

**ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA**  
**Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaire et Alternatives**

## LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

### 1. INTRODUCTION

Fort de l'expérience de ses équipes d'ingénieurs-chercheurs et de techniciens dans le domaine de la détection des essais nucléaires, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a développé une mission de recherche et d'expertise scientifique pour la surveillance de l'environnement. Cette mission est confiée à la Direction des applications militaires (DAM) où elle est assurée par le Département analyse, surveillance, environnement (DASE).

Le CEA/DAM exerce sa mission de détection des essais nucléaires depuis la fin des années 1950.

Le moratoire sur les essais nucléaires conclu au début des années 1990 par les Etats dotés<sup>1</sup> s'est traduit par la mise en place du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE ou CTBT - *Comprehensive Test Ban Treaty*) adopté en 1996 par l'Assemblée des Nations Unies.

Si le principe de ce traité a été respecté par les Etats dotés, d'autres pays ont poursuivi leur programme d'expérimentations nucléaires : ce fut le cas de l'Inde et du Pakistan en 1998, puis de la Corée du Nord qui a réalisé six essais nucléaires entre 2006 et 2017.

Ainsi la mise en place du TICE a changé le contexte de la surveillance des essais nucléaires. Les Etats ayant signé le traité, actuellement au nombre de 183<sup>2</sup>, se sont engagés à ne réaliser aucun essai nucléaire et à participer à la mise en place du système de vérification du traité, le Système de surveillance international (SSI). Celui-ci comprendra à terme 321 stations réparties de façon uniforme sur l'ensemble du globe pour la surveillance de l'atmosphère, des continents et des océans.

Le SSI est actuellement bien avancé : plus de 90 % de ses stations sont installées et renvoient leurs enregistrements au Centre international de données (CID) de l'organisation du traité, située à Vienne en Autriche, qui les met à la disposition des Etats membres.

De par son savoir-faire et son expérience dans les domaines des réseaux de surveillance et de la détection opérationnelle, le CEA/DAM est également en charge d'une mission d'alerte des autorités nationales en cas de forts séismes. Cette mission s'étend aux tsunamis. Après avoir mis en place et opéré depuis la fin des années 1960 un centre d'alerte aux tsunamis en Polynésie française<sup>3</sup>, le CEA/DAM s'est vu confier, par les ministères chargés de la sécurité civile et de la prévention des risques, la création et l'exploitation d'un centre d'alerte aux tsunamis (CENALT).

Celui-ci a pour mission d'alerter les autorités nationales en charge de la protection de la population et d'informer les autorités des pays riverains de l'Atlantique Nord-Est et de la Méditerranée occidentale. Ce centre a été construit en partenariat avec le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Sa création résulte de la décision de la communauté internationale de mettre en place des systèmes d'alerte aux tsunamis dans l'ensemble des bassins océaniques, suite au tsunami de 2004 dans l'océan Indien. Ce centre qui fonctionne 24h/24, 7j/7 est opérationnel depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2012.

La surveillance radiologique de l'environnement passe par un ensemble de mesures réglementaires effectuées par les exploitants, l'IRSN, l'autorité de sûreté et des organismes indépendants autour des sites nucléaires français : installation nucléaire de base (INB), installation classée pour l'environnement (ICPE radioactives). Ces mesures ne sont pas détaillées ici où l'on ne s'intéresse principalement qu'au domaine de l'environnement des sites liés aux tirs nucléaires et à la fabrication des armes, et dans le cadre de la non prolifération.

<sup>1</sup> Les Etats dotés de l'arme nucléaire sont, au sens du Traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP), les Etats ayant fait exploser un engin nucléaire avant le 1<sup>er</sup> février 1967 : il s'agit des Etats-Unis, du Royaume-Uni, de l'Union soviétique, de la France et de la Chine

<sup>2</sup> Parmi ces Etats, 166 ont ratifié le traité. L'entrée en vigueur requière la ratification des 44 Etats de l'annexe 2 du traité. A ce jour, seuls 36 d'entre eux l'ont ratifié. Les pays restant sont les pays signataires sans ratification : Chine, Egypte, Etats-Unis, Iran et Israël et les pays non signataires : Inde, Pakistan et Corée du Nord

<sup>3</sup> Ce centre d'alerte dénommé Centre polynésien de prévention des tsunamis (CPPT) est situé à Tahiti

## 2. LA SURVEILLANCE DES ESSAIS NUCLÉAIRES

La sismologie, l'hydroacoustique océanique, l'acoustique atmosphérique infrasonique (ondes acoustiques de basse fréquence) et le transfert des radionucléides (les éléments produits par les réactions nucléaires) dans l'atmosphère constituent les quatre domaines majeurs sur lesquels repose le réseau du SSI.

