

CARACTÉRISATION DES SOURCES RÉGIONALES D'ÉMISSION DES ONDES INFRASONORES SUR L'AFRIQUE DE L'OUEST À L'AIDE DE LA STATION INFRASON I17CI, CÔTE D'IVOIRE

**K. Benjamin KOUASSI^{1,4*}, Fidele YOROBA^{1,4},
Kouakou KOUADIO^{1,4}, Adama DIAWARA^{1,4}, Paul Antoine YAO¹,
Pierrick MIALLE² et Alexis Le PICHON³**

¹*Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides
(LAPA- MF), UFR-SSMT, Université FHB, 22 BP 582 Abidjan 22,
Côte d'Ivoire*

²*Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty Organization (CTBTO),
Vienne, Autriche*

³*Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), France*

⁴*Station Géophysique de Lamto, BP 31 N'Douci, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : benjamin.kouassi@gmail.com

RÉSUMÉ

La caractérisation des sources d'émission d'ondes infrasons dans l'atmosphère a été réalisée à partir des données mesurées par la station *I17CI* en Côte d'Ivoire sur la période d'Octobre 2009 à Juin 2016. Les signaux infrasons observés ont été étudiés dans la bande de fréquences [1 - 2] Hz à l'aide d'algorithmes provenant des logiciels Diva et PMCC. Les analyses montrent la présence de deux types de sources émettrices d'ondes infrasons dans l'atmosphère (i.e sources saisonnières et sources fixes dites permanentes). Les sources saisonnières sont principalement caractérisées par des systèmes convectifs qui se forment sur la zone ouest africaine. Ces systèmes constitués de cellules orageuses issues de la convection profonde et associés aux éclairs génèrent des ondes infrasonores dont la saisonnalité est liée au déplacement latitudinal de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). Les sources fixes dites permanentes sont particulièrement des industries, des mines et/ou gisements pétroliers en exploitation, des barrages hydroélectriques et des aéroports. Ces sources sont principalement localisées–au sud-est de la Côte d'Ivoire et à l'Ouest du Ghana.

Mots-clés : *ondes infrasonores, station I17CI, Lamto, Côte d'Ivoire, Azimut, West Africa.*

ABSTRACT**Characterization of regional infrasound emission sources over West Africa using the I17CI infrasound station in Côte d'Ivoire**

The characterization of the sources of infrasound waves emission in the atmosphere was performed using the I17CI station data in Cote d'Ivoire from October 2009 to June 2016. The observed infrasound signals were studied in the frequencies [1 - 2] Hz using algorithms from Diva and PMCC software. The analyses show the presence of two types of sources emitting infrasound waves in the atmosphere (i.e. seasonal sources and fixed sources called permanent sources). Seasonal sources are mainly characterized by convective systems that occur over West Africa. These systems made up of thunderstorm cells resulting from deep convection and associated with lightning generate infrasonic waves whose seasonality is linked to the latitudinal displacement of the InterTropical Convergence Zone (ITCZ). The permanent sources are particularly industries, mines and/or oil fields in operation, hydroelectric dams and airports. These sources are mainly located in south-eastern of Côte d'Ivoire and western of Ghana.

Keywords : *infrasound waves, I17CI station, Lamto, Côte d'Ivoire, Azimuth, West Africa.*

I - INTRODUCTION

Les Ondes infrasonores ou infrasons sont des ondes atmosphériques dont les fréquences se situent en dessous du domaine audible (autour de 15 - 20 pulsations par seconde). Leur bande de fréquences admise est comprise entre 0 et 20Hz. Vu la faible valeur de leur fréquence, elles se propagent sur des milliers de kilomètres dans l'atmosphère avec peu d'atténuation. Les infrasons sont aussi des ondes acoustiques et les variations de pression atmosphérique associées à des sources naturelles ont des amplitudes en moyenne 1 000 fois plus importantes que celles correspondant au seuil d'audition, mais ces variations restent trop basses pour éveiller une sensation sonore [1]. La découverte de ces ondes infrasonores s'est faite en 1883 lors de l'éruption du volcan Krakatoa en Indonésie. Cette éruption a généré des ondes acoustiques qui ont été enregistrées sur tous les baromètres du monde entier [2]. Ces ondes sont produites par deux types de sources : les sources naturelles (e.g volcans, orages, houles océaniques, météorites, etc.) et les sources anthropiques (e.g explosions aériennes nucléaires, chimiques, avions, etc.). Au départ, les ondes infrasons ont été utilisées dans un contexte militaire pour déterminer les positions des pièces d'artillerie lors des tirs. Par la suite, les caractéristiques de

ces ondes ont fait d'elles une technologie essentielle pour la lutte contre la prolifération des armes nucléaires par l'Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (OTICE). C'est dans ce contexte que la station I17CI a été installée en Côte d'Ivoire. L'étude de la propagation des infrasons dans l'atmosphère est une science nouvelle et jeune qui s'est révélée dans les années 1980. Le domaine d'étude des infrasons est vaste notamment dans les applications civiles: volcans [3], houle océanique, météorites, ondes de gravité [4], systèmes convectifs ou orages, éclairs, etc. Par exemple, pour la climatologie, à partir des données enregistrées par la station I17CI, [5] ont étudié le lien entre les éclairs et tonnerres émis par les orages sur l'Afrique de l'Ouest et les ondes de gravités produites sur la même zone. Ces auteurs ont aussi analysé la climatologie des éclairs issus des orages avec la zone de convergence intertropicale (ZCIT). La station I17CI installée en Côte d'Ivoire a été certifiée en 2002 et fait partie des soixante (60) stations primaires infrasons dans le système de surveillance de l'OTICE. Cette station permet de détecter les ondes infrasonores provenant des sources locales (Côte d'Ivoire), régionales (Afrique de l'Ouest) et lointaines (monde entier). Les signaux enregistrés par la station sont renvoyés en temps réel au Centre International de Données (CID) à Vienne en Autriche au siège de l'OTICE. Au CID, ces données sont dépouillées, traitées, analysées afin d'identifier des éventuelles sources d'explosions ou tous autres sources similaires.

