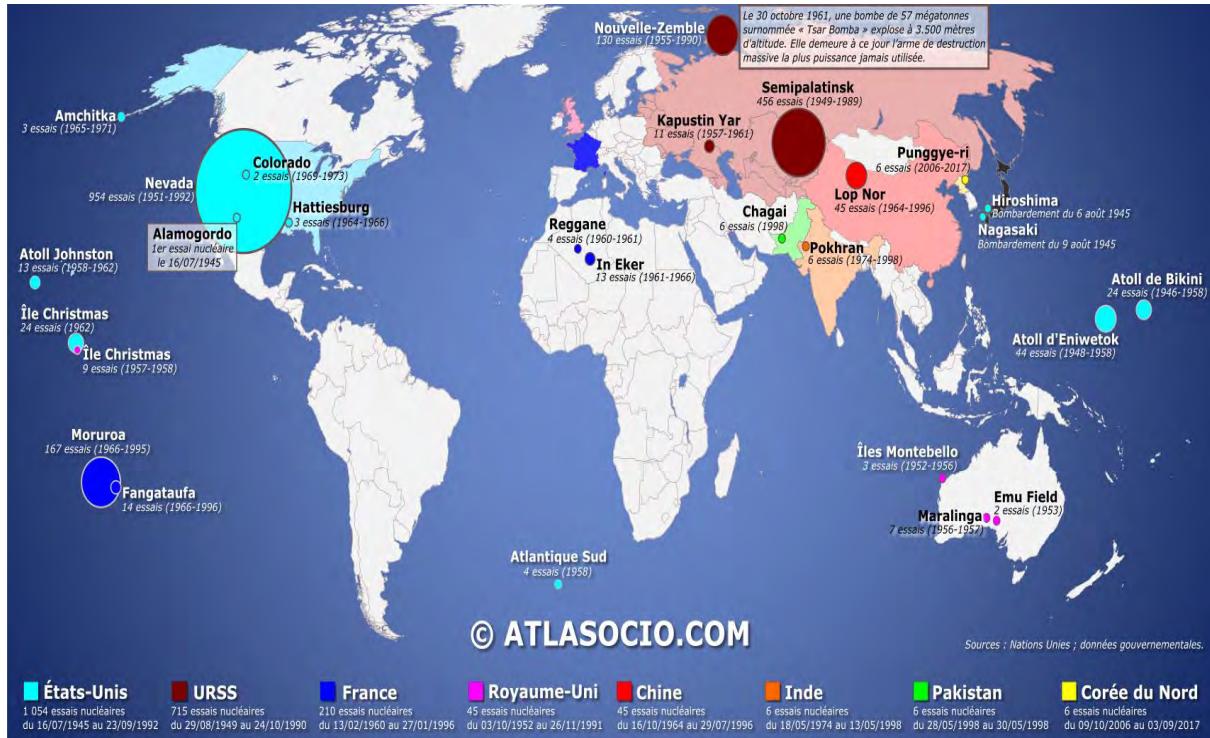


Figure 3: sites d'essais nucléaires depuis 1945 à 2017 [3].

I.2.2 les types d'essais nucléaires :

Un essai nucléaire désigne l'explosion d'une bombe nucléaire à des fins expérimentales. Les essais permettent de valider des modèles de fonctionnement, leurs effets peuvent également prouver à la communauté internationale que l'on dispose de l'arme nucléaire. Il existe différents types d'essais nucléaires : test atmosphérique ; test souterrain et test sous-marin [5].

I.2.2.1 Les essais atmosphériques

Au total, plus de 2 000 explosions nucléaires ont explosé dans le monde entre le 16 juillet 1945 et le 29 juillet 1996, 25% des essais ont été explosés dans l'atmosphère. La préoccupation internationale suscitée par les retombées radioactives résultant d'essais atmosphériques s'est accrue au milieu des années 1950. Les essais atmosphériques ont été interdits par le Traité d'interdiction partielle des essais de 1963.

Les stations du système de surveillance internationale (C.T.B.T.O) sont utilisées pour détecter les explosions nucléaires en surveillant les ondes sonores à basse fréquence dans l'atmosphère. Les stations (SSI) du CTBTO radionucléide sont conçues pour détecter les particules radioactives émanant d'un test atmosphérique.

I.2.2.2 Les essais sous l'eau

Les tests sous l'eau concernent les explosions qui ont lieu sous l'eau ou près de la surface de l'eau. Relativement peu d'essais sous l'eau ont été effectués. Le premier essai nucléaire sous-marin "Baker" a été réalisé par les Etats-Unis en 1946 sur son Pacific Proving Grounds, dans les îles Marshall, dans le but d'évaluer les effets des armes nucléaires utilisées contre des navires de guerre. Plus

tard, en 1955, l'opération Wigwam des Etats-Unis a conduit un seul essai nucléaire sous-marin à une profondeur de 600 m afin de déterminer la vulnérabilité des sous-marins aux explosions nucléaires. Les explosions nucléaires sous-marines près de la surface peuvent disperser de grandes quantités d'eau et de vapeur radioactives, contaminant les navires, les structures et les personnes à proximité. Les essais nucléaires sous-marins ont été interdits par le traité d'interdiction partielle des essais de 1963. Les stations SSI hydroacoustiques du CTBTO sont celles qui conviennent le mieux pour détecter les explosions nucléaires sous l'eau.

I.2.2.3 Les essais souterrains

Les essais souterrains signifient que des explosions nucléaires sont déclenchées à différentes profondeurs sous la surface de la terre. Celles-ci constituaient la majorité (environ 75%) de toutes les explosions nucléaires déclenchées pendant la guerre froide (1945-1989) ; dont 800 tests effectués par les Etats-Unis et près de 500 effectués par l'Union soviétique. Lorsque l'explosion est entièrement maîtrisée, les essais nucléaires souterrains n'émettent que des retombées négligeables par rapport aux essais atmosphériques. Les essais nucléaires souterrains ont été interdits par le traité d'interdiction complète des essais nucléaires de 1996 (TICE), qui interdit toutes les explosions nucléaires, où que ce soit et par n'importe qui ; 75% de toutes les explosions nucléaires ont eu lieu sous terre.

Les stations SSI sismiques de l'OTICE sont utilisées pour détecter des explosions nucléaires sous terre. Les données sismiques sont combinées avec des données de radionucléides. Seule la technologie des radionucléides peut déterminer si une explosion est d'origine nucléaire; ses stations et laboratoires dans le monde entier surveillent la présence de particules et / ou de gaz rares dans l'atmosphère.



Test souterrain

Test sous l'eau

Test atmosphérique **Les types d'essai [4].**

I.2.2.4 Le développement des arsenaux nucléaires

Les arsenaux nucléaires mondiaux ont considérablement augmenté pendant la guerre froide, passant d'un peu plus de 3 000 armes en 1955 à plus de 37 000 en 1965 à 47 000 en 1975 et plus de 60 000 à la fin des années 1980. L'Israël a lancé un programme nucléaire dans les années 50 et avait achevé la phase de recherche-développement de son programme d'armes nucléaires en 1966, bien qu'il n'ait pas, à la connaissance du public, testé cette arme. Israël a adopté une soi-disant "politique d'ambiguïté nucléaire", qui ne confirme ni ne nie son statut nucléaire. Il n'est pas partie au traité de non-prolifération de 1968 et il a signé mais pas ratifié le TICE.

Officiellement, l'Inde est devenue le sixième pays à développer des armes nucléaires, réalisant l'essai nucléaire "Smiling Buddah" du 18 mai 1974, déclaré comme une explosion nucléaire "pacifique".

En 1982, un autre pays, l'Afrique du Sud, a fait l'acquisition d'armes nucléaires, selon le Centre sur les études de non-prolifération de l'Institut Monterey. A la connaissance du public, l'Afrique du Sud n'a effectué aucun essai nucléaire. Moins de dix ans plus tard, avec la transition prévue vers un gouvernement élu par la majorité des voix, l'Afrique du Sud a démantelé l'ensemble de ses armes nucléaires, le seul pays à ce jour à renoncer volontairement aux armes nucléaires sous son contrôle absolu. Le démantèlement s'est achevé en 1991. La même année, l'Afrique du Sud a adhéré au Traité de non-prolifération de 1968 en tant qu'état non doté d'armes nucléaires. Il a voté massivement pour mettre fin à l'apartheid le 18 mars 1992. Jusqu'au début des années 90, le monde n'a enregistré aucune baisse significative des activités d'essais nucléaires et d'acquisition d'armes nucléaires. Le nombre total d'essais nucléaires dans la seconde moitié des années 80 s'est élevé à 174.

Mais des relations plus chaleureuses entre l'Union soviétique et les Etats-Unis à partir du milieu des années 1980 ont ouvert la voie, tout comme la chute du mur de Berlin en 1989 et la dissolution de l'Union soviétique en 1991, qui ont été remplacées par la Fédération de Russie. La Biélorussie, le Kazakhstan et l'Ukraine, qui, avec la Russie, avaient accueilli l'arsenal nucléaire soviétique, sont devenus des Etats non dotés d'armes nucléaires en vertu du Traité sur la non-prolifération. Le site principal d'essais de l'URSS, Semipalatinsk au Kazakhstan, a été fermé en 1991.

Conclusion

Les USA, l'URSS et le Royaume-Uni s'engagent à cesser leurs essais atmosphériques par la signature du TIPE en Août 1963. La France et la Chine refusent de participer aux négociations afin de poursuivre leurs programmes de recherche. Aussi, bien que le TIPE marque un tournant dans la lutte contre la prolifération nucléaire, traduisant une réelle volonté de limiter les retombées radioactives consécutives aux essais atmosphériques, il n'a que peu d'effet sur le nombre d'essais nucléaires dans leur ensemble, désormais effectués sous terre.

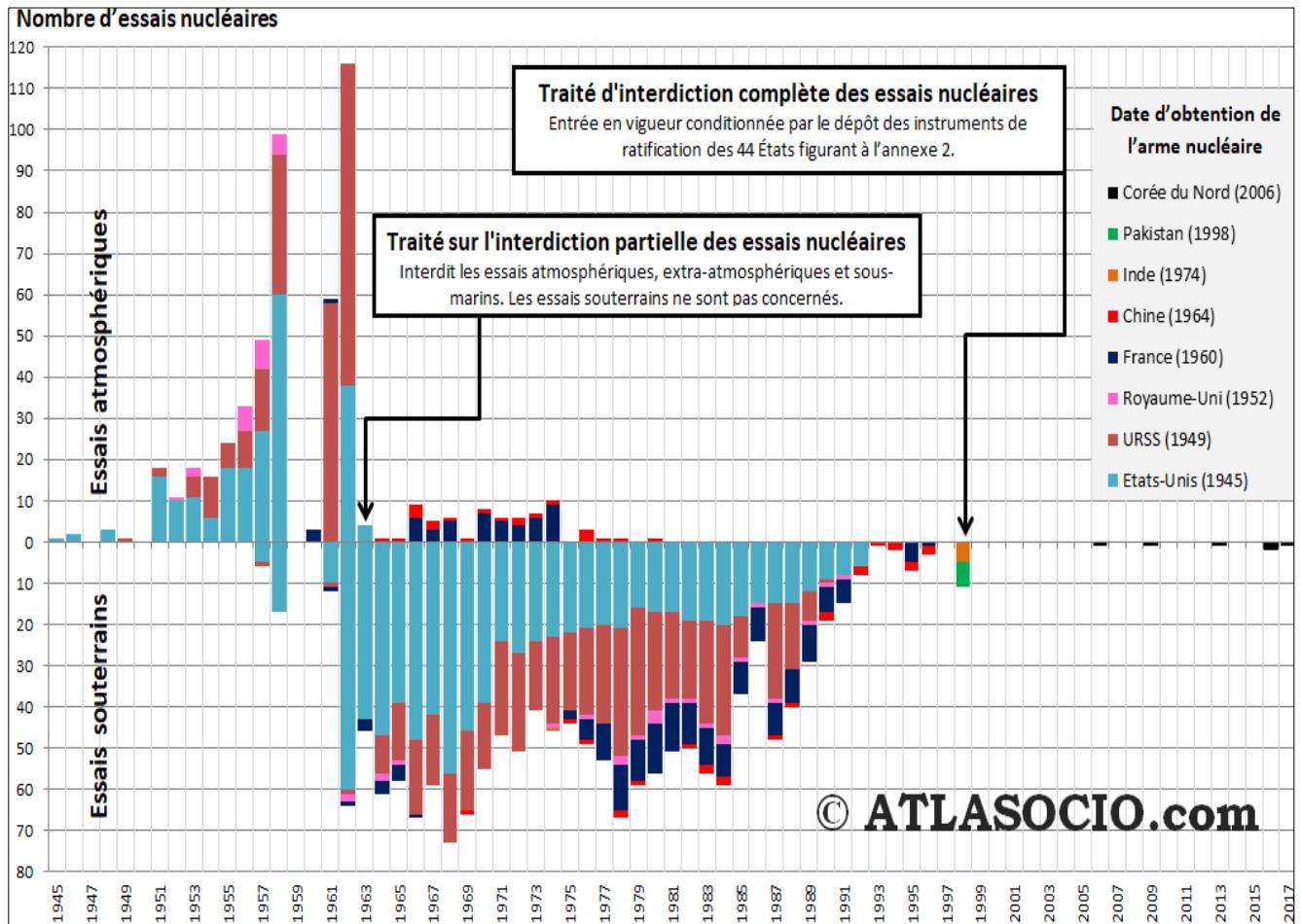


Figure 5: chronologie des essais nucléaires de 1945-2017 [3].

I.3 LES TRAITES LIES A L'INTERDICTION DES ESSAIS NUCLEAIRES

Introduction

Les efforts visant à limiter les essais d'armes nucléaires ont commencé déjà en 1946. A cette époque l'Organisation des Nations Unies a institué une commission de l'énergie atomique chargée de formuler des propositions précises en vue de contrôler les utilisations de l'énergie nucléaire, tel que le plan Baruch. Conformément à cette vision des Nations-Unies, des Etats dotés ou non d'armes nucléaires ont entrepris des négociations bilatérales ou multilatérales afin de conclure des traités qui permettent de contrôler le développement et la prolifération des arsenaux nucléaires. L'ensemble de ces traités qui doivent être signé et ratifié constituent le régime international de non-prolifération. Les plus importants sont le TIPE, le TNP et le TICE et sont gérés par des organisations internationales telles que l'AIEA et l'OTICE. Ces organisations ont pour attributions de faire respecter les dispositions de ces traités.

I.3.1 Traite d'interdiction partielle des essais nucléaires

Le traité d'interdiction partielle des essais nucléaires (TIPE) signé le 05 août 1963 à Moscou par les Etats Unis, l'Union Soviétique (URSS) et le Royaume-Uni est le premier d'entre eux. Entré en vigueur le 10 octobre 1963, il vise à interdire les essais à but militaire et pacifique, dans l'atmosphère, sous l'eau et

dans l'espace mais il ne s'applique pas aux essais souterrains. D'une grande importance environnementale, ce traité répondait largement à la sérieuse préoccupation de la communauté internationale sur les retombées radioactives résultant des essais atmosphériques mais il avait peu d'effet sur le nombre d'essais nucléaires réalisés, car ils furent majoritairement souterrains. Ce traité comporte un préambule et cinq articles.

Dans le préambule, les « parties originaires » (Les Gouvernements des Etats-Unis d'Amérique, du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord et de l'Union des Républiques socialistes soviétiques) déclinent leur objectif principal consistant à « réaliser un accord portant sur un désarmement général et complet sous un contrôle international strict, conformément aux buts des Nations-Unies. Un accord qui mettrait fin à la course aux armements et ferait cesser toute incitation à la production et aux expériences de tous genres d'armes, dont les armes nucléaires » et cherchent « à obtenir l'arrêt de toutes les explosions expérimentales d'armes nucléaires afin de mettre un terme à la contamination de l'environnement de l'homme par des substances radioactives »

L'article 1^{er} stipule les obligations fondamentales du traité. Il interdit à chaque Etat membre de réaliser « toute explosion nucléaire dans l'atmosphère, dans l'espace cosmique, sous l'eau ou dans tout autre lieu si une telle explosion provoque la chute de déchets radioactifs en dehors des limites territoriales de l'Etat sous la juridiction ou le contrôle duquel a été réalisée l'explosion ». Il interdit également d'encourager ou de participer à toute explosion nucléaire dans les lieux cités ci-dessus ou qui aurait les conséquences mentionnées précédemment. L'article 2 concerne les amendements du traité.

L'article 3 porte sur la signature, la ratification, l'adhésion et l'entrée en vigueur du traité ainsi que le rôle des gouvernements dépositaires.

L'article 4 précise la durée illimitée du traité.

L'article 5 traite de l'authenticité des textes du traité en anglais et en russe [6].



Figure 6: Signataire du traité d'interdiction partielle des essais nucléaires [6].

I.3.2 Traité de non-prolifération (TNP)

I.3.2.1 Historique

Le traité de non-prolifération nucléaire (TNP) est un traité multilatéral ouvert à la signature à Londres, Moscou et Washington le 1er juillet 1968. Il vise à réduire le risque que l'arme nucléaire se répande à travers le monde, et son application est garantie par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Le 5 mars 1970, le TNP entre en vigueur pour une durée initiale de 25 ans, conformément à son article X (paragraphe 2). En 1995, le Traité est prorogé pour une durée indéfinie. Il compte à ce jour 191 membres (seul Israël, l'Inde, le Pakistan, et le Sud soudan ne sont pas membres). La situation de la Corée du nord reste trouble concernant le fait de savoir si elle est pleinement retirée ou non du TNP.

Le TNP va devenir la pierre angulaire de la structure des différents traités de contrôle et du système mondial de non-prolifération des armes nucléaires. Il a pour objectif d'empêcher la propagation des armes nucléaires et de la technologie des armements, de promouvoir la coopération aux fins de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire et de favoriser la réalisation de l'objectif du désarmement nucléaire et du désarmement général et complet. Pour le bon fonctionnement du TNP, deux catégories d'Etats sont créées :

- Les puissances nucléaires officielles d'un côté (Etats-Unis, Russie, Royaume-Uni, France, Chine), qui ont selon l'article IX « fabriqué ou font exploser une arme nucléaire ou un autre dispositif nucléaire explosif avant le 1er janvier 1967 » et sont en droit de posséder cet armement. On les appelle les Etats dotés d'armes nucléaires (EDAN).
- Les Etats non dotés d'armes nucléaires (ENDAN) constituent le reste des membres du TNP.

Les premières dispositions du TNP sont que les EDAN « s'engagent à ne transférer à qui que ce soit, ni directement ni indirectement » cette technologie militaire (article I). Les ENDAN, eux, « s'engagent à n'accepter de qui que ce soit, ni directement ni indirectement, le transfert d'armes nucléaires » (article II). L'objectif est donc de contribuer ainsi à mettre un terme à la prolifération nucléaire. Mais, pour faire accepter ce qui peut apparaître comme une discrimination, le TNP prévoit le libre accès de tous ses membres aux technologies nucléaires en vue d'une utilisation pacifique (article IV). L'autre grande disposition porte sur le désarmement nucléaire : l'article VI demande à « chacune des Parties au traité de s'engager à poursuivre de bonne foi des négociations sur des mesures efficaces relatives à la cessation de la course aux armements nucléaires à une date rapprochée et au désarmement nucléaire, et sur un traité de désarmement général et complet sous contrôle international. »

En 1995, lors de la conférence d'examen et d'extension du TNP, l'accord adopté par les Etats parties contenait un programme d'action pour le désarmement dans lequel le TICE était un élément central.