Le nombre de stations qui constituent ce réseau, 321, permet de garantir la détection, la localisation et la caractérisation de toute explosion nucléaire d'une kilotonne<sup>4</sup> effectuée en tout lieu du globe, quel que soit le mode retenu pour sa mise en œuvre : dans l'atmosphère, sur les continents ou dans les océans.

En certains endroits, les performances du réseau sont encore meilleures et permettent de détecter des explosions d'énergie inférieure à la kilotonne.

Le CEA/DAM a contribué activement à la définition du SSI, puis participé à sa construction, en valorisant et développant son savoir-faire, en particulier pour la technologie infrasons (capteur micro-barométrique, ingénierie des stations), mais aussi pour la mesure des radionucléides dans l'atmosphère (avec le système SPALAX mesurant la concentration atmosphérique de xénon radioactif à très bas niveau).

Aujourd'hui, le réseau infrasons du SSI est composé à 80 % d'équipements de fabrication française. S'agissant des stations de mesure du xénon, 40 % d'entre elles reposent sur la technologie SPALAX du CEA/DAM.

Le CEA/DAM, officiellement nommé « agent exécutif » français par le Ministère des affaires étrangères en 2002, a assuré la réalisation des 16 stations implantées en France (Tahiti, Iles Marquises, Guyane, Guadeloupe, Réunion, Kerguelen, Crozet, Terre Adélie, Nouvelle Calédonie), des 8 stations étrangères installées dans le cadre d'accords bilatéraux (Mongolie, Bolivie, Madagascar, Côte d'Ivoire) ainsi que du laboratoire français d'analyse de radionucléides (à Bruyères-le-Châtel, dans l'Essonne).

Il assure aujourd'hui la responsabilité opérationnelle de ces installations sur l'ensemble de leur cycle de vie.

À ce jour, 23 des 24 stations du SSI sous responsabilité française sont en service. Seule une station infrason reste à déployer en Guadeloupe, suite à un changement de son lieu d'implantation.

Le centre de Bruyères-le-Châtel du CEA/DAM accueille par ailleurs le Centre national de données français (CND). Chargé de l'expertise française, le CND dispose de l'ensemble des données du CID et de moyens d'analyse propres. La France a fourni à l'OTICE des outils d'analyse originaux (logiciels et méthodes scientifiques) qui sont aujourd'hui non seulement intégrés dans le CID, mais aussi mis à la disposition des états signataires, consolidant l'expertise internationale du CEA/DAM.

### 2.1. LA SISMOLOGIE

De nombreux réseaux sismologiques ont été implantés sur le globe. Reposant sur des initiatives nationales répondant à des objectifs divers (sécurité civile, recherche en science de la Terre, etc.), ces stations réparties de façon très hétérogène et de qualités inégales sont équipées de capteurs qui mesurent les mouvements du sol comme les *sismomètres* et les *accéléromètres*.

S'agissant du SSI, son réseau sismologique est particulièrement adapté à la détection et la caractérisation des explosions nucléaires souterraines. Il comprend 170 stations sismologiques répondant à des critères bien précis de disponibilité, de fiabilité, de qualité et de modalités de transfert des données en temps réel. La France participe à la mise en place du réseau sismologique du SSI à hauteur de 6 stations.