Ce traité, "universel ", devrait être conclu, dans le cadre de la conférence du désarmement, au plus tard en 1996.Ce traité, conformément en son article VIII paragraphe 3, prévoit un examen de son fonctionnement tous les cinq ans. En 1968, avec la ratification du traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, l'AIEA devient le responsable de la surveillance et de la bonne application du traité. Ce traité empêche les Etats signataires d'augmenter leur nombre d'armes nucléaires et pour ceux qui n'en ont pas de chercher à en avoir. A la suite des chocs pétroliers dans les années 1970, plusieurs pays envisagent d'utiliser massivement l'énergie nucléaire pour leurs besoins énergétiques, l'AIEA voit donc accroître le nombre de ses contrôles [6].

I.3.2.2 Résumé du traité

Le TNP est composé de XI articles.

Essentiellement, le traité est un "contrat" entre les Etats dotés d'armes nucléaires (EDAN) et les Etats non dotés d'armes nucléaires (ENDAN) :

Les ENDAN s'engagent à ne pas contribuer au transfert d'armes atomiques, à ne pas en acquérir et à ne pas en fabriquer ;

Les EDAN s'engagent à n'aider daucune manière les ENDAN à acquérir ou fabriquer des armes nucléaires de quelque manière que ce soit (la prolifération "horizontale") ;

Toutes les parties (EDAN et ENDAN) s'engagent à promouvoir et à participer à l'échange d'équipement et de matières, ainsi que d'informations scientifiques et technologiques ;

Toutes les parties s'engagent à poursuivre des négociations en vue d'obtenir des mesures efficaces concernant la cessation de la course aux armements nucléaires à une date rapprochée ainsi qu'au désarmement général et complet.

L'article III du Traité charge l'AIEA de l'organisation des contrôles des produits fissiles (le texte anglais parle de Safeguards pour décrire l'ensemble des activités, le français parle de "garanties").

L'article VIII prévoit au paragraphe 1 et 2 un amendement et au paragraphe 3, un examen de son fonctionnement tous les cinq ans. En son article IX, le traité décrit la signature, la ratification et l'entrée en vigueur.

L'article X, paragraphe 1, traite du droit de retrait de toute partie ayant adhérée au Traité moyennant un préavis de trois mois, si elle estime que ses intérêts suprêmes ont été compromis par la présence d'organismes d'inspection internationaux. Dans le paragraphe 3 de l'article X, le Traité prévoit que le traité reste en vigueur pour 25 ans (jusqu'à 1995) et la manière avec laquelle les parties devaient décider de le proroger, soit pour une période illimitée, soit pour une autre période fixe.

I.3.2.3 Protocole additionnel de l'AIEA

Après la première guerre du Golfe en 1991 et la découverte subséquente du programme d'armes nucléaires irakien illégal (car l'Iraq a signé le TNP), l'AIEA a développé des mesures complémentaires

pour améliorer ses inspections. Elles ne se limitaient plus à des installations et à des matières nucléaires indiquées dans un Etat, mais sont élargies afin également de déceler des activités illégales, non-déclarées. A cette fin, l'AIEA a fondé le Protocole additionnel en 1998. Ce Protocole peut être ajouté à un Accord Safeguards entre un Etat et l'AIEA. Son objectif est d'augmenter l'utilité et l'efficacité des contrôles des garanties. Le Protocole Additionnel donne plus de droits à l'AIEA pendant et à côté des inspections, comme la possibilité d'avoir accès à des bâtiments et à des données à très court terme, la possibilité de prélever des échantillons à des endroits arbitraires dans des installations et d'analyser ces échantillons ultérieurement et d'inspecter à l'aide de satellites.

I.3.2.4. Pays membres du TNP

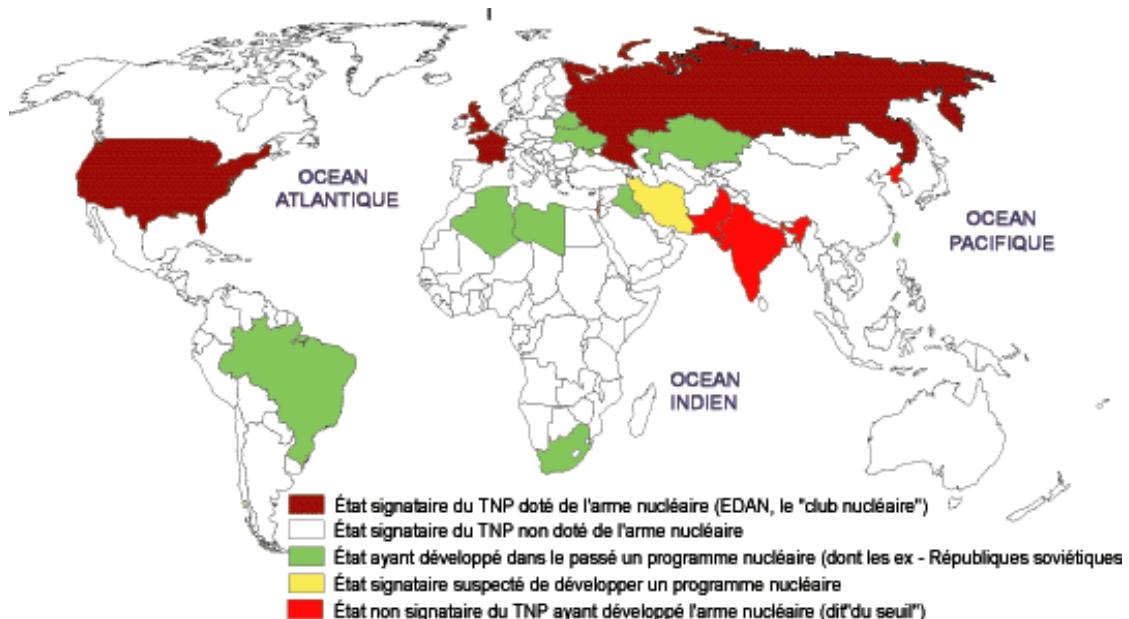


Figure 7: Etats ayant ratifiés le TNP [6].

I.3.3 Traite d'interdiction complète des essais nucléaires et la création de l'OTICE.

I.3.3.1 Historique du traité

Le traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) ou, en anglais, Comprehensive Nuclear-test-Ban Treaty (CTBT) est un traité multilatéral négocié en 1996 dans le cadre de la conférence du désarmement de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Ce traité interdit toutes les explosions nucléaires partout sur la planète et pour tous. Il a été ouvert à la signature de tous les Etats le 24 septembre 1996. Le TICE a été signé par 184 pays et ratifié par 163 Etats sur les 196 pays du monde. Cela signifie que le traité est quasi universel. Le TICE entrera en vigueur 180 jours après la date de dépôt des instruments de ratification des 44 Etats indiqués par l'annexe 2 du traité. Ces 44 Etats ont formellement participé aux travaux de la conférence sur le désarmement de 1996 et ils disposaient des réacteurs nucléaires sur leur territoire à la date des négociations.

Les explosions expérimentales d'armes nucléaires effectuées par l'inde et le Pakistan ainsi que celles effectuées par la République Populaire Démocratique de Corée (RPDC) en 2006, 2009 et 2013, ont été condamnées au niveau international et ont abouti à l'adoption unanime de sanctions par le conseil de sécurité de l'organisation des nations unies.

Jusqu'à présent, la plupart des pays ont signé et ratifié le TICE, y compris trois pays possesseurs d'armes nucléaires : la France, le Royaume-Uni et la Russie.

Le TICE prévoit la mise en place de l'organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE) ou, en anglais, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty organisation (CTBTO). Puisque le traité n'est pas encore entré en vigueur, la commission provisoire est l'organe provisoire chargée de promouvoir l'entrée en vigueur et l'universalisation du TICE et d'établir le régime de surveillance et de vérification international [5].

I.3.3.2 Résumé du traité

Le traité interdit toutes les explosions nucléaires sur terre, que ce soit à des fins militaires ou pacifiques. Il comprend un préambule, 17 articles, deux annexes et un protocole avec deux annexes.

Un autre texte important est la résolution adoptée par les pays signataires le 19 novembre 1996, créant la commission préparatoire de l'organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE ou en anglais CTBTO).

Le préambule décrit l'importance du traité en tant que mesure importante de non-prolifération et de désarmement nucléaire.

L'article I stipule les obligations fondamentales du traité. Il interdit aux Etats parties de procéder à une explosion nucléaire. Il interdit également d'encourager ou de participer à l'exécution d'une explosion nucléaire.

L'article II prévoit la création de l'organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires à Vienne afin d'assurer la mise en œuvre du traité et de créer un forum de consultation et de coopération.

L'article III se concentre sur les mesures nationales de mise en œuvre.

L'article IV décrit le régime de vérification global pour surveiller le respect des dispositions du Traité. Le régime consiste à constituer un réseau mondial de stations de surveillance (le Système international de surveillance), un centre international de données à Vienne, un processus de consultation et de clarification, des inspections sur place et des mesures de confiance.

L'article V décrit les mesures visant à remédier à une situation qui contrevient aux dispositions du Traité et à assurer le respect du Traité.

L'article VI traite du règlement des différends qui pourraient se poser concernant la demande ou l'interprétation du Traité.

L'article VII concerne les amendements au Traité.

L'article VIII stipule quand une révision du Traité aura lieu après son entrée en vigueur.

L'article IX stipule que le traité a une durée illimitée.

L'article X traite de l'état du Protocole et des annexes.

L'article XI concerne la signature du Traité.

L'article XII traite de la ratification du Traité.

L'article XIII porte sur l'adhésion au Traité.

L'article XIV traite de l'entrée en vigueur du Traité. Cela aura lieu 180 jours après que les 44 Etats énumérés à l'annexe 2 du Traité ont tous été ratifiés.

L'article XV précise que le traité ne fait pas l'objet de réserves.

L'article XVI fait référence au dépositaire du traité.

L'article XVII traite de l'authenticité des textes du traité arabe, chinois, anglais, français, russe et espagnol. Moins de dix pays énumérés à l'annexe 2 n'ont pas encore ratifié pour l'entrée en vigueur (Chine, Etats-Unis, Israël, Iran, Egypte, RPDC, Inde, Pakistan).

L'annexe 1 du traité énumère les Etats par régions géographiques aux fins des élections au Conseil exécutif. L'annexe 2 du Traité énumère les 44 Etats qui doivent ratifier le traité pour qu'il entre en vigueur.

Le protocole Partie I décrit les fonctions du système international de surveillance (SSI) et du centre international de données (CID).

Le protocole la partie II définit les procédures d'inspection sur place.

Le protocole la partie III traite des mesures de confiance .

L'annexe 1 du protocole énumère les installations composant le réseau SSI.

L'annexe 2 du protocole énumère les paramètres de caractérisation pour le dépistage des événements standard CID [5].

Tableau 3: Statut de signature et de ratification au 13 Février 2020.

Total des Etats composant les Nations Unies	196
Total des Etats ayant signé	184
Total des Etats ayant ratifié	167
Total des Etats n'ayant pas signé	12
Total des Etats n'ayant pas ratifié	29
Total des Etats de l'annexe 2	44
Total des Etats de l'annexe 2 ayant ratifié	36
Total des Etats de l'annexe 2 n'ayant pas ratifié (Chine, Etats-Unis, Israël, Iran, Egypte, RPDC, Inde, Pakistan)	08
Total des Etats de l'annexe 2 ayant signé mais n'ayant pas ratifié (Chine, Etats-Unis, Israël, Iran, Egypte)	05
Total des Etats de l'annexe 2 n'ayant pas signé (RPDC, Inde, Pakistan)	03

A la lecture de ce tableau, on peut dire que l'entrée en vigueur du TICE est conditionnée par la ratification de huit (08) Etats.

Annexe 2 du traité : Afrique du Sud, Algérie, Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Bangladesh, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, Colombie, Égypte, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran (République islamique d'), Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays -Bas, Pérou, Pologne, République de Corée, République populaire démocratique de Corée, Roumanie, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Slovaquie, Suède, Suisse, Turquie, Ukraine, Viet Nam, Zaïre.



Figure 8: Etat des ratifications du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires en 2017 [3]

CHAPITRE II

ORGANISATION DU TRAITE D'INTERDICTION COMPLETE

DES ESSAIS NUCLEAIRES

INTRODUCTION :

Dans l'attente de l'entrée en vigueur du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) et de la création de l'OTICE (CTBTO en anglais) proprement dite, une Commission préparatoire a été créée le 19 novembre 1996 par les Etats signataires et son siège est à Vienne, en Autriche. Il s'agit d'une organisation intérimaire chargée de mettre en place le régime de vérification du (TICE) en vue de l'entrée en vigueur du traité et de promouvoir son universalisation. La Commission préparatoire comprend deux organes : un organe plénier chargé de définir les orientations et composé de tous les Etats signataires, et un Secrétariat technique provisoire (STP) qui aide la Commission à remplir ses fonctions, sur les plans aussi bien technique que fonctionnel, et qui s'acquitte des tâches que celle-ci lui confie [7 - 8].

II.1 LA COMMISSION PRÉPARATOIRE

La commission est composée de deux organes principaux : **un organe plénier** où siègent les pays signataires, lequel est appuyé par trois groupes : un groupe de travail A, un autre groupe de travail B et un groupe de conseil.

Le groupe de travail A s'occupe de questions budgétaires et administratives, telles que le budget annuel, les règlements et règles financiers et statutaires et les questions juridiques.

Le groupe de travail B traite de l'examen des questions de vérification.

Les deux groupes de travail A et B soumettent des propositions et des recommandations pour examen et adoption par la Commission préparatoire.

Le groupe consultatif conseille la Commission et ses organes subsidiaires, à savoir les deux groupes de travail, sur les questions financières, budgétaires et administratives connexes. Le groupe consultatif est composé d'experts des Etats signataires, qui ont une réputation reconnue et ont de l'expérience en matière financière au niveau international.

L'autre organe principal est le **secrétariat technique provisoire (STP)** qui aide la conférence des Etats Parties et le conseil exécutif dans l'accomplissement de leurs fonctions. Le STP a trois divisions techniques :

- ✓ La Division du système de surveillance international,
- ✓ La Division du centre international de données ;
- ✓ La Division des inspections sur place ;

Ces divisions sont soutenues par :

- ✓ Une division des affaires juridiques et des relations extérieures,
- ✓ Une division Administrative.

L'OTICE est essentiellement financée par les contributions des pays membres.

Mis à part la construction du régime de vérification, le STP assiste les pays membres dans leurs activités spéciales de sensibilisation, telles que les conférences et les réunions ministrielles visant à promouvoir

l'entrée en vigueur du traité. Le STP entreprend également une série d'ateliers et d'autres activités de sensibilisation pour promouvoir le TICE et renforcer le régime de vérification.

Un réseau mondial de 321 stations de surveillance sera établi et exploité par les pays hôtes en coopération avec le secrétariat technique provisoire. Les stations communiqueront les données au centre international de données basé à Vienne.

II.2 L'OTICE PROPREMENT-DIT

II.2.1 Le CTBTO après l'entrée en vigueur.

Au moment où le traité entrera en vigueur, le système de vérification devra être opérationnel de manière permanente. La première session de la conférence des pays membres sera convoquée au plus tard trente jours après l'entrée en vigueur du traité. La Conférence des Etats membres se réunira chaque année en session ordinaire, mais elle pourra également être convoquée en session extraordinaire sur décision de la conférence des Etats, à la demande du conseil exécutif, ou à la demande de tout Etat partie, appuyé par la majorité des pays membres. La conférence des Etats Parties sera l'organe principal de l'OTICE. Elle devra examiner toutes les questions relatives au traité et elle aura le pouvoir de faire des recommandations et de prendre des décisions sur tous les sujets liés à l'application du TICE. Elle sera aussi responsable d'élire les membres du conseil exécutif, qui est l'organe exécutif de l'OTICE et qui se compose de 51 membres. Le conseil exécutif devra mettre en œuvre les dispositions de l'OTICE, rendra compte de ses activités à la conférence et supervisera les activités du secrétariat technique. Dans le cas où un pays membre soulèverait des préoccupations relatives à son manque de conformité à l'égard du Traité, le conseil exécutif devra consulter les Etats parties impliqués et établir des recommandations concernant les mesures à prendre en vue de redresser la situation [5-8].

II.2.2 Les organes de l'OTICE après son entrée en vigueur :

L'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires doit assurer l'application des dispositions du Traité et ménager un cadre de consultation et de coopération. Elle comprend trois organes :

II.2.2.1 La Conférence des Etats parties :

Elle supervise l'application du traité et les activités des deux autres organes, le **conseil exécutif** et le **secrétariat technique** (ST). Elle compte un représentant de chaque pays membre et tient, chaque année, des sessions ordinaires. Elle prend ses décisions par consensus, si aucun consensus ne se dégage, une majorité des deux tiers est nécessaire pour une décision relative à une question de fond.

II.2.2.2 Le Conseil exécutif :

Il est l'organe principal de l'organisation chargé de la prise de décisions ; il supervise les activités du secrétariat technique. Il se compose de 51 membres, élus par la conférence des Etats parties. Le conseil examine les demandes d'inspection sur la base des informations rassemblées par le SSI, les moyens techniques nationaux, ou sur une combinaison de ces deux types d'informations. Si la demande d'inspection est approuvée, l'inspection doit commencer au plus tard six jours après la demande, mais ne peut durer plus de 70 jours. La superficie d'une zone d'inspection ne doit pas dépasser 1 000 km². Il ne doit pas y avoir de distance linéaire supérieure à 50 kilomètres dans une direction quelconque. Le pays inspecté accorde à l'équipe d'inspection un accès illimité sauf s'il juge nécessaire de s'y opposer pour protéger des intérêts relevant de sa sécurité nationale. Le conseil exécutif prend les décisions sur les questions de fond à la majorité des deux tiers.

II.2.2.3 Le Secrétariat technique :

Il est dirigé par le Directeur Général, et aide les Etats parties à appliquer le Traité et assume différentes fonctions de vérification et autres. Il supervise et coordonne l'exploitation du Système de Surveillance International et exploite le Centre international de données.

II.3 Le régime de vérification :

Introduction

Le régime de vérification du TICE vise à détecter toute explosion nucléaire survenue sur terre - souterraine, sous-marine ou dans l'atmosphère. Il comprend les éléments suivants :

- Système de surveillance international
- Centre de données international
- Infrastructure de communication globale
- Consultation et clarification
- Inspection sur place
- Mesures de confiance

II.3.1 Le système de surveillance international (SSI)

II.3.1.1- Le réseau du SSI

Le système de surveillance international (SSI) constitué de 337 installations (321 stations d'écoute et 16 laboratoires de radionucléides) utilise quatre technologies complémentaires (sismiques, hydroacoustiques, infrasons, radionucléides) réparti dans 90 pays pour différencier les phénomènes naturels et anthropiques des explosions nucléaires. Ces installations, mise en place à 91,6% (30 juin 2019), une fois achevée, seront capables de détecter toute explosion nucléaire partout sur la planète.

Les technologies de surveillance sismique, hydroacoustique et infrasonore (collectivement appelées «**forme d'onde**») sont utilisées pour détecter l'énergie libérée par une explosion ou un événement naturel dans un environnement souterrain, sous-marin ou atmosphérique.

La surveillance des radionucléides utilise des échantillons d'air pour recueillir les particules de l'atmosphère. Les échantillons sont ensuite analysés à la recherche de produits radioactifs créés par une explosion nucléaire et transportés dans l'atmosphère. L'analyse de la teneur en radionucléides peut confirmer si un événement enregistré par les autres technologies de surveillance était en réalité une explosion nucléaire. La capacité de surveillance de certaines stations est améliorée par l'ajout de systèmes de détection de gaz rares radioactifs produits par des réactions nucléaires.

II.3.1.2- Les technologies de surveillance :

Le SSI utilise les quatre technologies les plus récentes :

- **Surveillance Sismique** : 50 stations primaires et 120 stations sismiques auxiliaires surveillent les ondes de choc dans la terre. La grande majorité de ces ondes de choc sont causés par des tremblements de terre, mais des explosions artificielles telles que les explosions de mines ou les essais nucléaires sont également détectés.
- **Surveillance hydroacoustique** : 11 stations hydroacoustiques enregistrent les ondes sonores dans les océans. Les ondes sonores provenant d'explosions peuvent voyager très loin sous l'eau.
- **Surveillance Infrasonore** : 60 stations à la surface peuvent détecter des ondes sonores à très basse fréquence (inaudible à l'oreille humaine) émises par de grandes explosions.
- **Surveillance Radionucléide**: 80 stations mesurent l'atmosphère pour les particules radioactives; 40 d'entre eux ramassent également du gaz noble . Seules ces mesures peuvent indiquer clairement si une explosion détectée par les autres méthodes était en fait nucléaire ou non. Ils sont soutenus par 16 laboratoires de radionucléides [8,9].

Tableau 4: Etat du programme d'installation et de certification des stations du SSI (juin 2019) [9].

Type de station	Installation achevée		Installation en cours	Marché en cours d'adjudication	Installation non commencée
	Stations certifiées	Stations non certifiées			
Surveillance sismologique. (réseau primaire)	42	4	1	0	3
Surveillance sismologique. (réseau auxiliaire)	104	9	4	0	3
Surveillance hydroacoustique	10	1	0	0	0
Surveillance des infrasons	45	0	4	0	11
Surveillance des radionucléides	62	4	5	5	4
Total	263	18	14	5	21

Tableau 5: Etat du programme d'installation et de certification des systèmes de détection des gaz rares (juin 2019) [9].

Nombre total prévu de systèmes de détection des gaz rares :	Systèmes installés	Systèmes certifiés
40	31	25

Tableau 6: Etat du programme d'homologation des laboratoires de radionucléides [9].

Nombre total de laboratoires : 16	Laboratoires homologués : 11
-----------------------------------	------------------------------

II.3.1.3 Les technologies de surveillance : fonctionnement

a) *Les stations sismiques*

L'objectif de la surveillance sismologique est de détecter et de localiser des explosions nucléaires souterraines. Une fois pleinement opérationnel, le système sismologique du système de surveillance de l'OTICE consistera en un réseau composé de 50 stations sismiques primaires qui transmettent leurs données continues en temps réel au CID de Vienne et de 120 stations sismiques auxiliaires qui fournissent des données à la demande du CID.

Ce réseau détecte deux types d'ondes sismiques produites par les séismes et autres événements, naturels ou d'origine humaine à savoir les ondes de volume et les ondes de surface. Les ondes

de volume ou ondes internes (P), plus rapides, se propagent à l'intérieur de la terre, tandis que les ondes de surface (S), plus lentes, se propagent en surface.

Les ondes sismiques sont de nature mécanique. Une onde est une perturbation du milieu qui se propage dans l'espace et le temps ; sa propagation est fonction des propriétés physiques du milieu. On peut décrire le phénomène de la propagation des ondes sismiques à partir de :

La loi de Hooke : reliant contrainte et déformation pour un milieu élastique isotrope et homogène s'écrit alors :

$$\sigma_{i,j} = \lambda \cdot \theta \cdot \delta_{i,j} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{i,j} = \lambda \cdot (\operatorname{div} \vec{U}) \cdot \delta_{i,j} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{i,j} \quad (1)$$

θ représente la dilatation volumique,

\vec{U} : étant le déplacement du point M au passage de l'onde élastique .Ceci dit si M est un point du matériau au repos, après déformation, il devient M' . Le déplacement $\vec{U}(M) = \overrightarrow{MM'}$

$\delta_{i,j}$: Symbole de Kronecker est tel que

$$\delta_{i,j} = 1 \quad , \text{ si } i = j \quad \text{et} \quad \delta_{i,j} = 0 \quad \text{si } i \neq j$$

λ et μ sont les coefficients de Lamé strictement positifs qui quantifient (caractérisant le comportement) l'élasticité du matériau.

La formule générale de l'équation d'onde s'écrit :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \int_S dF_s \cdot dS + \int_V dF_i \cdot dV \quad (2)$$

V : vitesse de l'onde en m.s^{-1}

$$dF_s = \sigma_{i,j} \cdot n_j$$

dF_s : La force de surface par unité de surface

dF_i : force de volume

dV : Volume élémentaire

dS : L'aire de sa frontière

$\sigma_{i,j}$: Tenseur de contraintes

n_j : Vecteur unitaire perpendiculaire à l'élément de surface

L'équation (2) est trop compliquée pour être résolue analytiquement. En négligeant les gradients des paramètres de Lamé, l'équation d'ondes se simplifie et aura pour expression :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \nabla^2 \cdot V^2 U \quad (3)$$

Pour une onde P sa vitesse est :

$$V_P = \sqrt{\frac{(2\mu + \lambda)}{\rho}} \quad (4)$$

Pour une onde S sa vitesse :

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5)$$

Les deux paramètres λ et μ sont appelés coefficient de Lamé et ρ la masse volumique .Ils sont suffisant pour décrire complètement la propagation des ondes dans un matériau élastique, linéaire homogène et isotrope [16].

Une station sismologique est composée en général de trois éléments principaux : un sismomètre qui mesure le mouvement du sol, un système qui enregistre les données numérisées avec un horodatage précis, et une interface avec le système de télécommunications. Il existe deux types de stations sismiques : une station à trois composantes (3-C) et une station composite.

Les stations 3-C sont équipées de capteurs sur un site unique pour enregistrer les mouvements du sol dans une large bande de fréquences selon trois directions perpendiculaires (haut / bas, est / ouest et nord / sud).

Les stations composites comportent un mini réseau de sismographes à courte période (9 à 25 capteurs sismiques disposés géométriquement et réparties sur une zone) et des instruments large bande à trois composantes qui sont spatialement séparés. Le réseau primaire est en majeure partie constitué de stations composites (30 sur un total de 50), tandis que le réseau auxiliaire comprend principalement des stations 3-C (112 sur 120). Les stations de réseaux sismiques ont une capacité de détection améliorée et peuvent mesurer indépendamment la direction (azimut) et la vitesse des ondes se propageant à partir d'une source. Les tableaux sismologiques aident à déterminer la localisation, la puissance et la nature d'un événement sismique en fonction des informations disponibles sur la direction et la vitesse du signal.

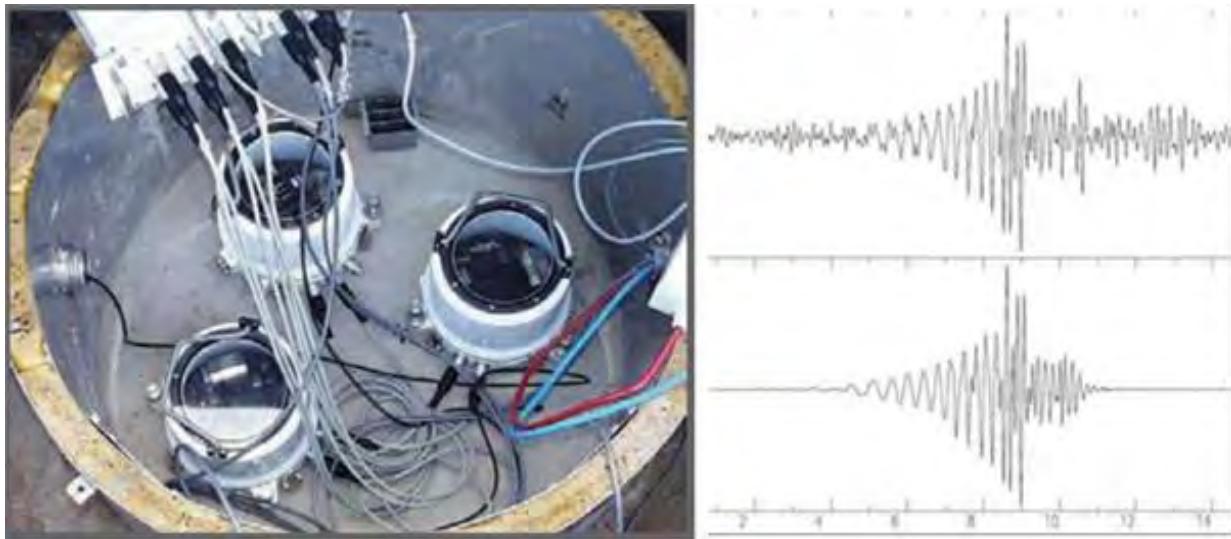


Figure 9: Exemple d'installation sismique (3-C) de forme d'onde

b) Les stations infrasonores

Elles comptent au total 60 stations réparties dans 34 pays qui surveillent le globe principalement en cas d'explosion nucléaire atmosphérique. Ces stations utilisent des micros barographes pour détecter des micros variations des ondes sonores de très basses fréquences, inaudibles pour l'homme. En fait, ces ondes sont en dessous de la bande de fréquence audible par l'oreille humaine, qui varie généralement de 20 à 20 000 Hz.

La vitesse de propagation des infrasons dans l'air (330 m.s^{-1}) et l'eau (1430 m.s^{-1}) est proche de celles des ondes sonores .

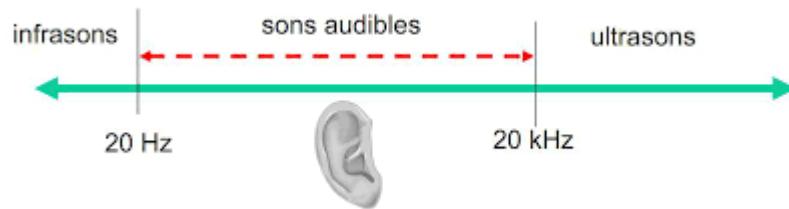


Figure 10: Domaines du spectre des ondes infrasonores [15].

L'infrason est produit par une variété de sources naturelles et artificielles : des volcans explosifs, des tremblements de terre, des météores, des tempêtes et des aurores dans le monde naturel ; les explosions nucléaires, minières et chimiques, ainsi que les lancements d'avions et de fusées dans l'arène artificielle.

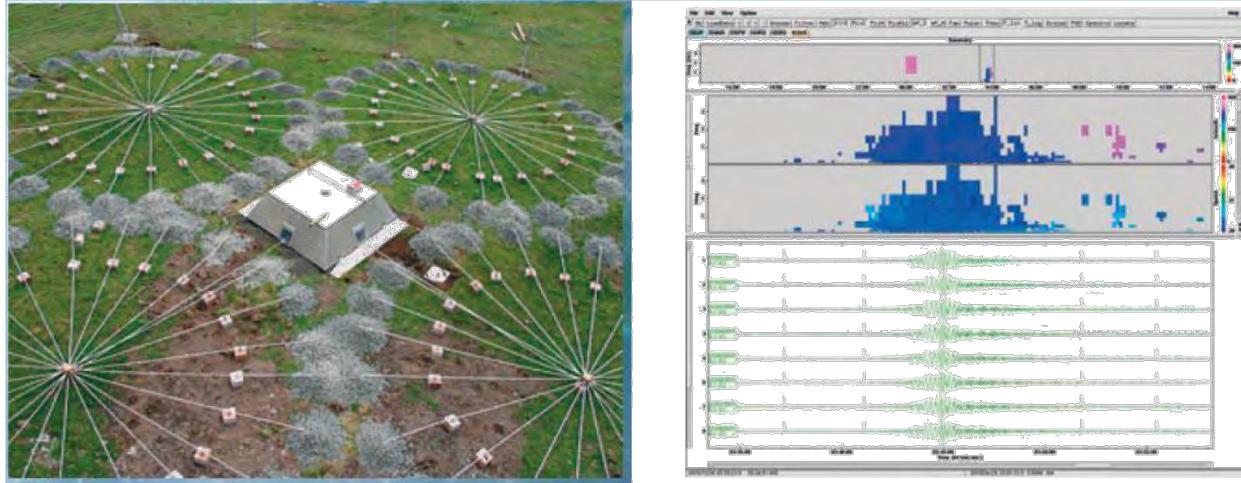


Figure 11: Station infrasonore et l'onde générée [5].

c) *Les stations hydroacoustiques*

Les stations de surveillance hydroacoustique du SSI sont conçues pour surveiller les océans dans l'hypothèse d'une explosion nucléaire sous-marine, atmosphérique proche de la surface de l'océan ou souterraine proche des côtes océaniques. Cette détection est possible grâce à l'enregistrement de signaux qui indiquent des variations de la pression hydraulique produites par des ondes sonores qui se propagent dans l'eau. En raison de la bonne transmission du son dans l'eau, même des signaux relativement faibles sont aisément discernables à des distances très grandes.

Le réseau hydroacoustique de l'OTICE comprend 11 stations dispersées à travers le monde et est formé de deux types : les stations sous-marines à hydrophones (au nombre de 6) et les stations de détection de phases T.

Les stations à hydrophones utilisent des microphones sous-marins qui transmettent des signaux par câble à une station côtière. Les stations de détection de phases T, quant à elles, mesurent les ondes sismiques résultant du contact des ondes hydroacoustiques avec la surface terrestre. Ces stations sont généralement placées sur de petites îles océaniques présentant des rivages abrupts. Les stations hydroacoustiques fonctionnent en continu (24 heures sur 24) et renvoient leurs informations en temps réel au centre de données international, à Vienne, par satellite.

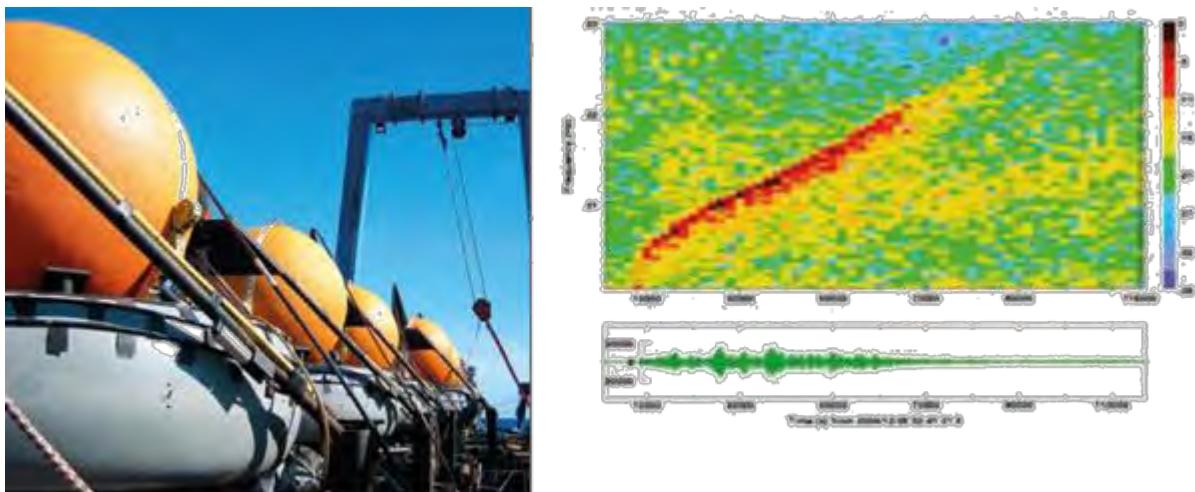


Figure 13: station hydroacoustique et onde générée

d) Les stations de détection de radionucléides.

La technique de surveillance des radionucléides complète les trois techniques de formes d'onde utilisées dans le régime de vérification prévu par le Traité. C'est la seule technique qui permet de confirmer si une explosion détectée et localisée par les techniques de formes d'onde correspond à un essai nucléaire.

Le réseau global de surveillance des radionucléides de l'OTICE comprend 80 stations radionucléides appuyées par 16 laboratoires d'analyse de radionucléides. Il permet l'observation en continu des échantillons d'aérosols des radionucléides solides ou des particules de radionucléides. 40 des 80 stations radionucléides disposent de moyens de détection additionnels pour les gaz rares. Ces stations surveillent l'atmosphère dans le but de détecter les particules radioactives et les gaz rares (par exemple, le Xénon) résultant d'explosions nucléaires souterraines, atmosphériques ou sous-marines.

e) Les laboratoires de radionucléides

Seize laboratoires de radionucléides, chacun situé dans un Etat différent, appuient le réseau de stations de surveillance des radionucléides du SSI. Ces laboratoires ont un rôle important, qui est de corroborer les observations des stations du SSI, notamment en confirmant la présence de produits de fission ou d'activation qui tendraient à montrer qu'un essai nucléaire a eu lieu. En outre, ils contribuent au contrôle de la qualité des mesures effectuées par les stations et à l'évaluation de la performance du réseau en analysant régulièrement des échantillons provenant de toutes les stations certifiées du SSI. Ces laboratoires de stature internationale analysent également d'autres types d'échantillons, comme ceux qui sont recueillis lors des études d'implantation des stations ou des missions de certification.

Les laboratoires de radionucléides sont homologués conformément à des critères exigeants d'analyse des spectres gamma. Le processus d'homologation donne l'assurance que les résultats fournis par un laboratoire sont exacts et valides. Ces laboratoires participent également aux essais d'aptitude annuels organisés par la Commission. En outre, l'homologation de laboratoires des radionucléides pour l'analyse des gaz rares a commencé en 2014

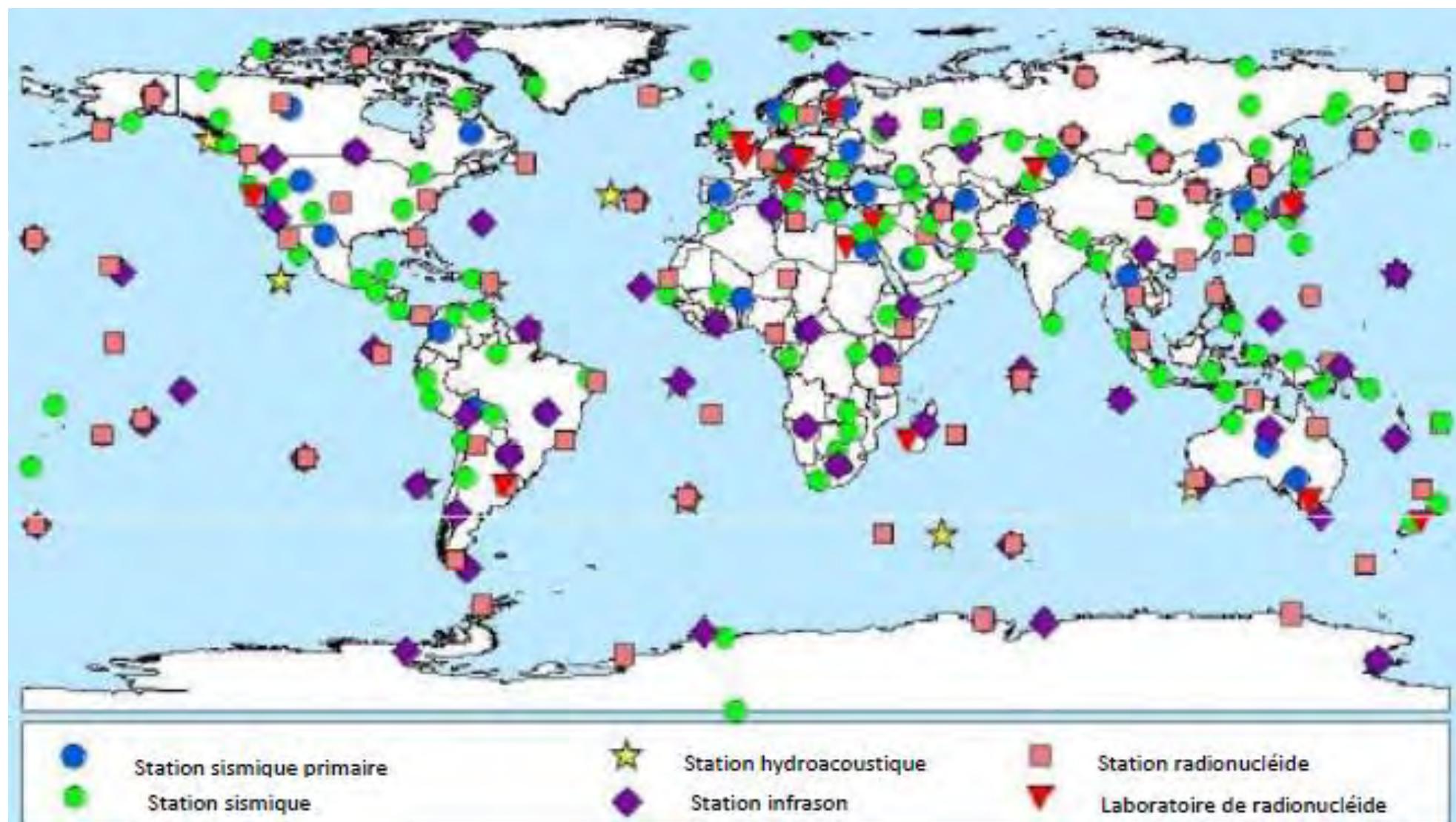


Figure 14: Le réseau complet du SSI [11].