### 2.2. L'HYDROACOUSTIQUE OCÉANIQUE

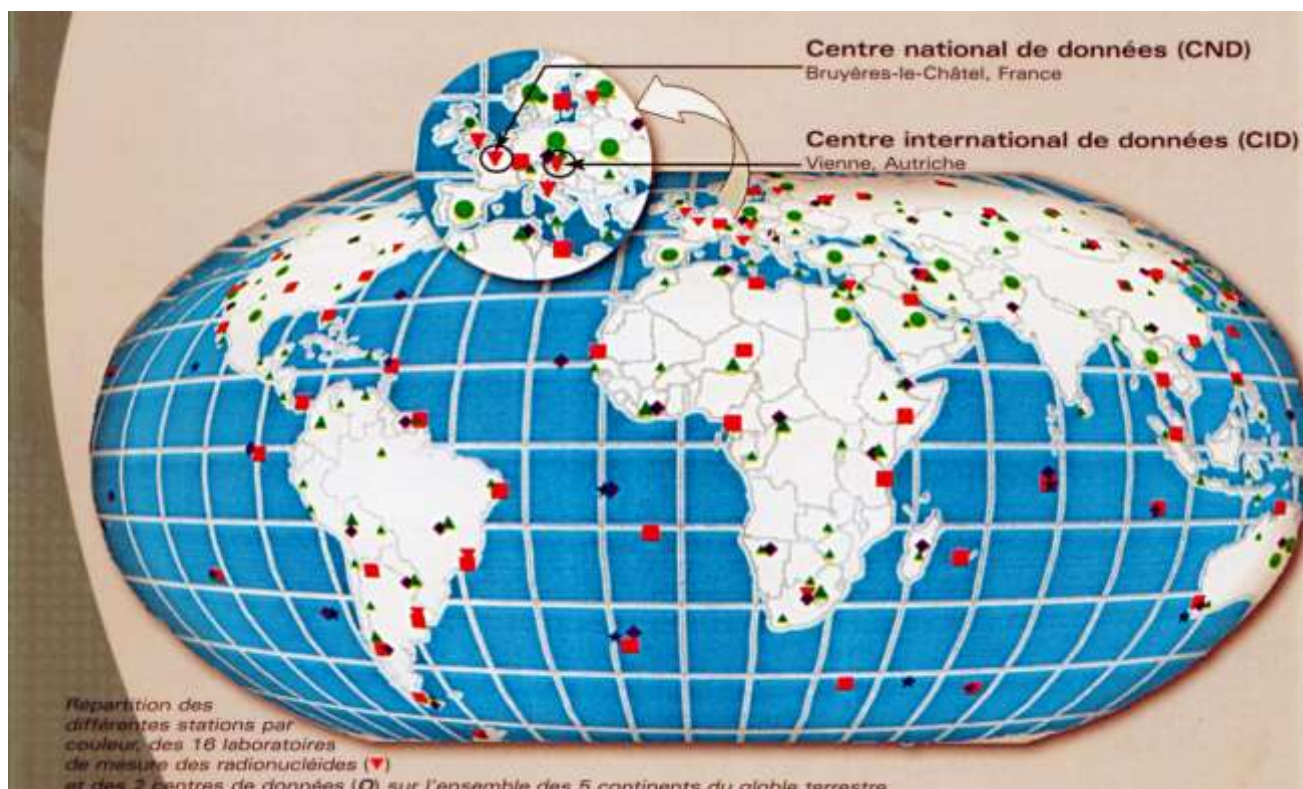
Certains Etats disposent, pour les besoins de leur défense nationale, d'installations d'*hydrophones* sous-marins. Cette technologie d'écoute sous-marine est également mise en œuvre pour la détection des essais nucléaires pouvant être réalisés dans les mers et les océans.

Le réseau hydroacoustique du TICE comprend 11 stations dans cet objectif : grâce à la très faible atténuation des ondes hydroacoustiques générées par les explosions sous-marines, l'ensemble des océans peut ainsi être surveillé par un nombre réduit d'installations.

Le réseau du SSI est composé de 6 réseaux d'hydrophones immergés, aux profondeurs locales du guide d'ondes océanique (quelques centaines de mètres à un kilomètre de profondeur selon les latitudes) et de 5 stations sismiques côtières. Celles-ci enregistrent les ondes sismiques issues de la conversion des ondes océaniques à leur rencontre des talus côtiers.

Deux stations françaises contribuent au réseau du SSI : un réseau d'hydrophones aux îles Crozet et une station sismique côtière en Guadeloupe.