II.3.1.4 Les données du système de surveillance internationale

Les données sismiques, hydroacoustiques, infrasonores et radionucléides du SSI sont envoyés au centre des données de Vienne via l'infrastructure globale de communication (GCI) en temps réel. Le GCI est également utilisé pour distribuer des données et des rapports d'analyse aux pays signataires. Les données provenant des quatre technologies sont également accessibles à tous les pays membres d'une manière ouverte, opportune et pratique.

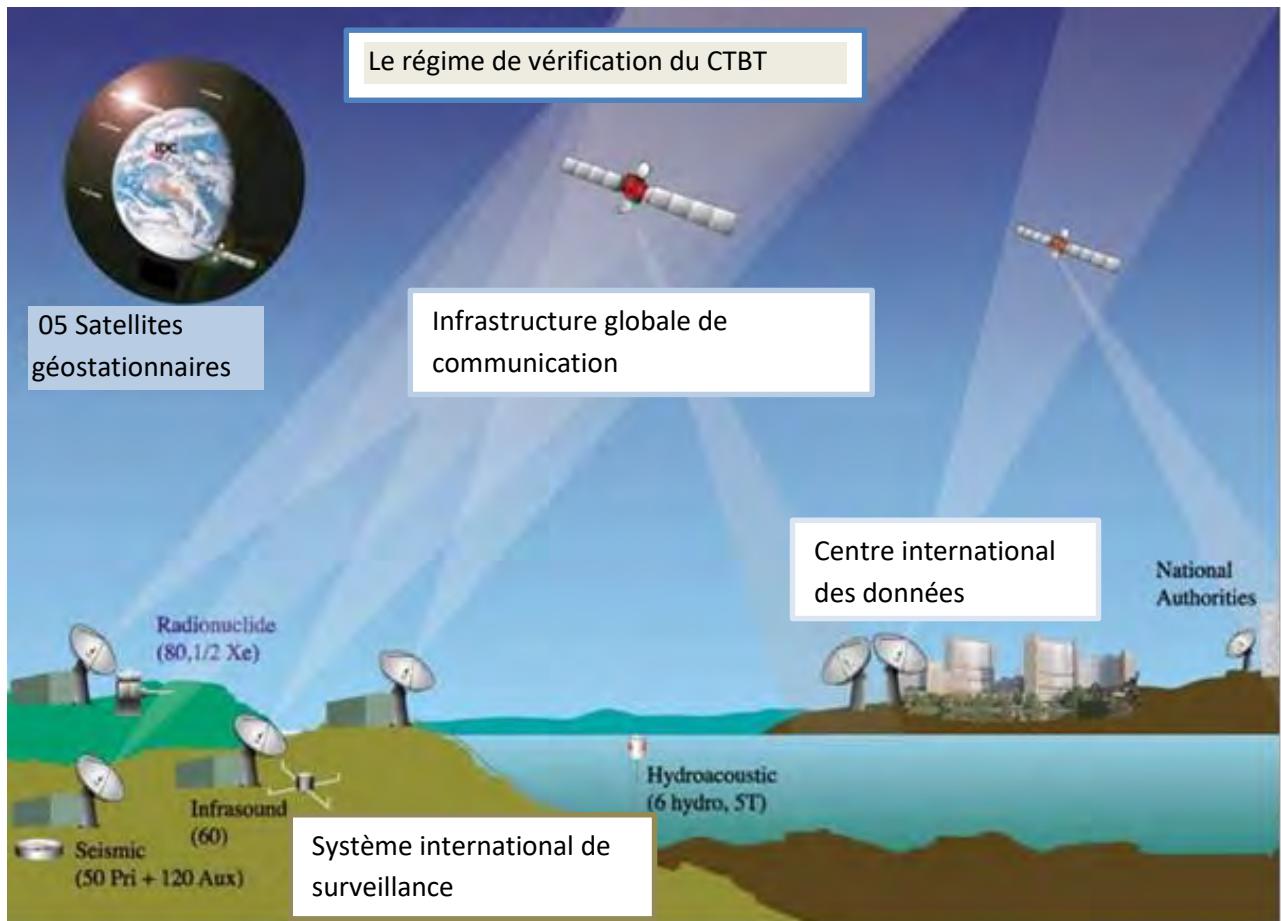


Figure 15: transmission des données SSI du régime de vérification [11].

II.3.2 Centre international de collecte des données (CDI)

Le Centre international de données est l'un des piliers du système de vérification du TICE. Son objectif principal est de collecter, traiter automatiquement, analyser de manière interactive et distribuer des produits sur la base de données provenant des 337 installations du système de surveillance international une fois traitées et analysées, les données sont distribuées sous forme de rapports, de bulletins ou de listes d'événements aux pays signataires. Ces pays peuvent utiliser ces informations pour déterminer si un événement détecté par le SSI a effectivement été

une explosion nucléaire ou à une autre origine. Le CDI archive également toutes les données et les bulletins de données dans son centre informatique.

Le CDI applique régulièrement des méthodes de traitement automatique et des analyses humaines interactives aux données brutes du SSI afin de produire et d'archiver des produits CDI standard au nom de tous les pays membres. Ces produits sont fournis gratuitement aux pays signataires et sont sans préjudice des jugements définitifs concernant la nature de tout événement.

II.3.2.1 Produits du CDI de type I

Une fois que les données brutes arrivent au CDI en temps presque réel, elles sont automatiquement traitées par des logiciels spécialement conçus à cet effet. Des listes standard d'événements (LSE1, LSE2 et LSE3) sont alors générées et mises à la disposition des Etats signataires.

- ✓ La **première Liste standard d'événements**, LSE1, comprend toutes les données sismologiques et hydroacoustiques.
- ✓ La **deuxième liste, LSE2**, basée sur la LSE1, contient les données des stations d'infrasons et les données sismologiques additionnelles traitées provenant, sur demande, des stations sismologiques auxiliaires.
- ✓ La **troisième liste**, LSE3, comprend les données qui arrivent plus tard et qui proviennent des stations auxiliaires de surveillance sismologique et d'infrasons.

Les processus automatiques utilisés pour compiler les LSE à partir des données originales sont assez sophistiqués, mais les résultats de ces processus automatiques sont toujours examinés par un analyste afin de garantir des informations fiables et complètes aux Etats signataires. L'ensemble du processus a lieu dans le Centre d'opérations à Vienne.

II.3.2.2 Produits du CDI de type II

Le nombre de stations de détection des signaux et leur distribution géographique constituent des facteurs décisifs pour déterminer de façon précise la localisation et la nature d'un événement. Une fois confirmés et corrigés, tous les événements sont listés **dans le Bulletin révisé des événements (BRE)**.

Pour distinguer les phénomènes naturels de ceux qui ne le sont pas, le Centre international de données effectue un dépistage automatique des événements. Les phénomènes définis comme naturels sont automatiquement exclus. Dans les cas où les phénomènes sont définis comme d'origine humaine ou bien dans les cas où le dépistage n'a pas fourni de réponse claire, les

événements sont conservés et listés comme phénomènes potentiellement suspects dans le **bulletin standard des événements filtrés (BSEF)**.

La technologie de surveillance des radionucléides est la seule capable de confirmer si une explosion détectée et localisée par les autres technologies de surveillance constitue un essai nucléaire. Après avoir retracé et analysé les particules radioactives dans l'air à travers un processus automatique, le Centre international de données (CID) peut fournir un **rapport automatique sur les radionucléides** (RAR) contenant la liste des résultats obtenus. Après l'examen du contenu du rapport, les analystes des radionucléides du CID font une synthèse des résultats dans le **rapport révisé sur les radionucléides** (RRR). Les résultats du processus de dépistage sont présentés dans le rapport standard révisé sur les radionucléides (RSRR).

Finalement, les Etats parties ont accès à ce rapport, ainsi qu'aux données brutes et aux autres bulletins, afin de leur permettre d'établir un jugement clair sur l'événement suspect.

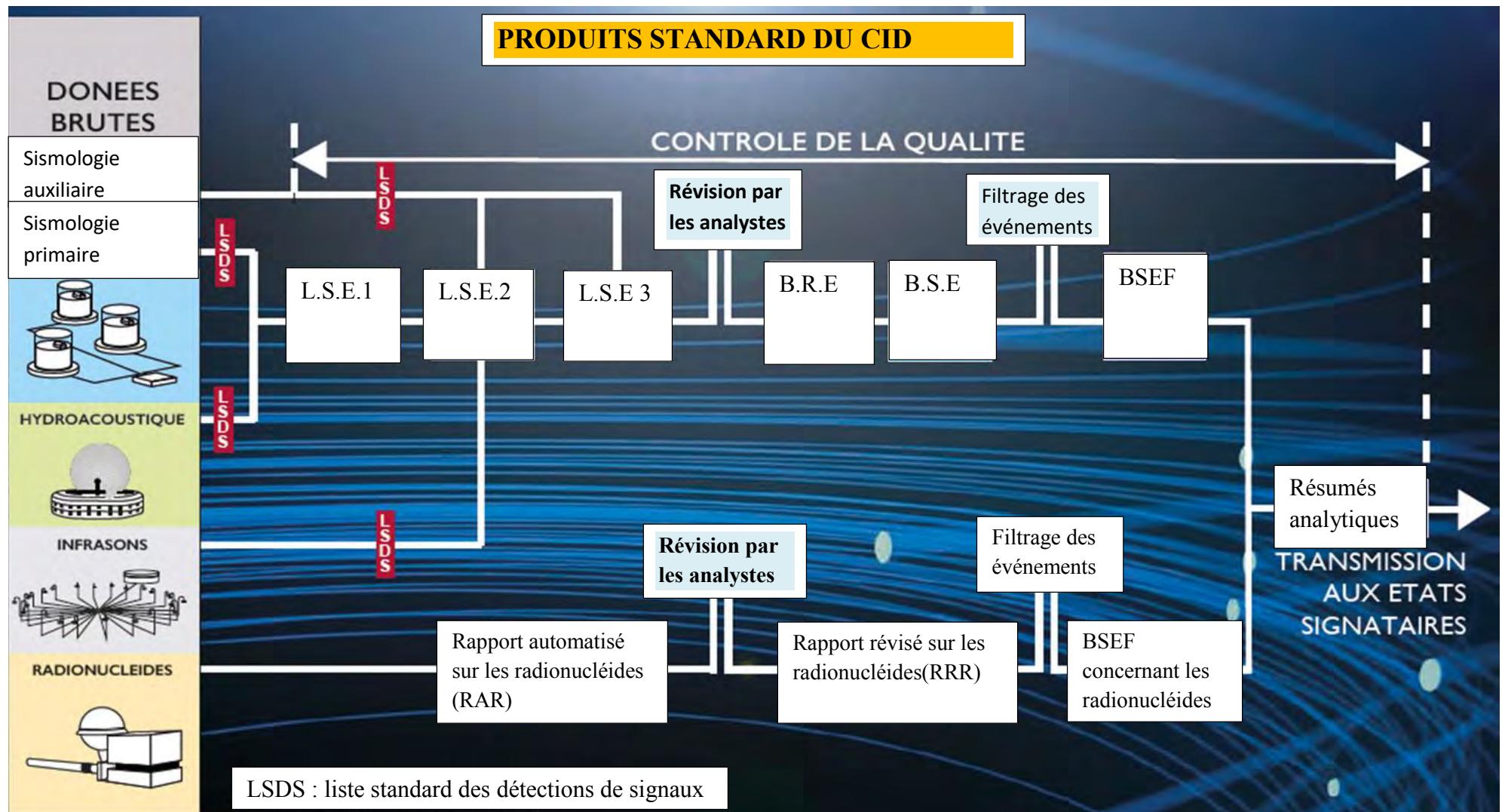


Figure 16: produits standards du CID [5].

II.3.3. Infrastructure mondiale des communications

L'infrastructure mondiale de communication ou, en anglais, the global communications infrastructure (GCI) a été conçu pour assurer la transmission rapide, fiable et précise des données des 337 installations du système de surveillance international (SSI) au centre international de données (CDI) de Vienne, où les données sont traitées et analysées. Il est également utilisé pour distribuer les données brutes des stations SSI ainsi que les bulletins de données CDI aux Etats membres. Le GCI assure une couverture mondiale en utilisant deux modes de transmission soit par satellite ou sans satellite.

Pour l'essentiel de la transmission des données, la CTBTO utilise la communication par satellite par contre elle utilise aussi la technologie VPN (réseau privé virtuel) qui repose sur l'infrastructure de télécommunication publique telle que l'internet. Un certain nombre de stations de surveillance SSI utilisent également le VPN pour communiquer car la structure par satellite habituelle n'est pas réalisable dans leurs locaux. Actuellement près de 30 connexions au réseau GCI via VPN existent. Les centres d'alerte aux tsunamis dans les régions du pacifique et de l'océan indien utilisent cette configuration pour recevoir des données des stations de surveillance SSI.

II.3.4- Inspections sur le site :

Si un événement détecté par le SSI ou d'une autre façon laisse à penser qu'une explosion atomique a eu lieu, une inspection sur le site serait alors conduite, si au moins 30 des 51 membres du conseil exécutif du CTBTO sont d'accord, pour statuer de la véracité des doutes liés aux données relevées. Un espace pouvant aller jusqu'à 1000 km² serait alors délimité et inspecté par une équipe allant jusqu'à 40 personnes.

Cependant, si l'équipe prouvait l'existence d'une explosion, l'ONU devrait débattre d'éventuelles sanctions contre le pays ayant enfreint le traité, mais ces sanctions ne sont pas définies... ce qui rend le rôle opérationnel de l'organisation encore plus improbable, c'est pourquoi il ne faut pas oublier que son rôle principal est de transmettre les informations recueillies à tous les pays états signataires.

II.3.5 Consultation et clarification

Si un Etat membre estime que certaines données collectées impliquent une explosion nucléaire, un processus de consultation et de clarification peut être entrepris pour résoudre et clarifier la question. Ce processus, qui sera disponible pour les Etats membres après l'entrée en vigueur du traité, permet à un Etat de demander des éclaircissements directement à un autre Etat ou par l'intermédiaire du Conseil exécutif. Les Etats membres peuvent également demander des

informations au directeur général de l'OTICE. Un pays qui a reçu une telle demande dispose de 48 heures pour clarifier l'événement en question.

II.3.6 Mesures de confiance

Sur une base volontaire, les Etats membres doivent informer le secrétariat technique de l'OTICE en cas d'explosion chimique impliquant l'utilisation d'au moins 300 tonnes de matériel de dynamitage équivalent à TNT sur leur territoire. Ces notifications ont deux objectifs. Tout d'abord, ils contribuent à la résolution de toute erreur d'interprétation éventuelle des données de vérification, de sorte que, par exemple, une grande explosion minière ne soit pas initialement considérée comme une explosion nucléaire. Deuxièmement, ils aident à tester et à ajuster le réseau SSI.

Les pays membres notifient volontairement au secrétariat technique toute explosion chimique impliquant 300 tonnes ou plus d'équivalent TNT sur leur territoire.

II.4 Les applications civiles et scientifiques des technologies de vérification du CTBT.

Les données et produits peuvent être utilisés pour des applications civiles et scientifiques. Ils permettent de mieux comprendre les risques naturels ou les processus terrestres, ainsi que d'autres études scientifiques.

Les données sismiques peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation des aléas tels que l'alerte aux tsunamis (dans le cas de tremblements de terre sous-marins) et la rapidité d'intervention en cas d'événements potentiellement dommageables.

Elles peuvent aider un pays à évaluer ses risques sismiques, ce qui peut se refléter dans les plans de génie civil et de gestion des catastrophes.

Les données hydroacoustiques enregistrées par le réseau SSI ont des applications potentielles dans les domaines suivants :

L'alerte aux tsunamis ;

L'estimation de la population de mammifères marins et étude du comportement ;

Les observations du climat par la surveillance du bruit de la glace ou du bruit de la houle ;

Thermométrie acoustique océanique via la surveillance du temps de parcours.

Les données d'infrasons peuvent être utilisées pour des applications civiles telles que :

La Surveillance des risques naturels, y compris l'activité volcanique ;

le suivi des orages, utile pour comprendre le couplage sol-atmosphère ; l'évolution du climat ;

L'étude des perturbations à grande échelle et de la dynamique atmosphérique.

Les données radionucléides peuvent également être utilisées pour analyser des échantillons environnementaux et ainsi fournir des indications cruciales sur l'augmentation des niveaux de radioactivité [12].

La modélisation du transport atmosphérique (ATM) donne des informations sur la vitesse du vent, la température, l'humidité, la pression de surface et d'autres variables requises.

Le transport à grande distance de divers polluants atmosphériques anthropiques et naturels repose sur les mêmes processus physiques.

Ces modèles numériques sont utilisés pour prévoir le transport à grande distance de substances toxiques dans les cas de rejets accidentels, de pollens, de cendres volcaniques et de particules. D'autres applications possibles comprennent le retour en arrière des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone ou le méthane afin de mieux évaluer leurs émissions afin de localiser, et éventuellement de surveiller leurs sources [13].

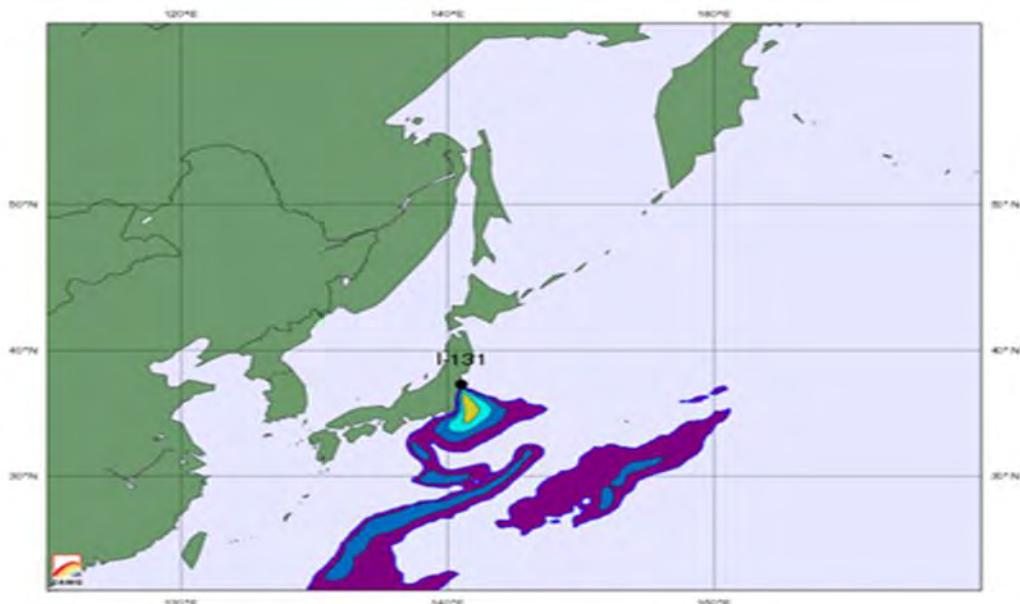


Figure 17: Modélisation de transport atmosphérique [14].