<sup>4</sup> Unité d'énergie utilisée pour caractériser l'énergie des explosions nucléaires. Correspond à l'équivalent de mille tonnes de TNT (trinitrotoluène), soit sensiblement  $4,18 \cdot 10^{12}$  Joules.



carré (rouge) : stations radionucléides      triangle (vert) : stations sismologiques  
étoile (bleu) stations hydroacoustiques      carré (violet) stations infrasons

### 2.3. L'ACOUSTIQUE ATMOSPHERIQUE BASSE FRÉQUENCE

Les ondes de pression produites par les explosions nucléaires atmosphériques se transforment rapidement en infrasons. Ces ondes dont les fréquences se situent au-dessous du domaine audible (< 20 Hz) ont la capacité de se propager dans l'atmosphère sur de longues distances, à la vitesse du son, avec peu d'atténuation.

Ces ondes sont détectées par des capteurs de pression, les *microbarographes* (ou capteurs micro-barométriques) développés dans les années 1950 par le professeur Yves Rocard (un grand nom de la physique et du CEA).

Le réseau du SSI se compose de 60 stations infrasons disposées le plus uniformément possible sur le globe. Les capteurs de technologie française y prennent une part importante.

La France participe à la mise en place du réseau infrason du SSI à hauteur de 9 stations.

### 2.4. LES STATIONS DE MESURE DES RADIONUCLÉIDES DANS L'ATMOSPHERE

Les trois technologies décrites dans les chapitres précédents permettent de détecter les ondes produites par des explosions dans l'atmosphère, sous terre ou dans l'eau. Afin de confirmer la nature nucléaire de l'explosion, et de la discriminer d'autres types d'explosions (explosions conventionnelles, minières, etc.), une quatrième technologie est mise en œuvre : la mesure des radionucléides.

Particulièrement adaptée à la détection des aérosols provenant des essais conduits dans l'atmosphère, elle permet également de détecter, dans certaines conditions, les radionucléides produits par les explosions souterraines et sous-marines. Dans ce cas les radionucléides se présentent préférentiellement sous la forme de gaz.

Le réseau du SSI prévoit 80 stations radionucléides (*stations aérosols* et *stations gaz*) et 16 laboratoires radionucléides pouvant analyser, en vue d'une interprétation plus précise, des échantillons provenant des stations du SSI. La France a la responsabilité de 7 stations radionucléides et d'un des 16 laboratoires.

#### 2.4.1. Stations aérosols

Elles prélèvent les particules solides (aérosols) en suspension dans l'atmosphère par aspiration d'un grand volume d'air au travers d'un filtre. L'analyse de ce filtre par un système de spectrométrie  $\gamma$  intégrée à la station signale la présence de certains éléments radioactifs caractéristiques d'une explosion nucléaire. Le réseau du SSI comprend 80 stations aérosols.

### 2.4.2. Stations gaz

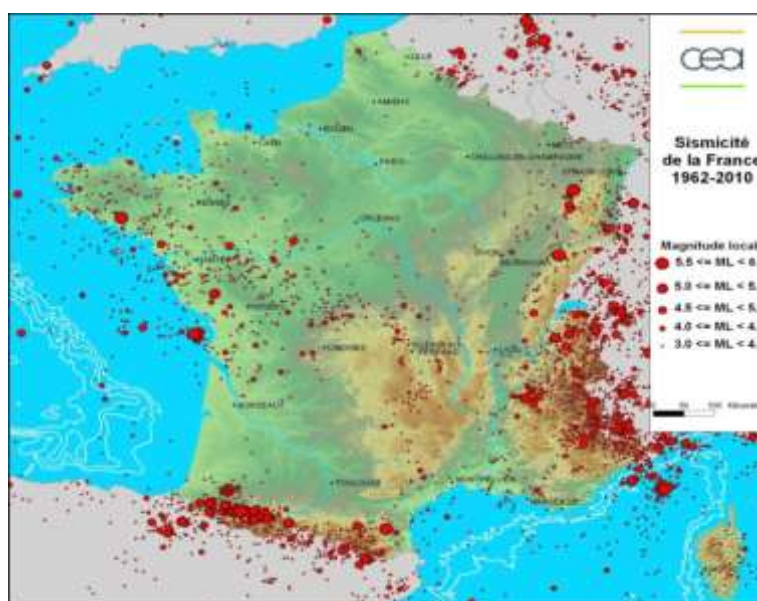
Le CEA/DAM a développé un Système de prélèvement automatique en ligne avec analyse du xénon (*SPALAX*) entièrement automatisé et fonctionnant en continu, capable d'extraire le xénon à partir d'un prélèvement d'air, de le concentrer, et de le mesurer en ligne par spectrométrie X et  $\gamma$  [Réf.1].

Le cycle de fonctionnement est le suivant : prélèvement d'air pendant 12 ou 24 heures puis mesure par *spectrométrie d'émission X et  $\gamma$* , pendant 24 heures à partir d'une cellule de 25 cm<sup>3</sup> contenant quelque cm<sup>3</sup> de xénon concentré dans de l'azote. Il est prévu l'installation de 40 stations de mesure isotopique du xénon.

## 3. LA DÉTECTION SISMIQUE

Cette surveillance a débuté à la fin des années 1950 par la mise en place du réseau sismologique du Laboratoire de détection géophysique (*LDG*), un laboratoire précurseur du DASE, avec l'installation de trois stations de détection en Normandie, puis trois autres dans le Morvan (voir [Article GAENA N° 46 « Sismologie »](#)).

Le réseau a évolué pour atteindre plus de 40 stations en France métropolitaine et en Corse. Utilisé pour la surveillance des essais nucléaires étrangers, ce réseau est également un instrument essentiel pour alerter les autorités nationales chargées de la sécurité civile et de la prévention des risques.



Sismicité naturelle de la France et de ses environs entre 1962 et 2010

### 3.1. LE SUIVI DE LA SISMICITÉ : ALERTES ET INFORMATIONS

#### 3.1.1. Les alertes

Le suivi de la sismicité est réalisé par la détection de tout événement sismique, de sa localisation rapide, de l'évaluation de sa magnitude et de l'alerte des pouvoirs publics. Les données des stations d'enregistrement sismiques sont transmises en temps réel aux laboratoires du DASE où elles sont alors traitées et analysées.

Le DASE doit alors :

- alerter la sécurité civile dans un délai inférieur à 2 heures en cas de séisme de magnitude supérieure à 4 en France ou dans les régions frontalières
- contribuer à l'alerte au Conseil de l'Europe dans un délai de 1 heure en cas de séisme de magnitude supérieure à 5 dans la région euro-méditerranéenne
- prévenir la sécurité civile du risque de tsunami consécutif à un fort séisme, en particulier dans le Pacifique (Centre polynésien de prévention des tsunamis de Tahiti) et dans la région Atlantique Nord-Est / Méditerranée occidentale (CENALT). Les alertes du CENALT doivent être transmises dans un délai de 15 minutes

Ces alertes reposent sur des systèmes automatiques traitant les signaux sismiques et fournissant la *localisation* et la *magnitude* (le pouvoir destructeur) du séisme. Ces informations sont ensuite validées par un sismologue à qui incombe la responsabilité de diffuser les alertes. Le service d'alerte est assuré 24h/24 et 7j/an.

#### 3.1.2. Les informations

En plus des alertes, le DASE émet des bulletins périodiques qui sont des cartes des événements sismiques détectés sur le territoire métropolitain et les régions frontalières.

Ces cartes comprennent la sismicité naturelle mais aussi des tirs de carrière et des activités industrielles qui sont identifiés. Des études plus « particulières » sont engagées dans le cas de magnitude importante afin de préciser l'épicentre et « l'origine » du phénomène. Ces informations sont accessibles au public sur le site Internet du DASE ([www.dase.cea.fr](http://www.dase.cea.fr)).

### 3.2. LA RECHERCHE ET LES APPLICATIONS

#### 3.2.1. Étude des sources sismiques

Les études fondamentales cherchent, en s'appuyant sur la modélisation numérique et les observations de terrain, à comprendre le mécanisme qui est à l'origine des séismes. Sous l'effet de la tectonique des plaques, des contraintes s'accumulent dans la croûte terrestre.

Un séisme se produit lorsque les forces appliquées sur les failles, où se concentrent ces contraintes, dépassent la résistance mécanique liant les deux pans de faille. Les blocs présents de part et d'autre de la faille glissent soudainement l'un par rapport à l'autre et une rupture se propage en générant des ondes à l'intérieur de la Terre. La modélisation des enregistrements de ces ondes permet raisonnablement de reproduire le comportement des ondes sismiques et ainsi d'expliquer le mécanisme de la rupture.