II.5 Méthodes d'accès aux données et produits du CTBTO.

Il existe quatre mécanismes pour accéder aux produits et données du CTBTO

II.5.1 AutoDRM

Il consiste à envoyer un message spécial pour message@ctbto.org. Le message est envoyé de son compte mail qui doit être reconnu par les serveurs du CTBTO. Le contenu du mail se rédige de la façon suivante :

- BEGIN IMS1.0 : Définit le format d'IMS1.0 ou IMS2.0
- MSG_TYPE REQUEST : Type de message est «request»
- MSG_ID sel1 IDC : Nom du message pour le suivie
- e-mail *my_name@ctbto.org*: Où envoyer le produit
- Time 2018/03/09 to 2018/04/10 : indique la date
- Bull_type sel1 : type peut être : REB, SEL1, SEL2, SEL3, SEB, ou SSEB .S'il n'y a pas de défaut et bull_type doit être défini pour les demandes de bulletins, des événements, des origines ou des arrivées.
- Bulletin SS1 : les données de forme d'onde
- STOP

a) Cas des formes d'onde :

L'AutoDRM permet de pouvoir collecter des informations sous forme de forme d'onde afin de pouvoir localiser des événements grâce à **Géotool**. Nous avons donc besoin de différentes informations, afin de pouvoir obtenir des formes d'onde, comme les stations, les dates et d'autres éléments. L'analyse des données ici consiste à utiliser les formes d'onde afin de localiser un évènement sur la surface du globe.

Le recueil des données :

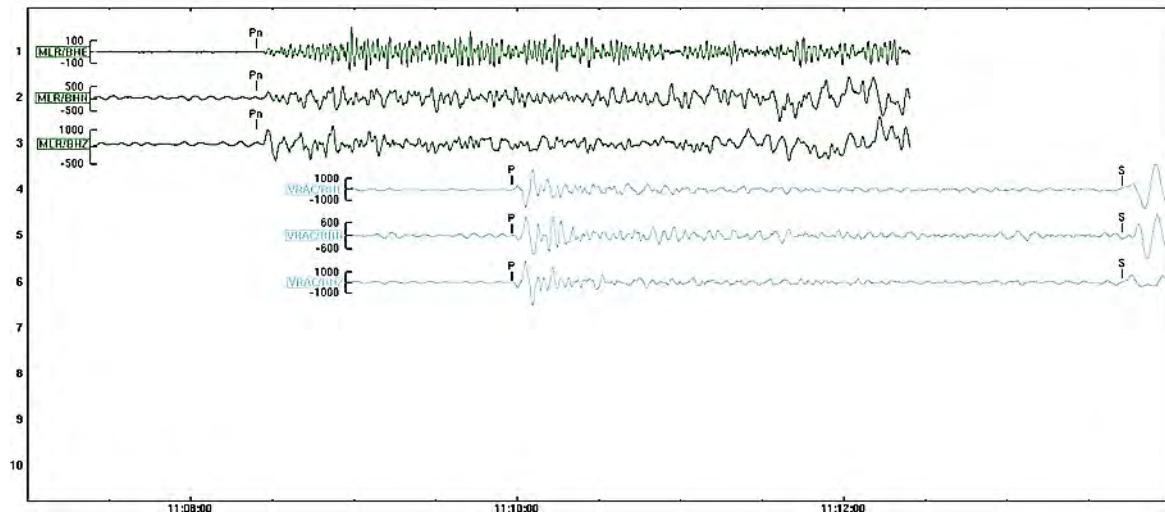
En premier lieu, il faut connaitre l'évènement que l'on veut analyser. Par exemple, allons sur le site sécurisé et demandons les évènements entre du **07/02/2010 au 07/02/2011** ; latitude **-18 à -8**, longitude **20 à 35**.Intéresserons-nous à l'évènement du 2010/03/19 11 :09 :24.9 au Malawi par exemple.

Date	Time	Lat	Lon	Nph	Depth	Mag	Region
2010/02/13	15:20:47.5	10.02S	33.85E	24		mb 4.1	MALAWI
2010/02/28	20:29:26.2	10.06S	33.92E	14		mb 4.0	MALAWI
2010/03/01	08:40:26.2	10.05S	33.78E	4		mb 3.9	MALAWI
2010/03/02	06:36:47.8	10.08S	33.76E	14		mb 3.8	MALAWI
2010/03/06	20:00:40.7	8.86S	32.62E	22		mb 4.0	TANZANIA
2010/03/19	11:09:24.9	11.24S	34.52E	9		mb 3.8	MALAWI
2010/03/27	11:08:49.0	9.97S	33.78E	10		mb 3.8	TANZANIA
2010/06/04	16:11:07.4	9.21S	31.01E	6		mb 3.6	LAKE TANGANYIKA REGION
2010/08/16	21:59:25.3	12.10S	34.09E	4		mb 3.4	MALAWI
2010/08/31	06:19:45.4	16.61S	28.89E	16		mb 3.8	ZAMBIA
2010/09/05	02:07:58.0	10.10S	33.90E	16		mb 4.1	MALAWI
2010/09/17	21:51:05.6	9.96S	33.75E	11		mb 3.7	TANZANIA
2010/10/28	09:31:13.4	14.59S	23.31E	16		mb 4.0	ZAMBIA
2010/10/29	22:55:50.2	9.68S	33.91E	15	26.4	mb 3.5	TANZANIA
2010/11/20	00:11:39.6	12.34S	24.81E	13		mb 3.6	ZAMBIA
2010/11/26	18:24:21.2	17.59S	27.12E	15		mb 4.0	ZIMBABWE
2010/11/28	21:44:47.6	10.16S	33.96E	7		mb 3.4	MALAWI
2010/12/26	20:32:26.9	9.79S	24.89E	14		mb 3.8	ZAIRE
2011/02/07	04:29:15.6	10.34S	32.82E	5		mb 3.7	ZAMBIA

Ensuite, il nous faut envoyer un message AutoDRM. Notons que nous avons besoin de trois (3) stations au minimum ; LSZ, TSUM et BOSA par exemple pour cet évènement. Voici le message AutoDRM à envoyer à messages@cbtto.org:

- BEGIN SS1 MSG_TYPE REQUEST
- MSG_ID Malawi
- TIME 2010/3/19 11:4:0.0 TO 2010/3/19 11:14:59.9 STA_LIST BOSA, LSZ, TSUM
- WAVEFORM (forme d'onde) SSI 1
- STOP

Après le recueil des données nous allons les faire entrer dans GEOTool pour traitement et analyse et nous obtenons ainsi :



b) cas des radionucléides

Exemple : Demande pour un produit de radionucléides.

- BEGIN SS2 pour les données radionucléides

- MSG_TYPE REQUEST MSG_ID
- RRR IDC.
- Temps 23/03/2018 au 23/04/2018.
- Sta_list MRP43 RRR.
- Arret.

Résultat : Examiner les rapports de radionucléides provenant de la station MRP43 disponible pour le moment rang 23 Mars au 23 Avril 2018.

Une autre façon de le faire est via le site sécurisé : Se connecter au site sécurisé <https://www2.ctbto.org>, cliquer sur Produits.



Cliquer sur **Services** puis sur **AutoDRM Interface** à gauche de l'écran, ensuite, on remplit les champs selon les informations que l'on souhaite comme indiqué ci-dessus et on envoie le message en cliquant sur envoyé (send).

II.5.2 Par Abonnement :

AutoDRM Interface

Message Type:	Request ▾
Request Format:	IMS1.0 ▾
Message ID:	sel1 IDC
Product Type/Subtype:	BULLETIN ▾ N/A ▾
Delivery:	E-MAIL ▾
Bulletin Type:	Standard Event List 1 (SEL1) ▾

```
BEGIN IMS1.0
MSG_TYPE REQUEST
MSG_ID sel1 IDC
TIME 2001/10/09 TO 2001/10/10
BULL_TYPE SEL1
BULLETIN IMS1.0
STOP
```

From:

Les données du SSI et les produits du CID sont disponibles par abonnement. L'abonnement se fait aussi par mail, mais le corps du mail est différent de celui de l'AutoDRM. Cela se fait comme suit :

- BEGIN SSI2
- MSG_TYPE abonnement MSG_ID RRR
- IDC Courriel *somebody@somewhere* freq
- Immédiate RRR
- Stop

Résultat : RRR complet pour toutes les stations de radionucléides dans les opérations du CID sont envoyés automatiquement au *somebody@somewhere* chaque fois qu'elles sont disponibles.

II.5.3 Le site web sécurisé

Nous pouvons explorer toutes les rubriques. Si nous voulons accéder aux données radionucléides on clique sur produits CID ensuite sur RRR par exemple. Nous obtenons le tableau suivant :

Figure 18: site web sécurisé [15]

Le format du fichier est le suivant :

Chaque ligne est un résultat de mesure d'un jour et d'un détecteur. Les champs de chaque ligne sont : Code du détecteur (station), heure de début de la collecte, heure de fin de la collecte, volume d'air échantillonné et pour chaque isotope : indicateur, concentration ($\text{mBq} \cdot \text{m}^{-3}$), incertitude de concentration en ($\text{mBq} \cdot \text{m}^{-3}$), concentration minimum détectable (MDC). Le drapeau identifié a 3 valeurs :

0 = le radionucléide n'a pas été identifié,

1 = radionucléide a été identifié,

2 = le radionucléide est identifié seulement avec la présence de lignes de rayons X.

Si le radionucléide n'est pas identifié, seule la valeur MDC est indiquée, si elle est identifiée ; seules la concentration et l'incertitude sont indiquées.

Exemple : En cliquant sur une ligne voilà ce qu'on obtient

Le rapport RAR (Rapport automatisé sur les radionucléides) demandé pour les stations de mesure des particules fournit les résultats de l'analyse automatisée d'un échantillon de particules.

Rapport automatisé sur les radionucléides (RAR)

Exemple d'heure d'arrivée : 2018/04/05 08:15:51

Heure de création du rapport : 2018/04/05 08:16:01

Tableau 7: Résumé de la catégorisation :

prénom	Catégorie	Commentaire de catégorisation
CS-137	3	Dans la gamme statistique

Radioactivité -produit d'activation: Pas de résultat

Tableau 8: Radioactivité de produits de fission :

Nucléide	Demi -vie	Concentration en activité (uBq .m ⁻³)	Erreur relative (%)	Activité (uBq)
¹³⁷ CS	30.100 ans	1,40.10 ^{+ 00}	30,54	2,61. 10 ^{+ 04}

Tableau 9: Concentration détectable minimale pour nucléides clés

Nucléide	Demi- vie	MDC (uBq .m ⁻³)	MDA (uBq. m ⁻³)
CS-137	30.100 ans	2,12.10 ^{+ 00}	3,97.10 ^{+ 04}

Tableau 10: Résultats de recherche pics

Énergie	Centroïde	Largeur	FWHM	Efficience (%)	Zone nette	Background (%)
63,44	186,38	3	1,05	5,46	654,92	66,94

Equations de calibrage

Énergie et Chaîne

$$E(c) = -0,3002 + 0,342 \times c + 8,471.e^{-09} \times c^2 \quad (6)$$

E = énergie en (keV)

c = numéro de canal

Résolution et Énergie

$$FWHM(E) = [(1,00 + 0,00179 \times E + 2,59.e^{-07} \times E^2)]^{1/2} \quad (7)$$

FWHM = pleine largeur à mi-hauteur (keV)

II.5.4-Base de données externe.

Le service de base de données externe fournit aux principaux utilisateurs un accès direct et en temps opportun aux informations contenues dans la base de données des opérations et dans la base de données d'archivage. Les utilisateurs peuvent accéder aux bases de données externes du CID où tous les paramètres de détection, d'événement et de station sont disponibles. Les utilisateurs principaux peuvent envoyer une demande à support@ctbto.org pour accéder à l'externe service de base de données. L'authentification de l'utilisateur consiste en l'adresse IP de l'utilisateur et en un schéma d'authentification à deux facteurs basé sur un code PIN (choisi par l'utilisateur) et un numéro à six chiffres affiché sur la carte à jeton RSA SecurID de l'utilisateur. Le code de jeton change toutes les minutes. La carte est fournie par le CID sur demande. De plus, chaque utilisateur recevra un compte personnel, protégé par un mot de passe, sur chacune des deux bases de données externes. L'utilisateur a également besoin d'un logiciel shell sécurisé installé sur l'ordinateur de l'utilisateur. L'option de base de données externe requiert une connaissance du langage SQL (Structured Query Language ou Langage d'interrogation structuré) et une connaissance du schéma de la base de données CID.



CHAPITRE III

TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES ISSUES DES STATIONS DE PARTICULES DU REGIME INTERNATIONAL DE VERIFICATION DE LA CTBTO

Introduction

Le réseau de radionucléides du système de surveillance international est composé de systèmes de particules, de gaz rares et 16 laboratoires radionucléides pour soutenir les stations radionucléides SSI par analyse d'échantillons afin de :

- ❖ confirmer les résultats de l'analyse de routine d'un échantillon d'une station SSI ;
- ❖ de fournir des mesures plus exactes et précises ;
- ❖ déterminer la présence ou l'absence de produits de fission ou de produits d'activation dans le cas d'un résultat d'analyse suspect ou irrégulier.

Les stations de radionucléides du réseau sont dotées d'un système à particules, de même certaines disposent également d'un système à gaz rares. Ces systèmes ont pour tâches de collecter des radionucléides rejetés par les explosions nucléaires et de les analyser automatiquement afin de produire des rapports qui seront dépistés par des analystes du CID.

Dans ce chapitre, nous allons travailler sur un évènement particulier l'évolution de l'activité du césium 137 dans les données issues de la station particulière de la Mauritanie MRP43 durant une année (du 21 Novembre 2017 au 21 Octobre 2018). Nous allons d'abord décrire le principe de fonctionnement des stations de radionucléides, le traitement automatique et l'analyse interactive des données recueillies et terminer par l'analyse des résultats.

III.1 Libération de radionucléides des explosions nucléaires

Une réaction nucléaire se traduit par : des produits de fission et des produits d'activation. La plupart des produits de fission et d'activation se condensent et attachent aux aérosols. Ces radionucléides sont appelées matières particulières. Les gaz nobles sont chimiquement non réactifs et restent gazeux. Le Xénon est le gaz noble le plus haut rendement de fission. A des explosions nucléaires souterraines, les particules sont conservées dans le sol et les gaz nobles sont plus susceptibles de s'échapper.



Figure 19: particules et gaz dans les explosions nucléaires [11].

III.2 Principe de fonctionnement des stations de radionucléides

III.2.1 Liste des radionucléides pertinents dans le cadre du CTBT

Tableau 11: Radionucléides pertinents comme indicateurs de l'essai nucléaire [11].

Echantillons de particules 85 isotopes				Echantillons de gaz nobles 04 isotopes
^{106m}Ag	^{132}Cs	^{95}Nb	^{153}Sm	^{131m}Xe
^{108m}Ag	^{134}Cs	^{147}Nd	^{156}Sm	^{133}Xe
^{110m}Ag	^{136}Cs	^{239}Np	^{125}Sn	^{133m}Xe
^{111}Ag	^{137}Cs	^{203}Pb	^{91}Sr	^{135}Xe
^{74}As	^{152}Eu	^{112}Pd	^{99m}Tc	
^{76}As	^{152m}Eu	^{149}Pm	^{129m}Te	
^{196}Au	^{155}Eu	^{151}Pm	^{131m}Te	
^{196m}Au	^{156}Eu	^{84}Rb	^{132}Te	
^{198}Au	^{157}Eu	^{86}Rb	^{168}Tm	
^{133}Ba	^{59}Fe	^{102}Rh	^{237}U	
^{136m}Ba	^{72}Ga	^{105}Rh	^{187}W	
^{140}Ba	^{130}I	^{103}Ru	^{88}Y	
^{77}Br	^{131}I	^{106}Ru	^{91}Y	
^{115}Cd	^{133}I	^{120}Sb	^{93}Y	
^{115m}Cd	^{135}I	^{122}Sb	^{65}Zn	
^{141}Ce	^{190}Ir	^{124}Sb	^{69m}Zn	
^{143}Ce	^{192}Ir	^{125}Sb	^{89}Zr	
^{144}Ce	^{42}K	^{126}Sb	^{95}Zr	
^{57}Co	^{140}La	^{127}Sb	^{97}Zr	
^{58}Co	^{54}Mn	^{128}Sb		
^{60}Co	^{99}Mo	^{46}Sc		
^{51}Cr	^{24}Na	^{47}Sc		

III.2.2 Chronologie du traitement et de l'analyse des données.

Le temps qui s'écoule entre la survenance d'un événement, sa détection et son analyse est crucial lorsqu'il s'agit de clarifier un événement suspect. La dispersion des particules radioactives et des gaz rares générés par un événement peut prendre des jours, voire des semaines, avant d'atteindre une station de surveillance, bien après que les données de forme d'onde pour le même événement aient été analysées.



Figure 20: Chronologie de libération à la détection des radionucléides [11].

III.2.3 Collecte de données dans les stations de particules.

a) Principe de fonctionnement

Une station de surveillance des particules de radionucléides contient un échantillonneur d'air, un équipement de détection, des ordinateurs et un dispositif de communication. Au niveau de l'échantillonneur d'air, l'air est forcé à travers un filtre qui retient plus de 85% de toutes les particules qui l'atteignent. Les filtres sont remplacés tous les jours. Le filtre utilisé est d'abord refroidi pendant une période de 24 heures, puis mesuré pendant 24 heures supplémentaires dans le dispositif de détection de la station de surveillance. Le résultat est un spectre de rayons gamma qui est envoyé au CID pour une analyse plus approfondie.

Les données envoyées par les stations de radionucléides au CID n'incluent pas seulement les spectres de rayonnement gamma (γ), mais aussi les informations météorologiques et d'état de santé. Les données sur l'état de santé fournissent des informations sur l'état opérationnel de la station et la qualité des données de surveillance brutes qu'elle transmet.

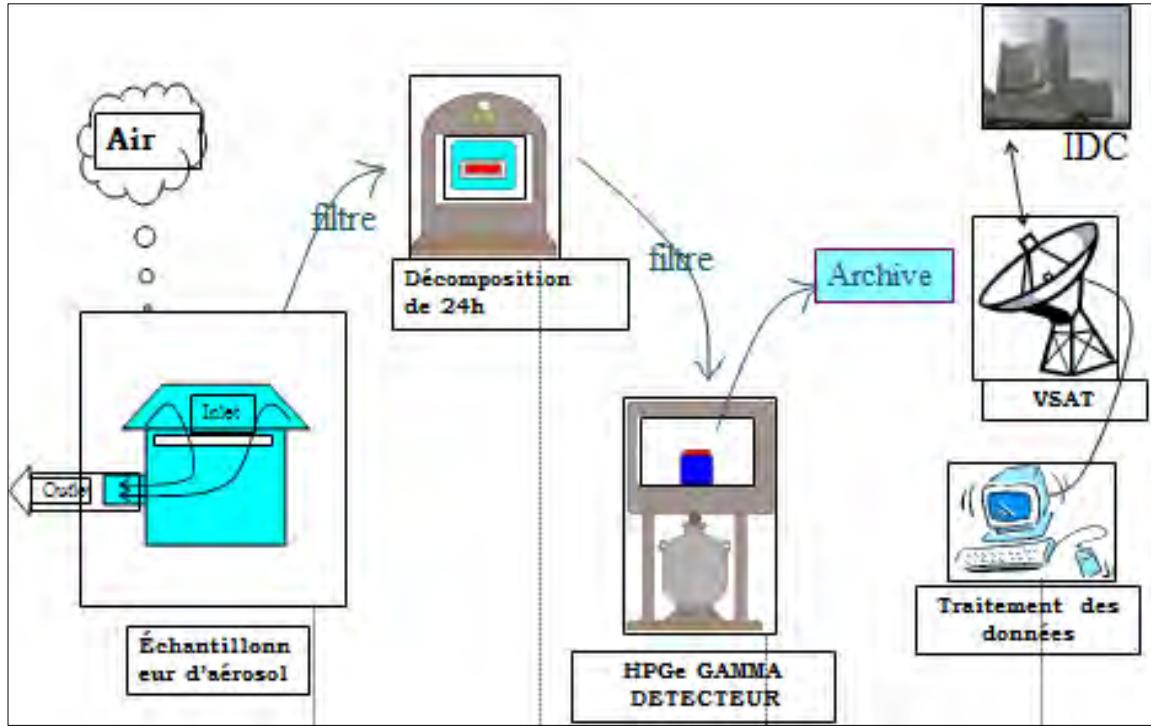


Figure 21: Schéma du principe de fonctionnement d'une station de particules à filtrage manuel [11].

Une variété de configurations d'équipement d'échantillonnage et d'acquisition spectrale ainsi que des procédures opérationnelles spécifiques à la station sont utilisées. Le traitement des échantillons (échantillonnage, préparation du filtre, décroissance et acquisition) est effectué par des systèmes entièrement automatisés (RASA et Cinderella) ou à commande manuelle.

Le système RASA utilise des filtres de bande permettant une autonomie de plusieurs mois pour l'échantillonnage et la mesure. A l'étape de la mesure, la bande de filtre est enroulée autour du détecteur.

Le système Cinderella utilise des filtres à fibres de verre à plat chargés dans des cassettes. Après la collecte, l'échantillon est découpé et empilé par un mécanisme de robot, puis placé sur le système de détection.

Le système de filtrage manuel utilise un média filtrant à plat changé chaque jour par un opérateur. Après la collecte, le filtre est compressé pour former une géométrie de disque adaptée à la mesure sur le système de détection.



Figure 22: Systèmes automatisés (RASA et ARAME) de traitement des données des stations de particules [4].

b) Exigences minimales pour les systèmes de particules

Pour un fonctionnement optimal, les stations à particules sont utilisées suivant ces normes

Tableau 12: Exigences minimales pour les systèmes à particules [4].

Caractéristiques	Exigences en matière
Prélèvement d'échantillons	
Débit d'air	$\geq 500 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
Temps de collecte	24h
Efficacité de collection	Pour le filtre : $\geq 80\%$ a = 0,2 μm Global : $\geq 60\%$ a = 10 μm
Détection	
Temps de décroissance	$\leq 24 \text{ h}$
Temps de mesure	$\geq 20 \text{ h}$
Mode de mesure	HPGe spectrométrie gamma à haute résolution
Efficacité relative HPGe	$\geq 40\%$
Résolution HPGe	< 2,5 keV à 1332 keV
Gamme d'étalonnage	88 à 1836 keV
Global	
Données auxiliaires	Les données météorologiques, débit, SoH données
Sensibilité de la ligne de base	μBq de 10 à 30 m^{-3} pour ^{140}Ba
Temps avant de signaler	$\leq 72 \text{ h}$
Disponibilité des données	$\geq 95\%$

c) Données sur les radionucléides

Elles comprennent :

- **Les données spectrales quotidiennes**

Spectre QC : Compte de 15 minutes d'une source de rayons gamma appropriée

Spectres préliminaires: Un spectre toutes les 2 heures: 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22h

Spectre d'échantillonnage complet : spectre avec une durée d'acquisition $\leq 24\text{h}$

Spectre de fond de gaz : (Beta Gamma) par détecteur $\leq 12\text{h}$

- **Les données spectrales non quotidiennes**

Détecteur de fond : acquis initialement et chaque fois que nécessaire

Blanc : acquis pour chaque nouveau lot de filtres

Pointe / Calibrage : effectué si nécessaire

- **Les données non spectrales quotidiennes**

Ce sont les données sur l'état de santé : paramètres mesurés toutes les 10 minutes, transmis toutes les 2 heures

- **Les données météorologiques** : paramètres mesurés toutes les 10 minutes, transmis toutes les 2 heures
- **Les données non spectrales non quotidiennes** : Les alertes [19].

d) Types de données spectrales de radionucléides

Chaque jour, les analystes du secrétariat technique provisoire reçoivent 13 spectres par station de particules (un spectre de contrôle de la qualité, 11 spectres d'échantillons PREL et un échantillon d'échantillons FULL), 16 spectres pour les stations SAUNA et ARIX (10 échantillons PREL, deux échantillons FULL, deux de fond de gaz et deux spectres de contrôle de la qualité) et 12 pour les stations SPALAX (11 spectres PREL et un échantillon FULL). Deux qualificateurs sont utilisés pour indiquer le statut de la mesure : PREL (pour les spectres intermédiaires envoyés toutes les deux heures) et FULL (pour le spectre final une fois l'acquisition terminée). Les données spectrales comprennent :

- **L' étalonnage**: effectué pour chaque géométrie d'échantillon prévue, à l'aide d'une source d'étalonnage certifiée, fournissant des données sur l'étalonnage énergétique, de résolution et d'efficacité lors d'une mesure initiale définitive.
- **La détermination du fond** : effectué tôt dans la vie de la station / laboratoire pour vérifier la propreté de l'environnement. Pas répété sauf si la situation change.
- **La mesure à blanc** : analyse des différents types de filtres attendus, afin de fournir un blanc pour la soustraction si nécessaire. Effectué une fois pour chaque type de filtre et pour les lots suivants si des modifications sont attendues.
- **Le contrôle de qualité** : décompte relativement rapide d'une source de contrôle d'énergie / résolution pour fournir des paires de données d'énergie et de résolution mises à jour ; effectuée immédiatement avant chaque analyse d'échantillon.

- **L'analyse de fond de gaz** : contient les données de hauteur d'impulsion d'une cellule à gaz à scintillation en plastique vide provenant de stations observant un effet de mémoire (comptage de coïncidence bêta-gamma).
- **L'analyse d'échantillons** : avec spectre envoyé au CID, y compris les paires de données d'étalonnage issues des analyses d'étalonnage (efficacité) et de QC (énergie / résolution) [19].

III.2.4 Traitement automatique et l'analyse interactive des données.

III.2.4.1 Traitement automatique des données :

Le traitement des radionucléides a pour objectif d'analyser les données relatives aux radionucléides du système de surveillance international (SSI) et de produire des produits à base de radionucléides conformes au Manuel d'exploitation du CID (CTBT, 2000, CTBT / WGB / TL-2/45). Le traitement automatique sert également à aider à surveiller l'état de santé (SOH) d'une station et de son détecteur associé.

Les produits développés à partir des données collectées par le SSI, sont utilisés par le CID pour détecter, localiser et analyser les événements. Il existe plusieurs types de données SSI sur les radionucléides : les données de hauteur d'impulsion (PHD), les données météorologiques (MET), les données SOH, les données d'alerte et les données provenant de laboratoires de radionucléides certifiés. Seuls les types de PHD (par exemple, BLANKPHD, CALIBPHD, DETBKPHD, GASBKPHD, QCPHD et SAMPLEPHD) sont automatiquement analysés.

La version actuelle du paquet NDC-in-BOX fournit des logiciels de traitement automatique :
Autosaint pour les particules et SPALAX Noble Gaz ;
Bg_analyze pour les systèmes SAUNA et ARIX Noble Gaz.

Le traitement automatique du spectre des rayons gamma suit cette séquence de base :

- ✓ Vérification / sélection de l'étalonnage pour l'énergie, la résolution et l'efficacité ;
- ✓ Recherche et analyse des pics, y compris la soustraction de fond ;
- ✓ Identification et quantification des nucléides.

L'analyse des spectres d'échantillons de particules et de gaz rares est légèrement différente. Pour les spectres de particules, le traitement implique la recherche du pic complet et l'identification des nucléides, tandis que pour les spectres de gaz rares, une routine d'analyse du xénon calcule les surfaces des pics des quatre isotopes du xénon sur la base de la déconvolution par rayons X. Les étapes de traitement finales incluent le calcul de la concentration d'activité et des incertitudes associées aux radio-isotopes de radionucléides / xénon d'intérêt, la concentration minimale détectable (MDC) de certains radionucléides, ainsi que la vérification des indicateurs de qualité et la catégorisation du spectre.

La concentration d'activité se calcule dans le cas d'un gaz (xénon) par :

$$C(Xe) = \frac{A(Xe)}{V(Xe) \cdot R(Xe)} \quad (8)$$

Avec $C(Xe)$ = concentration dans l'air du Xe en $Bq.m^{-3}$

$A(Xe)$ = Activité de Xe dans l'échantillon en Becquerel (Bq)

$R(Xe)$ = volume de xénon par volume standard d'air atmosphérique en m^{-3}

$V(Xe)$ = volume de xénon dans l'échantillonneur en m^3

Si un nucléide est identifié, toutes les concentrations d'activité linéaire associées sont calculées à l'aide de :

$$C = \frac{S}{V \cdot \epsilon \cdot Y \cdot T_l \cdot F \cdot K} \quad (9)$$

Où C est la concentration d'activité en $\mu Bq . m^{-3}$,

S est la surface de pic nette en coups,

V est le volume d'échantillonnage d'air en m^3 ,

ϵ est l'efficacité du photon du détecteur en coups par photon émis,

Y est l'abondance (ou l'intensité) du photon en photons par désintégration,

T_l est le temps réel d'acquisition de l'échantillon en secondes,

F est un facteur utilisé pour convertir l'activité en μBq

K est le facteur de correction de désintégration avec :

$$K = \left[\frac{1 - e^{-(\lambda t_s)}}{\lambda t_s} \right] \cdot e^{-(\lambda t_p)} \cdot \left[\frac{1 - e^{-(\lambda t_a)}}{\lambda t_a} \right] \quad (10)$$

où t_s est le temps d'échantillonnage de l'air en secondes,

t_p le temps entre l'échantillonnage et l'acquisition en secondes,

t_a le temps réel d'acquisition en secondes et λ la constante de désintégration en s-1,

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad (11)$$

Où T est la demi-vie du nucléide. Pour les échantillons de particules, le traitement consiste en un échantillon. Parfois, des nucléides à vie relativement courte sont observés dans les spectres en raison de la présence de nucléides précurseurs à vie longue (parent ou grands-parents). Les nucléides de fille initialement présents dans l'air échantillonné peuvent déjà être désintégrés. Cependant, un pic photographique résulte de la présence continue et de la dégradation du précurseur dans l'échantillon en raison de la présence du parent. Dans une situation où la demi-vie de la fille est nettement inférieure à celle de son parent, on observe que la fille se décompose au même rythme que le parent.

Ceci est appelé équilibre séculaire et se caractérise par le fait que le nucléide fille et le nucléide parent ont des activités égales, c'est-à-dire :

$$\lambda_p N_p(t) = \lambda_d N_d(t) \quad (12)$$

Où N est le nombre d'atomes, **p** désigne le nucléide parent et **d** désigne la fille. Dans un système où $N_d(0) = 0$, l'équilibre séculaire est atteint après le temps t exprimé dans l'équation suivante.

$$t = \frac{\ln(2 - \frac{\lambda_d}{\lambda_p})}{\lambda_p - \lambda_d} \quad (13)$$

- **Concentration minimale détectable (MDC)**

$$MDC = \frac{L_D}{\frac{\epsilon_{\beta\gamma} I_{\beta\gamma} V}{\lambda^2} (1 - e^{-\lambda t_s}) e^{-\lambda t_p} (1 - e^{-\lambda t_r})} \quad (14)$$

L'algorithme de cette fonction est basé sur un traitement statistique largement accepté développé par Curie. Le fondement de la méthode repose sur la détermination de deux paramètres importants : un niveau critique et une limite de détection. Le niveau critique (L_C) est le niveau de signal net en dessous duquel un signal observé ne peut pas être détecté de manière fiable. Le niveau de détection (L_D) est le niveau de signal net réel qui peut à priori conduire à une détection. En général, $L_D > L_C$.

Pour calculer le MDA ou le MDC, L_C et L_D doivent d'abord être déterminés.

$$L_C = k \sqrt{B + (\sigma_B)^2} \quad (15)$$

$$L_D = k^2 + 2L_C \quad (16)$$

Où k est le facteur de confiance (lié aux probabilités d'erreurs de type 1 et de type 2),

B comptes de base,

σ_B l'incertitude des comptes de base.

t_s est la durée de prélèvement de l'échantillon en secondes (s) ;

t_r est le temps d'acquisition réel en secondes ;

$\epsilon_{\beta\gamma}$ est l'efficacité de détection de coïncidence bêta-gamma pour la paire électron-photon ;

$I_{\beta\gamma}$ est l'abondance (ou l'intensité) du couple électron-photon

t_p le temps entre l'échantillonnage et l'acquisition en secondes,

t_a le temps réel d'acquisition en secondes

- **Calcul d'activité**

L'activité est calculée séquentiellement pour chaque nucléide de descendance appartenant à une chaîne de désintégration identifiée. Tout d'abord, l'activité parent est utilisée pour corriger l'activité fille. Ensuite, les activités parent et fille corrigées sont utilisées pour corriger l'activité de la petite-fille. Enfin, les activités parent, fille corrigée et petite-fille corrigée sont utilisées pour corriger l'activité de l'arrière-petite-fille. Les équations d'activité sont dérivées ci-dessous. La première étape de la dérivation consiste à décrire l'activité de chaque membre de la chaîne de décroissance sous la forme d'une équation différentielle ordinaire (EDO) comme suit.

$$\frac{dA_1(t)}{dt} = Q_1 F(t) - \lambda_1 A_1(t) \quad (17)$$

$$\frac{dA_2(t)}{dt} = Q_2 F(t) - \lambda_2 A_2(t) + \lambda_2 A_1(t) \quad (18)$$

$$\frac{dA_3(t)}{dt} = Q_3 F(t) - \lambda_3 A_3(t) + \lambda_3 A_2(t) \quad (19)$$

$$\frac{dA_4(t)}{dt} = Q_4 F(t) - \lambda_4 A_4(t) + \lambda_4 A_3(t) \quad (20)$$

Où $A_1(t)$ est l'activité temporelle du parent,

$A_2(t)$ est l'activité temporelle de la fille,

$A_3(t)$ est l'activité temporelle de la petite-fille,

$A_4(t)$ est le temps activité dépendante de l'arrière-petite-fille,

Q_1 est la concentration d'activité atmosphérique principale du parent,

Q_2 est la concentration d'activité atmosphérique principale de la fille,

Q_3 est la concentration d'activité atmosphérique principale de la petite-fille,

Q_4 est la concentration d'activité atmosphérique principale de l'arrière-petite-fille,

$F(t)$ est le débit en fonction du temps et

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 sont les constantes de désintégration. Ces équations sont appliquées du début à la fin de l'acquisition. $F(t)$ est une fonction de pas égale à zéro après le temps d'arrêt de la collecte. L'activité de la fille pendant la collecte de l'échantillon en raison de la décroissance de sa mère, P_2 , est déterminée en intégrant numériquement $A_2(t)$ du moment de début de la collecte au temps d'arrêt de la collecte en utilisant la fonction Matlab trapéze (méthode trapézoïdale).

III.2.4.2 Traitement interactive des données :

L'une des tâches fondamentales de l'examen interactif consiste à :

✓ **La vérification de la qualité des données :**

Il existe de nombreux problèmes avec les données des stations, presque quotidiennement. Il y'a des problèmes de message dus aux erreurs de saisie de données, en passant par une défaillance logicielle de la station et des problèmes d'équipement de la station.

✓ **La vérification des résultats du traitement automatique :**

Les résultats du traitement automatique doivent être soigneusement contrôlés, principalement pour s'assurer que la catégorisation du spectre est rapportée. Cela implique de vérifier les erreurs de type 1(fausses détections) et type 2 (signatures de radionucléides qui auraient pu être omises par le traitement) et de confirmer les identités des nucléides.

✓ **La gestion des problèmes :**

Les spectres doivent éventuellement être retraités, les pics ajustés, les spectres préliminaires et contrôle qualité(QC) étudiés et la division du SSI doit fournir des informations ou demander des corrections.

III.2.5 Catégorisation des spectres particulaires

Les spectres d'échantillons de particules se voient attribuer l'un des cinq niveaux suivants :

- Niveau 1 (fond typique) : l'échantillon contient uniquement des concentrations de fond typiques de radionucléides (naturels ou anthropiques) qui ne figurent pas sur la liste standard des radionucléides pertinents.
- Niveau 2 (fond anormal) : l'échantillon contient des concentrations anormales de radionucléides (naturels ou anthropiques) qui ne figurent pas sur la liste standard des radionucléides pertinents.
- Niveau 3 (type anthropique typique) : l'échantillon contient les concentrations typiques d'un seul produit de fission ou d'un seul produit d'activation figurant sur la liste standard des radionucléides pertinents.
- Niveau 4 (anthropique anormal) : l'échantillon contient une concentration anormalement élevée d'un seul produit de fission ou d'un seul produit d'activation figurant sur la liste standard des radionucléides concernés.
- Niveau 5 (anthropique multiple) : l'échantillon contient plusieurs nucléides anthropiques figurant sur la liste standard des radionucléides pertinents à des concentrations anormalement élevées, dont au moins un est un produit de fission.

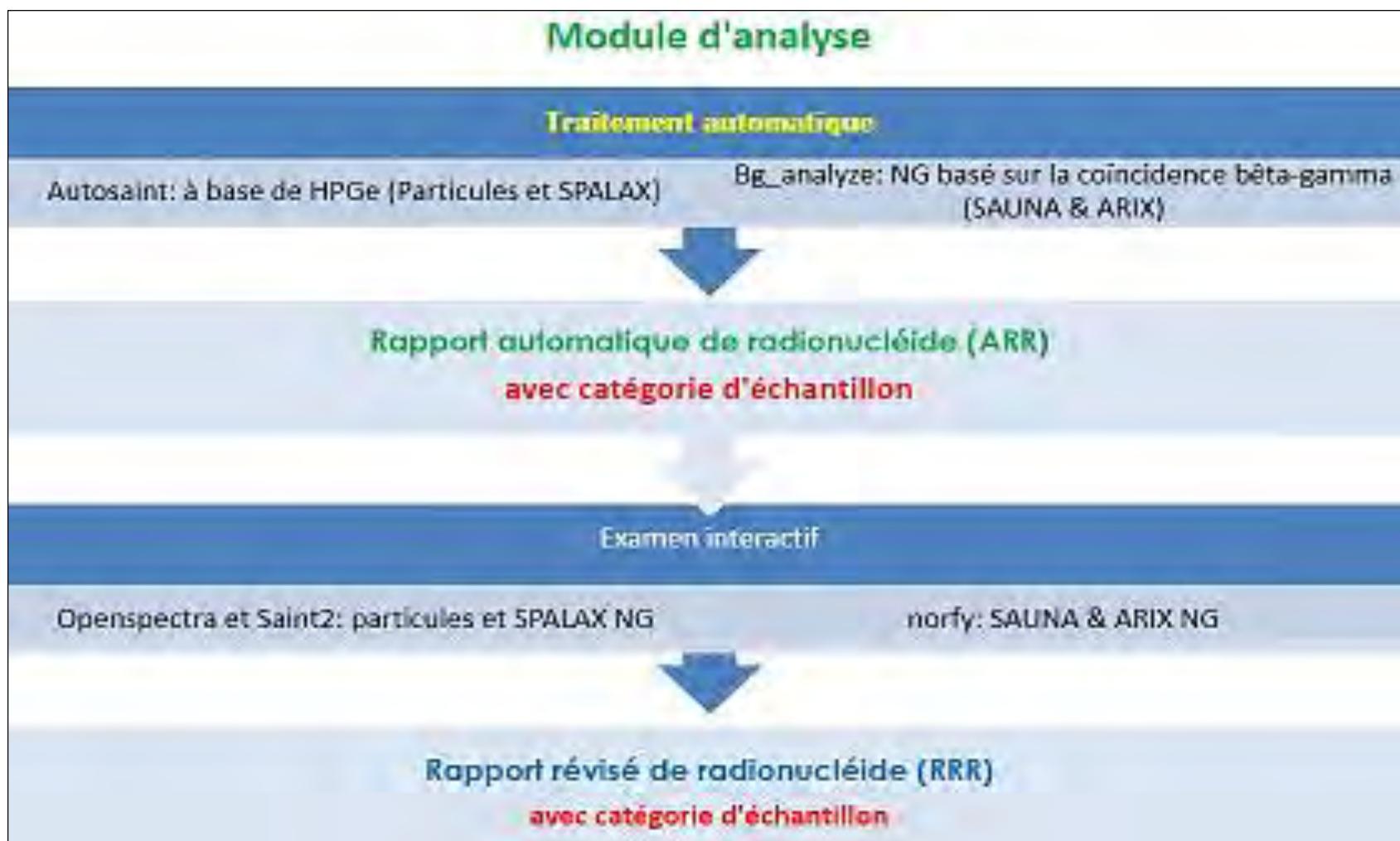


Figure 23: Pipeline de traitement des radionucléides [11].