L'observation des mouvements de la planète effectuée grâce au traitement des données de stations de détection sismique conduit non seulement à la production de catalogues de sismicité mais aussi à de nombreuses études fondamentales en sismologie.

#### 3.2.2. Évaluation de l'aléa sismique

On cherche à évaluer l'aléa sismique c'est-à-dire calculer la probabilité que dans une période de référence une secousse sismique atteigne ou dépasse une certaine intensité sur un site.

Le risque sismique est déduit de l'aléa et se traduit en niveau de dommages associé à une probabilité. Ces calculs d'aléas sont conduits pour les études réglementaires de sûreté des sites industriels (notamment les sites du CEA qui accueillent des installations nucléaires) mais aussi pour établir le zonage sismotectonique pris en compte pour les règles de construction de l'habitat individuel.

## 4. SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

### 4.1. LA SURVEILLANCE DES ATOLLS DU PACIFIQUE

Dans le cadre de la surveillance radiologique de l'environnement des anciens sites d'expérimentations nucléaires de Polynésie française, le CEA/DAM assure pour le compte du Ministère des armées des missions d'expertise scientifique et d'assistance technique.

A cet effet, le DASE participe à l'élaboration et à la qualification des procédures de prélèvements qui sont effectués annuellement sur les deux atolls de Mururoa et de Fangataufa.

Tous les échantillons prélevés sont traités et analysés dans les laboratoires de physique et de chimie du DASE à Bruyères-le-Châtel.

La campagne annuelle de prélèvements concerne tous les éléments de l'environnement :

- air : prélèvement en continu
- eaux : échantillonnage complet (eaux souterraines, des lagons et océaniques)
- espèces biologiques terrestres et marines
- sols terrestres et sédiments marins

Les résultats de ces campagnes de prélèvements sont présentés chaque année dans un rapport édité par le Ministère des armées, accessible sur le site Internet du ministère.

Ils montrent que les radionucléides artificiels mesurés dans les échantillons sont présents à des niveaux très bas et souvent inférieurs ou voisins de la limite de détection des appareils de mesure, confortant ainsi les conclusions du bilan de la situation radiologique établi par l'AIEA en 1996 à la suite de l'arrêt définitif des essais nucléaires dans les atolls de Polynésie française.

## 4.2. ÉTUDE DE LA MIGRATION DES RADIONUCLÉIDES DANS LES SOLS

Ces études se situent au carrefour de plusieurs disciplines scientifiques et nécessitent des compétences dans des domaines très variés comme la géologie, l'hydrogéologie, la géochimie ou la métrologie.

Le diagnostic environnemental d'un site s'appuie sur quatre axes convergents :

- connaissance du site : l'*acquisition* des données sur le terrain permet d'identifier la nature et la structure du sous-sol et de déterminer les directions et les vitesses d'écoulement des eaux. Elle consiste également surveiller l'évolution du système hydrogéologique et géochimique en fonction du temps, grâce à des mesures en continu ou à des prélèvements périodiques
- la caractérisation radiologique : par des mesures in-situ ou en laboratoire, elle permet de quantifier et d'*identifier* la nature des radionucléides à la fois des sols et des sous-sols. Cette caractérisation peut être menée si nécessaire sur l'ensemble des compartiments de l'environnement (air, eaux, sédiments). Notons que le DASE dispose de laboratoires dont les performances sont reconnues au niveau national et international. En particulier, ils permettent des mesures d'éléments à de très faibles concentrations qui appartiennent au domaine dit « des ultra traces »
- acquisition de données : après *caractérisation* des composés minéraux ou organiques qui régissent le transfert des radionucléides dans le milieu naturel, la mobilité des radionucléides dans l'environnement est *évaluée*. C'est un *paramètre déterminant pour la modélisation des phénomènes*
- modélisation numérique : le *couplage* des modèles numériques permet de simuler la migration d'un radionucléide dans le milieu naturel en intégrant l'ensemble des processus responsables du transfert. La contribution de ces représentations numériques 2D et 3D à la surveillance de l'environnement, déjà possibles avec les premières générations de calculateurs, se trouve renforcée avec les possibilités actuelles du calcul intensif offertes par le *Très Grand Centre de Calcul du CEA (TGCC)* [Réf.2]

## 5. MESURES DANS L'ATMOSPHÈRE

Le CEA poursuit des recherches fondamentales sur l'*atmosphère* et l'*ionosphère*, ces études qui peuvent paraître très en amont des besoins sont nécessaires dans la perspective d'une anticipation des besoins à venir pour remplir les missions liées à la surveillance de l'environnement.