III.2.6 Produits du CID

Trois produits différents sont générés à la suite d'une analyse automatique et interactive. Chaque rapport est accompagné d'informations de modélisation du transport atmosphérique (MTA) effectuées pour chaque échantillon en mode retour sur la base de champs de sensibilité du récepteur source (SRS) pré calculés. Les résultats MTA sont utilisés pour combiner les informations de champ de considération de tous les échantillons de radionucléides partageant une région source possible liée à un événement.

La version internet du logiciel WEB-GRABE donne aux utilisateurs autorisés la possibilité de visualiser et d'analyser au moyen d'une application en ligne, les produits générés par le système de modélisation du transport atmosphérique.

a) Rapport automatique de radionucléides (RAR)

Après le traitement automatique des spectres d'échantillons, le rapport de radionucléide automatisé (ARR) est généré et mis à la disposition des utilisateurs (centres nationaux de données).

a) Rapport révisé sur les radionucléides (RRR)

Une fois l'examen interactif terminé, le rapport de radionucléide examiné (RRR) est généré et mis à la disposition des utilisateurs. Si un spectre d'échantillons de particules est classé au niveau 5, la section des opérations (OPS) du CID demande à l'exploitant de la station de scinder l'échantillon en deux moitiés et de le renvoyer aux laboratoires de radionucléides SSI pour une nouvelle analyse.

b) Bulletin d'événement standard pour les radionucléides filtrés (BESRF)

Ce produit est publié à la suite de détections anormales de radionucléides et a pour objectif de caractériser et de mettre en évidence les résultats des échantillons de radionucléides considérés comme potentiellement incompatibles avec des phénomènes naturels ou des phénomènes artificiels non nucléaires. Le BESRF est un produit dynamique, horodaté et suivi de version, généré pour chaque spectre dans lequel un ou plusieurs produits de fission ou d'activation figurant dans la liste standard de radionucléides pertinents ont été détectés à des concentrations anormales (niveau 4, 5).

Le BESRF inclut des informations pertinentes tirées du RRR associé, des résultats d'analyses techniques expertes d'analyses de laboratoire et une référence aux résultats de la modélisation du transport atmosphérique effectuée par le CID et par des sources externes autorisées, le cas échéant. Les résultats MTA sont utilisés pour combiner les informations calcul du champ de considération (FOR) de tous les échantillons de radionucléides partageant une région source possible liée à l'événement. Si elles sont disponibles, les informations dérivées des ratios isotopiques sont incluses et peuvent être utilisées pour confiner le FOR.

III.2.7 Modélisation du transport atmosphérique (MTA).

Le système opérationnel ATM déployé et utilisé au CTBTO génère des champs de sensibilité du récepteur source (SRS), qui spécifient l'emplacement des masses d'air avant leur arrivée dans une station de radionucléides du réseau du système de surveillance international (SSI).

Les calculs MTA prennent en charge la technologie des radionucléides en fournissant un lien entre les détections de radionucléides et les régions de leur source potentielle.

Dans un processus de fusion de données, les calculs MTA lient les détections de radionucléides. A ces événements de forme d'onde entrant dans les régions de la source possible de radionucléides. Une nouvelle version du logiciel Flexpart (modèle lagrangien de transport et de dispersion des particules) a été intégré à la filière de traitement du CID apportant des améliorations de la performance destinées à accroître la résolution spatiale et temporelle du système de modélisation atmosphérique.

III.2.7.1 Le modèle lagrangien de dispersion de particules FLEX-PART

Introduction :

Le modèle lagrangien de dispersion de particules FLEX-PART a été conçu à l'origine (dans sa première version en 1998) pour calculer la dispersion à longue et moyenne échelle des polluants atmosphériques de sources ponctuelles, comme après un accident dans une centrale nucléaire. Entre-temps, FLEXPART a évolué pour devenir un outil complet de transport atmosphérique modélisation et analyse. Ses champs d'application ont été étendus dans des études sur la pollution atmosphérique à d'autres thèmes où les transports jouent un rôle (par exemple, les échanges entre les sphères et troposphère, ou le cycle global de l'eau). Il a évolué vers un véritable modèle communautaire qui est maintenant utilisé par au moins 35 groupes de 14 pays différents et permet des applications opérationnelles et de recherche [22-23].

III.2.7.1.1 Généralité sur FLEXPART

FLEXPART est un modèle Lagrangien de Dispersion de Particule (LPD) dédié au calcul du transport d'espèces chimiques et particulières. Le modèle représente le transport et le dépôt d'une quantité infinitésimale de petites parcelles d'air. Ainsi, l'ensemble des équations paramétrant le transport, la diffusion turbulente et le dépôt sont appliqués à chaque parcelle d'air. Le principal avantage de ce type de modèle réside dans le fait qu'il n'y a pas de diffusion numérique au contraire des modèles Eulériens. En effet, dans le cas Eulérien lors de l'émission d'un polluant, celui-ci est instantanément dilué dans l'ensemble de la maille dans laquelle l'émission est localisée.

Le code FLEXPART a été initialement développé par Andreas Stohl de l'Université de Munich dans les années 1990. Le langage utilisé est le Fortran 77.

FLEXPART a aussi été testé en mode retro-plume afin de déterminer l'origine au niveau régional, de certains panaches de pollution d'origines nord-américaines, transportés en Europe

III.2.7.1.2 Architecture

Cinq fichiers d'entrées sont à configurer selon les applications désirées :

Le fichier **COMMAND** permet d'indiquer la période sur laquelle la simulation s'étend,

Le fichier **OUTGRID** spécifie les coordonnées et la résolution du domaine modélisé,

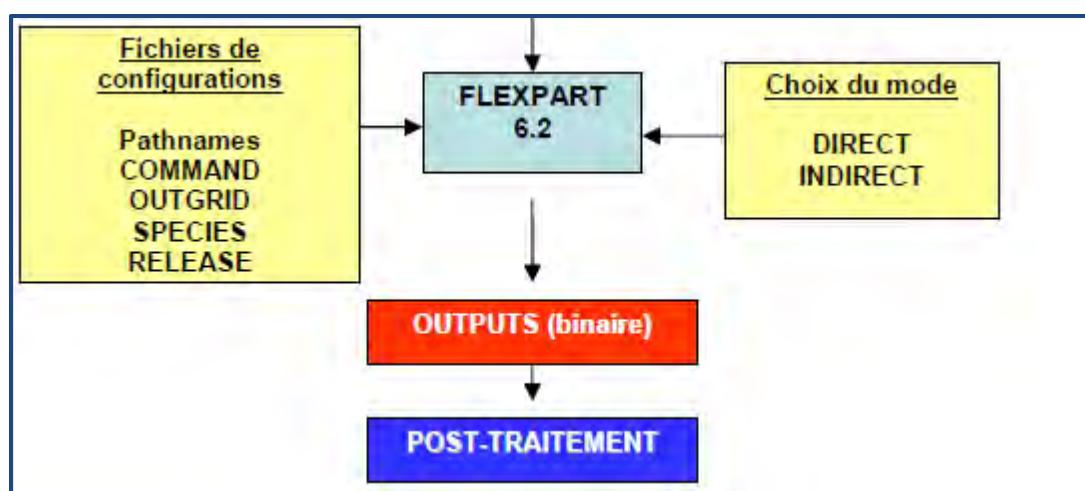
Le fichier **SPECIES** permet de sélectionner la ou les espèces à modéliser et

Le fichier **RELEASE** permet d'indiquer la quantité de matière émise ainsi que sa durée de l'émission dans l'atmosphère en un point donné.

Les coordonnées du point d'émission sont également précisées dans ce dernier fichier. Plusieurs émissions peuvent être spécifiées.

Enfin, le fichier ***Pathnames*** indique les chemins des données en entrée et en sortie du modèle. Un module de post-traitement des données a été développé. Il s'agit d'un code original utilisant l'application *google-earth* pour la localisation géographique des particules [22-23].

Tableau 13 : Schéma des différents modules du système Flexpart [24].



III.2.7.1.3 Principales paramétrisations du modèle FLEXPART

- **Transport horizontal**

FLEXPART utilise le schéma dit « d'accélération nulle » pour le transport horizontal des particules :

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(X, t) \cdot \Delta t \quad (16)$$

Où t est le temps (s), Δt le pas de temps, X la position du vecteur décrivant la trajectoire de la particule et $V = \bar{V} + V_t + V_m$ le vecteur vent qui est composé du vecteur vent de la maille \bar{V} , du vent turbulent V_t et du vent turbulent méso-échelle V_m .

▪ Vent turbulent

Le vent turbulent V_{ti} ($i =$ composantes du vent) est paramétré pour chaque maille selon le processus de Markov basé sur l'équation de Langevin :

$$dV_{ti} = a_i(x, V_t, t).dt + b_{ij}(x, V_t, t).dW_j \quad (17)$$

Le terme de dérive a et le terme de diffusion b sont fonction de la position, de la vitesse et du temps turbulent ;

dW_j sont des composantes incrémentaux d'un processus de Wiener et la variance dt , non corrélés dans le temps.

Une diffusion Gaussienne est considérée dans FLEXPART ce qui est vérifié uniquement pour des conditions stable et neutre. Lors de forts mouvements convectifs, lorsque la turbulence est assurée pour les courants ascendants et descendants, l'hypothèse d'une diffusion Gaussienne n'est plus validée. Cependant pour le transport moyen et longue distance, les particules sont dispersées de manière homogène au sein de la CLA et l'erreur associée à l'hypothèse évoquée précédemment est minime.

L'équation de Langevin pour le vent vertical (w) peut s'écrire :

$$dw = -w \frac{dt}{\tau L_w} + \frac{\partial \sigma_w^2}{\partial z} \cdot \frac{\partial \sigma_w^2}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} dt + \left(\frac{2}{\tau L_w} \right)^{\frac{1}{2}} \sigma_w dW \quad (18)$$

où w et σ_w sont respectivement la composante verticale du vent turbulent et son écart type associé.

τL_w est l'échelle de temps lagrangienne pour l'autocorrélation de vitesse verticale ;

Le deuxième et le troisième terme sont la correction de dérive et de la densité de l'air, respectivement.

▪ Hauteur de la couche limite atmosphérique(CLA).

La hauteur de la CLA est calculée en utilisant le nombre de Richardson (R_i). Le nombre de Richardson R_i est le rapport de flottabilité sur le terme de cisaillement :

$$R_i = \frac{\text{flottabilité}}{\text{cisaillement}} = \frac{\frac{g}{T} \cdot w \cdot \theta}{U_i \cdot U_j j \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j}} \quad (19)$$

où $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$, T est la température de la parcelle d'air en (K), w la vitesse verticale en (m/s), θ est la température potentielle en (K) et u_i et u_j sont les composantes horizontales du vent (m/s)

On utilise en général le nombre de Richardson de couche pour déterminer la part de la flottabilité dans l'instabilité d'une parcelle d'air. Trois cas sont alors envisagés :

$R_i > 0$ stable

$R_i = 0$ neutre

$R_i < 0$ instable

Le nombre de Richardson critique est souvent employé en modélisation. Il définit la hauteur de la CLA sur un profil vertical de Ri. Dans FLEXPART, la hauteur de la CLA correspond à la hauteur de la première couche verticale dans laquelle Ri excède la valeur critique de 0,

III.2.7.2 Les différentes couches de modélisation.

1) ATM Layer 1 : pré-traitement

Il s'agit d'une récupération du champ de vent et autres données d'entrée appropriées requises (données des centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) des États-Unis et données du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF).

2) ATM Layer 2 : Simulations

Le système opérationnel ATM repose sur un modèle de dispersion de particules lagrangienne, FLEXPART (version 10.0).

3) Couches ATM 3 et 4 : Post-traitement et visualisation

Sur la base des champs SRS, plusieurs produits sont calculés. Ils sont rendus accessibles via le logiciel WEB-GRAPE.

III.2.7.3 Utilité du logiciel WEB-GRAPE.

Le WEB-GRAPE (moteur connecté Web) est un système de logiciel permettant de post-traiter et de visualiser les calculs de modélisation du transport atmosphérique (MTA) en utilisant les données SRS (Sensibilité du récepteur source) stockées (et traitées quotidiennement) au niveau du CID. Ce logiciel peut être utilisé pour calculer plusieurs produits MTA.

III.3 Résumé des étapes de traitement des radionucléides du CDI.

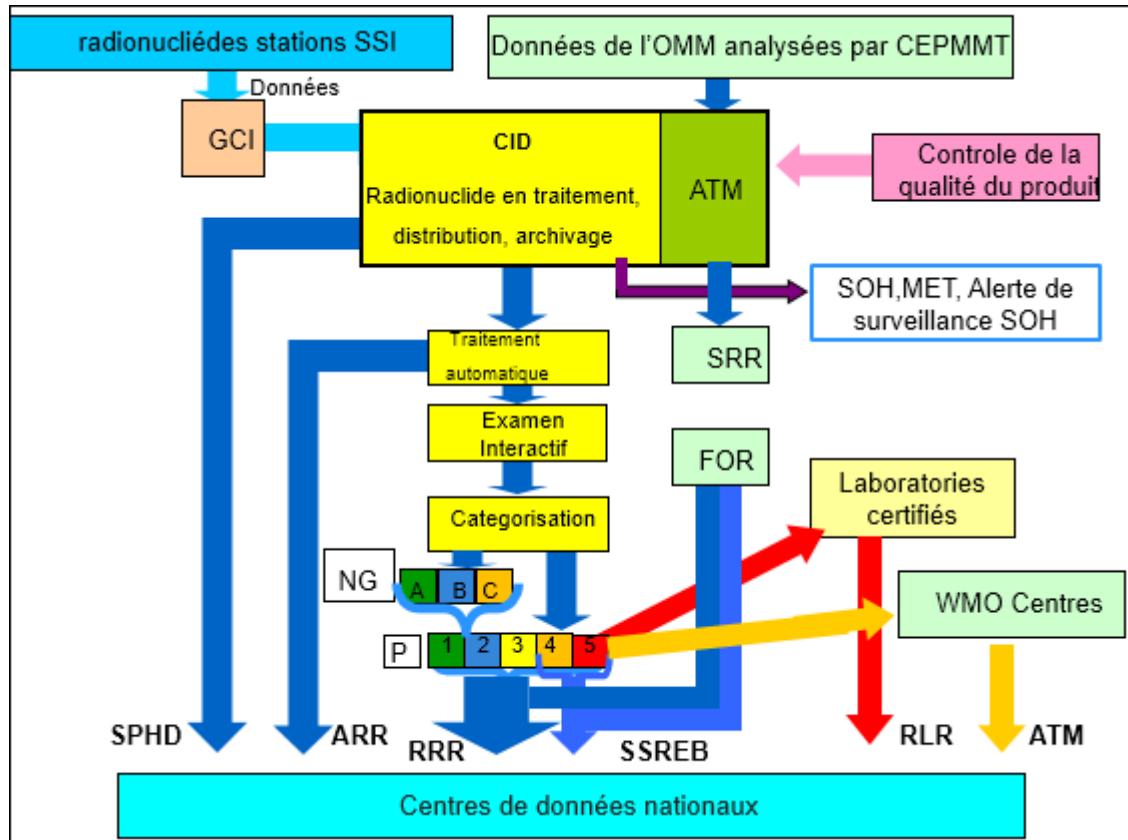


Figure 24: les étapes de traitement des radionucléides [14].

SPHD : échantillon de données de hauteur d'impulsion

ARR : Rapport automatisé sur les radionucléides

RRR : rapport de radionucléide révisé

SSREB : Bulletin d'événement standard pour les radionucléides filtrés

RLR : Rapport de laboratoire sur les radionucléides

MET : données météorologiques

ATM : modélisation du transport atmosphérique

SRR : Relations source-récepteur

SOH : surveillance de l'état de santé

FOR : Calcul du champ de considération

GCI : infrastructure de communication globale

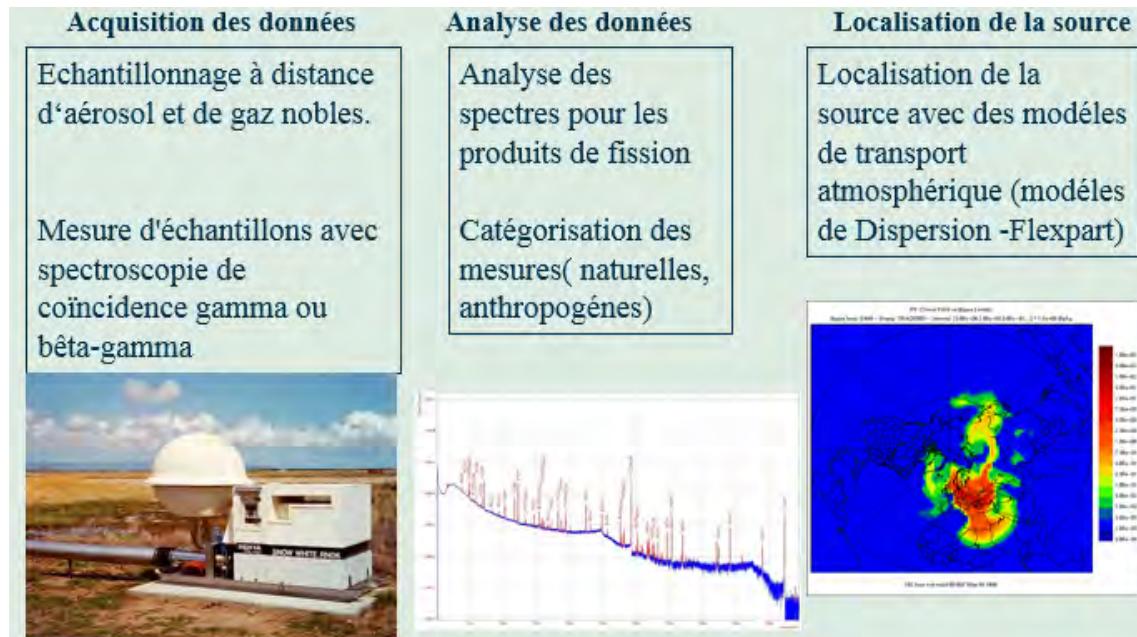
OMM : Organisation météorologique mondiale

ECMWF : Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

NG : gaz rares radionucléides

P : Particules de radionucléides

III.4 Schéma général de surveillance des radionucléides



III.5 Analyse du Césium 137 provenant de la station radionucléide de la Mauritanie RN43.

III.5.1 Description et statut de la station

a) le lieu

La station de radionucléides MRP43 est située à Nouakchott, capitale de la République Islamique de Mauritanie, dans les locaux du Génie Militaire.

Les coordonnées sont 18,142 N, 15,921 W, altitude environ 10 m au-dessus du niveau de la mer. Ces coordonnées diffèrent de celles du traité. La relocalisation a été approuvée par le PrepCom20 (CTBT / PC20 / I / Annexe II, Appendice III). L'emplacement du traité est en mer à environ 115 km à l'ouest de l'emplacement actuel.

b) Historique

Après plusieurs années de négociations et de communications officielles, le personnel du STP à effectuer une visite fructueuse en juillet 2002 afin de lancer le processus d'installation. Le Génie Militaire (corps d'ingénieurs militaires) a été présenté comme point de contact technique local et comme futur opérateur local. En fait, déjà au cours de cette visite, le site de la gare actuelle a été visité. Cependant, malgré tous les efforts du STP, aucune nomination officielle du point de contact technique n'a jamais été envoyée.

L'enquête sur site a été effectuée par le Laboratoire national de radiation (NRL, Nouvelle-Zélande) à la fin du mois de janvier 2003 et le site a été accepté le 28 avril 2003. Le NRL a remporté le processus d'appel d'offres pour l'installation de la station, qui comprend également un an d'exploitation.

La station a commencé à envoyer des données en mai 2006 et envoie régulièrement des données via GCI depuis juin 2006.

La période de test initiale était du 1er juin au 26 juillet 2006. La visite de certification du STP s'est déroulée du 22 au 28 juillet 2006. La période de test et d'évaluation s'est terminée le 30 septembre 2006. La station a été certifiée le 6 novembre 2006.

Après sa certification, la station a été exploitée et entretenue dans le cadre du système de surveillance international en vertu d'un contrat conclu en 2007 entre la Commission et le contractant actuel.

c) Caractéristiques

Le site est situé dans une zone très plate et sablonneuse à l'intérieur du Génie Militaire. Le site est très bien exposé aux vents dominants. Le sol de la région est constitué de sable, de coquillages et de dunes de sable faiblement consolidées. La végétation est presque inexistante et il n'y a pas d'obstacle empêchant le sable de circuler.

L'échantillonneur d'air, Snow White, fabriqué par Senya, fonctionne à un débit d'environ $830 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (dans les conditions du STP) au début de la période d'échantillonnage. En fonction de l'intensité du vent (transport de sable), le débit d'air peut descendre en dessous de cette valeur pendant la période d'échantillonnage. L'échantillonneur d'air est installé à l'intérieur d'un abri afin de minimiser la quantité de sable absorbée. Le bas des fenêtres de l'abri est plus haut que l'ouverture d'entrée de l'échantillonneur d'air. Cependant, cette mesure s'est avérée insuffisante. Le matériau de filtrage actuellement utilisé est le type polypropylène 3M. Les filtres sont compressés en disques de diamètre 50 mm et de hauteur environ 5 mm (jusqu'à 10 mm avec du sable) et conditionnés dans des conteneurs en PVC pour la mesure et le stockage.

Les échantillons sont mesurés sur un détecteur GC5020 à 50% d'efficacité refroidi électriquement de Canberra. L'électronique du détecteur consiste en un LYNX Canberra, une unité numérique standard comprenant l'amplificateur, la haute tension, le processeur de signal et l'analyseur multicanaux.

Les capteurs météorologiques sont situés sur un mât fixé à l'abri abritant l'échantillonneur d'air. Les paramètres météorologiques suivants sont mesurés et transmis : précipitations, température, humidité relative, pression barométrique, vitesse du vent et direction du vent.

Les données d'état de santé suivantes sont transmises : débit d'air, état de l'alimentation principale, état des auxiliaires, température ambiante et humidité relative, ainsi que des exemples de codes à barres lors de la collecte, de la dégradation et de la mesure.

Les capteurs d'intrusion et de violation installés à la station comprennent des capteurs d'ouverture et de fermeture pour les portes d'entrée du laboratoire et de l'échantillonneur d'air, l'armoire de décomposition des échantillons, le blindage du détecteur, le couvercle de l'échantillonneur d'air et le couvercle de la pompe de l'échantillonneur d'air.

Le logiciel d'exploitation de la station contrôle tous les équipements de la station (échantillonneur, détecteur, lecteurs de codes à barres, état de santé, capteurs météorologiques et d'inviolabilité).

Toutes les données de MRP43 sont envoyées au système de commande de plate-forme via le GCI en utilisant la topologie de base.

Chaque type de données à partir de MRP43 est envoyé toutes les 2 heures (à l'exclusion des spectres de contrôle de qualité et complet qui ne sont envoyés qu'une fois par jour) et s'accumule à environ 1,5 Mo par jour, le message de données le plus volumineux étant d'environ 105 kb. Actuellement, les données de la station sont reçues sans signature.



Figure 25: Station RN43 Mauritanie [21].

III.5.2 Détection du nucléide et résultats du traitement du CDI.

Les résultats sont basés sur les spectres de l'échantillon examiné par la station SSI certifiée de la Mauritanie.

Nucléide : ^{137}Cs

Station : RN43, Afrique, Mauritanie

Période : 21 Novembre 2017 au 21 Octobre 2018

Unité : $\mu\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

Heure de début : 21 Novembre 2017

Heure de fin : 21 Octobre 2018

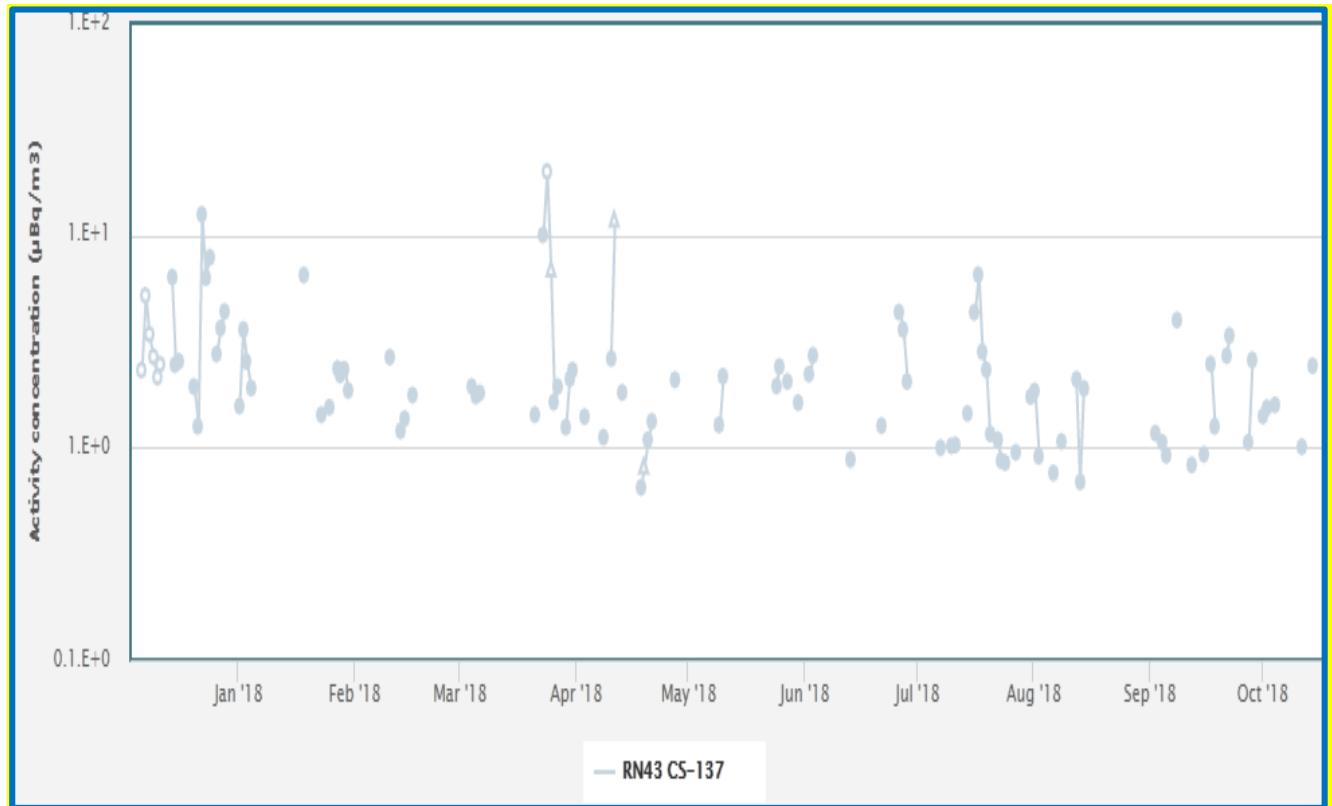
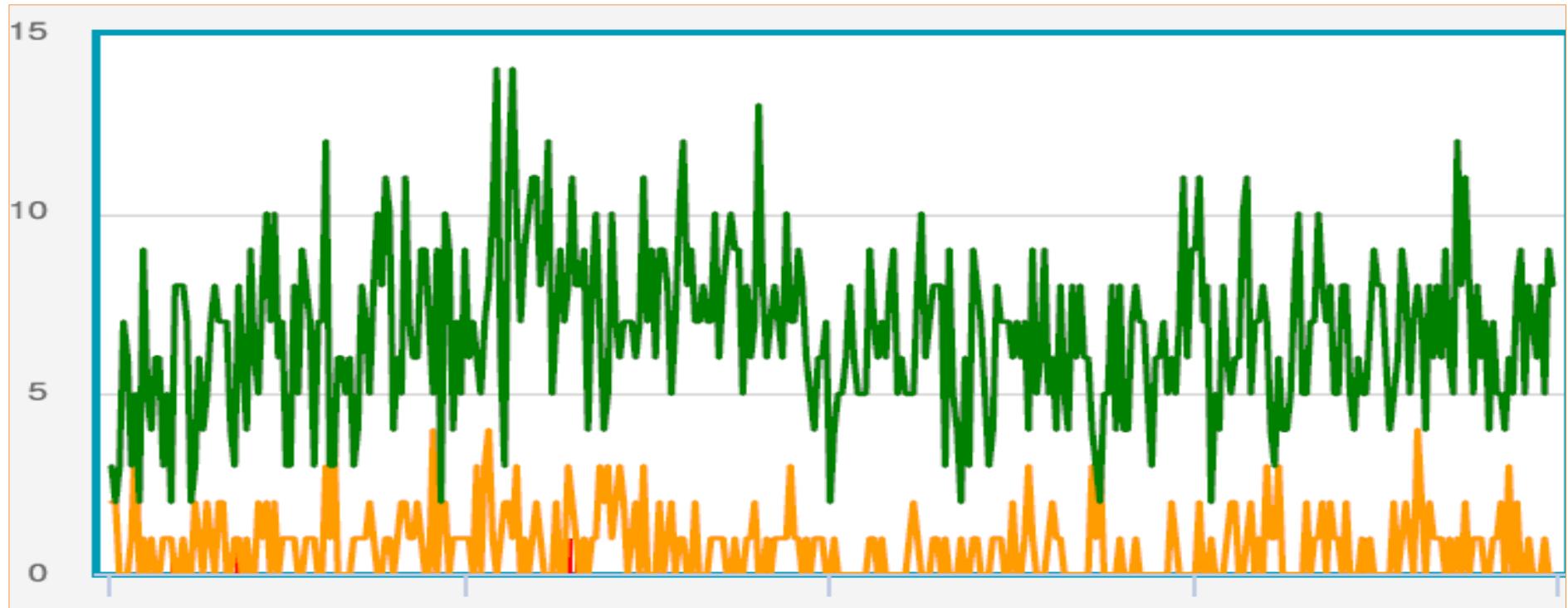


Figure 26: Evolution de la concentration en activité du Cs-137 de Novembre 2017 à Octobre 2018 [25].



Nov 2017

Fév 2018

Mai 2018

Aout 2018

Nov 2018

Figure 27: Nombre de niveaux observés dans les rejets [25].

Légende :

- Vert : Niveau 3
- Orange : Niveau 4
- Rouge : Niveau 5

III.5.3 Interprétation des résultats :

Les échantillons de radionucléides sont examinés et classés en cinq groupes selon la nature des radionucléides qu'ils contiennent.

Les radionucléides de catégorie 3 sont des isotopes radioactifs artificiels qui sont généralement observés dans certaines stations. Ceux-ci comprennent les émissions provenant des applications civiles régulières de la technologie nucléaire, comme dans les centrales nucléaires et dans les hôpitaux.

Par exemple, certaines stations de surveillance en Europe mesurent encore les radionucléides qui remontent à l'accident survenu à la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986.

Les catégories 4 et 5, c'est-à-dire les échantillons contenant des radionucléides qui sont importants pour la vérification du TICE, sont considérées plus attentivement dans le processus d'analyse. De ces deux, les détections de niveau 5 sont celles qui requièrent une attention immédiate car elles peuvent contenir plusieurs radionucléides spécifiques générés par une explosion nucléaire.

Un échantillon de niveau 5 est donc envoyé automatiquement à deux des 16 laboratoires de radionucléides pour analyse ultérieure. Alors que l'analyse initiale au niveau de la station ne prend que 24 heures, les laboratoires spécialisés effectuent un examen très approfondi avec un équipement hautement spécialisé qui peut prendre sept jours.

Le processus de sélection des radionucléides se concentre sur les concentrations de radionucléides pertinents observés. Les radionucléides pertinents sont des radionucléides spécifiques aux explosions nucléaires, comprenant ceux de la fission nucléaire elle-même, plus ceux résultant, par exemple, de l'interaction des neutrons émis lors de l'explosion avec le matériau environnant.

Les quantités relatives des différents isotopes détectés dans une analyse d'échantillon peuvent fournir des informations sur le moment d'une explosion et éventuellement sur l'environnement dans lequel l'explosion a eu lieu, c'est-à-dire sous l'eau, dans l'air ou sous terre.

Conclusion et Perspectives :

Les techniques de surveillance et les traités mis en place par les deux organisations l'A.I.E.A et le CTBTO présentent beaucoup d'avantages sur la non-prolifération nucléaire.

De nos jours, les essais nucléaires ont fortement diminué et cette baisse a contribué positivement sur la paix et la sécurité mondiale

L'objectif de ce mémoire est de s'approprier des technologies de surveillance utilisée pour détecter un test nucléaire et de le confirmer par l'analyse des radionucléides dans l'air. Cette technologie radionucléide permet de déterminer la concentration en activité des particules ou gaz radioactifs et de faire une catégorisation afin de connaître le niveau de risque de ces particules dans l'environnement.

Le but de notre travail est aussi de faciliter au personnel technique de tous les Etats parties de l'OTICE, l'exploitation des produits radionucléides du centre international des données

L'état du Sénégal à travers l'Institut de Technologie Nucléaire Appliquée (ITNA) doit intégrer dans le programme de master en physique atomique et nucléaire des modules de formation accès sur le CTBTO. Cela permet de former des experts qui seront capables de faire l'analyse technique des données issues du système de surveillance internationale et d'autres données pertinentes pour identifier la source d'événements précis mais aussi de gérer la station sismique située à Mbour.

Ainsi ces techniques trouvent leur application dans quasiment beaucoup de secteur notamment dans le domaine des applications civiles et scientifiques (gestion des catastrophes, recherche sur le changement climatique à travers l'étude des phénomènes météorologiques)

Les institutions nationales et internationales responsables de la sécurité aérienne et maritime, les agences de radioprotection et de santé publique, l'organisation mondiale de la santé(O.M.S) peuvent aussi utiliser ces données de surveillance de l'OTICE pour informer et alerter leurs citoyens.

L'étude pourrait également être poursuivie en étendant le travail sur les autres techniques de surveillance (sismique, infrasonore et hydroacoustique) et sur la modélisation des particules et gaz libérés lors des essais nucléaires.

REFERENCES

- [1] Steinhanser et al, S. e. (s.d.). *Comparaison des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima: examen des impacts environnementaux.*
- [2] Mouhamadou Moustapha SY, thèse : transfert de radionucléides dans l'environnement et évaluation de l'exposition humaine par voie alimentaire, soutenue le 21 Mars 2016
- [3] Chronologie des essais nucléaires. Consulté le 26 Septembre 2017.
«www.atlasocio.com»
- [4] Romano PLENTEDA (07 juillet 2017) : Introduction aux stations, détecteurs et données de radionucléides du SSI.
- [5] www.ctbto.org
- [6] Georges Fisher, L'introduction partielle des essais nucléaires. Annuaire Français de droit international, vol.9, n°9, 1965, p6
- [7] Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) (2002). Editorial Manual.
- [8] Rapport annuel 2015 publié sous le cote CTBTO /ES/2015/5
- [9] Rapport du Secrétariat exécutif 2002 sur les grands programme 1 à 7 (document CTBT /PC - 20/INF.1)
- [10] Rapport annuel 2017 du CTBTO
- [11] Hakim GHEDDOU, aperçu de la surveillance des radionucléides segment du régime de vérification du CTBTO, séminaire du 4-15 Septembre 2017 à Vienne
- [12] Abdelouahed AGREBI, Russol Al-Dulaimi, Waseem Allan, Nikita Perfiliev, Alexander Poplavskiy, Johanna Fessl, Kevin Murray, Mario Villagran-Herrera, Formation NDC (Septembre 2017).
- [13] Jolanta Kusmierczyk-Michulec. Atmospheric sciences officer, CID/SA/SM (13 juillet 2017)
- [14] Marc BOCQUET. Modélisation numérique de la dispersion atmosphérique
- [15] http : swp.ctbto.org
- [16] DJEDDI Mabrouk : Equation de propagation des ondes sismiques. Département de Géophysique, Génie parasismique et phénomènes aléatoires de la Faculté des Hydrocarbures et de Chimie .Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. Algérie.11/2018.
- [17] IRSN. Principaux radionucléides rejetés en cas d'accident. Http : //www.irsn.fr.
- [18] Hakim Gheddou, Martin Kalinowski, Elena Tomuta : Cours de formation sur le renforcement des capacités NDC : Accès et analyse des données IMS sur les radionucléides et des produits CID du 4-15 sept. 2017 Lieu : Centre international de Vienne, Autriche
- [19] Shaban LABAN, Processing Systems Officer: Data Monitoring, Acquisition, Storage, Processing and New Station Connection at IDC, September 2017.

- [20] Romano PLENTEDA, Introduction to the IMS radionuclide stations, detectors, and data: NDC training 07 July 2017.
- [21] Terms of Reference for Post-Certification Activities at the IMS Radionuclide Station RN43, Nouakchott, Mauritania – August 2018.
- [22] A. Stohl 1, H. Sodemann 1, S. Eckhardt 1, A. Frank 2, P. Seibert 2 et G. Wotawa 3 : Le modèle lagrangien de dispersion de particules FLEXPART
- [23] Geosci. Modèle Dev. Discuter., <Https://doi.org/10.5194/gmd-2018-333>,Manuscrit en cours de révision pour le journal Geosci. Modèle Dev.
- [24] Etienne TERRENOIRE, thèse : Applications des systèmes MM5-Chimére et MM5-Flexpart a la modélisation de l'ozone, soutenue le 26 Juin 2009.
- [25] www.crtool.ctbto.org