### 5.1. LES INFRASONS DANS L'ATMOSPHÈRE

Les stations infrasons peuvent détecter des perturbations naturelles d'origine atmosphérique comme les orages météorologiques, les effets de phénomènes naturels tels les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les houles océaniques, les éclipses solaires, mais également des perturbations liées aux activités humaines sources d'infrasons comme les tirs de carrières, les installations d'éoliennes, etc.

Combinés à d'autres types de mesures (sondage par lidar notamment), les infrasons apportent des mesures directes et précises des champs de vents et de température entre 30 et 90 km d'altitude.

Ces données permettent de valider les modèles de circulation dynamique de l'atmosphère et d'apporter des précisions, à l'échelle globale, pour certains compartiments de l'atmosphère inaccessibles aux mesures traditionnelles.

### 5.2. ÉTUDES DE L'INTÉRACTION ATMOSPHÈRE - IONOSPHERE

A plus haute altitude, entre 90 km et plusieurs centaines de kilomètres, l'ionosphère est un milieu complexe, siège de perturbations intenses comme les orages atmosphériques ou magnétiques, les aurores boréales, les instabilités de plasmas, etc.

Des études ont été conduites depuis plusieurs années dans le but de comprendre les sources de perturbations de l'ionosphère et les différentes interactions entre l'atmosphère et l'ionosphère, autant de phénomènes à prendre en compte pour les projets de détection depuis l'espace.

## 6. CONCLUSION

Depuis la création du LDG, le laboratoire dont la mission fondatrice était la détection et la caractérisation des essais nucléaires étrangers, un long chemin scientifique et technique a été parcouru par le DASE.

Si la mission de surveillance des explosions nucléaires demeure sa mission régaliennne, elle s'exerce toujours dans un cadre national en réponse aux besoins exprimés par les autorités de l'Etat, mais aussi dans le cadre international du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires.

Le DASE est en charge, en qualité d'agent exécutif, de porter la contribution technique de la France à la mise en place de ce traité et à l'évaluation des performances de son système de vérification. La compétence scientifique acquise dans ce domaine lui a permis de l'élargir plus généralement à la surveillance de l'environnement.

Les catastrophes naturelles plus fréquentes, comme par exemple le tsunami de Sumatra dans l'océan Indien en 2004 et celui de la côte Pacifique au Japon en 2011, aux conséquences humaines et économiques dramatiques ont modifié les enjeux sociétaux : la surveillance globale de l'environnement devient une priorité internationale encore plus urgente et la mise en commun des moyens une nécessité face aux nombreux défis technologiques.

De plus le DASE mène des études et organise des pôles de compétence dont l'objectif est d'évaluer les aléas, d'estimer les impacts sur les installations nucléaires et ceux qui en découleraient sur l'environnement. Il bénéficie pour cela de son expertise, d'outils de calcul performants et d'exercices de simulation de crise au CEA.

L'expérience acquise par le CEA, pour réussir sa mission historique de surveillance des explosions nucléaires et de lutte contre la prolifération des armes nucléaires, devrait lui permettre de rester en « première ligne » et à la France de rester un acteur majeur dans le domaine à « haute valeur ajoutée » de la surveillance de l'environnement.

## 7. RÉFÉRENCES

Beaucoup d'informations et d'animations (tsunamis par exemple) sont accessibles sur le site Internet ([www.dase.cea.fr](http://www.dase.cea.fr))

[Réf.1] La Détection Chimique et Radioactive dans l'Environnement. Revue Chocs (numéro 35 - décembre 2007) Revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires

[Réf.2] TERATEC : Pôle européen de compétence en simulation numérique haute performance implanté sur le site du CEA-DAM Ile de France à Bruyères le Châtel