Après le traitement des données, les détections sont consignées dans une base de données ou sous forme de bulletins. Dans les bulletins les détections concernant la station I17CI, proviennent pour la plupart de sources régionales et ne sont pas toutes expliquées. Les sources régionales d'émission d'ondes infrasons sont catégorisées en sources fixes et en sources mobiles. Les sources mobiles sont dans leur grande majorité des systèmes convectifs sur l'Afrique de l'Ouest [5]. Les sources fixes sont très peu documentées dans les bases de données du CID ou l'on note principalement les activités minières en Mauritanie. Cependant, dans la région ouest africaine, il y a beaucoup d'industries minières, pétrolières, barrages hydroélectriques et d'autres industries susceptibles d'émettre des ondes infrasons dans l'atmosphère. Cela rend la tâche du CID encore plus difficile car il cherche à identifier les explosions nucléaires parmi les multitudes autres sources émettrices des ondes infrasons. Ainsi, l'identification et la localisation de ces sources régionales fixes d'émission d'ondes infrasonores permettront au CID de s'intéresser aux sources ponctuelles d'explosion nucléaire, chimique etc. afin de mieux mener son rôle de surveillances de la non-prolifération des armes nucléaires. L'objectif de ce travail est de contribuer à la localisation et à l'identification des sources d'émission d'ondes infrasons régionales détectées par la station I17CI. Ce travail présente dans la section 1 les données et méthodes utilisés en

décrivant la zone d'étude. La section 2 est consacrée à l'analyse des données dans le but de caractériser les sources d'émission d'ondes infrasons, c'est-à-dire la localisation et l'identification de ces sources. Enfin une discussion sera faite dans la section 3.

II - DONNÉES ET MÉTHODES

II-1. Cadre de l'étude

La station I17CI de la Côte d'Ivoire fait partie du réseau international de surveillance de l'OTICE qui compte 60 stations dont 80 % sont opérationnelles et réparties sur toute la surface de la planète en fonction d'un certain nombre de spécificités établies par l'OTICE. La station I17CI est située dans la zone rurale de Dimbokro au centre de la Côte d'Ivoire (latitude $6,67^\circ$ N et longitude $4,86^\circ$ W loin des sources pouvant générer des bruits dans les signaux enregistrés. Cette station est composée de quatre micro-baromètres référencés (DI1B, DI2B, DI3B et DI4B) disposés en forme de triangle équilatéral de 3 km de côté environ (DI2B, DI3B et DI4B) dont un micro-baromètre au centre (DI1B) (*Figure 1*). Les micro-baromètres mesurent les faibles fluctuations de la pression atmosphérique dans la bande de fréquences [0 - 20 Hz] et sont également dotés d'un système de filtrage acoustique pour réduire les bruits engendrés par les vents environnants. Les données enregistrées sont transmises en temps réel au Centre National de Données (CND) de Côte d'Ivoire situé à la station Géophysique de Lamto. Ces données sont ensuite transmises par satellite au CID à Vienne en Autriche et à d'autres partenaires de la station tels que l'Armée Américaine (AFTAC) et le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) de France. Les capteurs de la station I17CI, tout comme ceux du réseau international de surveillance, sont calibrés pour détecter les ondes infrasons dont les fréquences sont situées dans la bande [0,1 - 4] Hz. Cependant cette étude s'est focalisée sur les événements régionaux dont les fréquences sont comprises entre 1 et 2 Hz.



Figure 1 : Réseau micro-barométrique de la station I17CI en Côte d'Ivoire. Les micro-baromètres utilisés et leur localisation sont référencés par DI1B, DI2B, DI3B et DI4B. La distance entre les micro-baromètres est ~ 3 km

II-2. Bulletins infrasons

Les bulletins d'information ou bulletins infrasons contiennent tous les signaux traités (i.e détectations d'évènements) par les analystes dans la bande de fréquences utiles suivant le procédé : Progressive Multi Channel Correlation (PMCC). Les bulletins peuvent être journaliers, hebdomadaires ou mensuels et renseignent toutes les informations concernant les ondes infrasons associées à un évènement donné. Ces informations sont entre autre : la date de l'évènement, l'heure d'enregistrement, la fréquence, la position (i.e azimut), la vitesse de propagation de l'onde infrason et la corrélation suivant le temps d'arrivé de l'évènement au niveau de chaque capteur (micro-baromètre), etc. Par ailleurs, l'éloignement des sources émettrices d'ondes infrasonores que détecte chaque micro-baromètre est directement lié à la fréquence d'émission de cette onde infrason. De ce fait, une onde de très faible fréquence (~ 0.1 Hz) va se propager plus loin pratiquement à des milliers de kilomètres car très peu atténuée contrairement à une onde de fréquence ~ 4 Hz qui se propage sur quelques dizaines de kilomètres parce que beaucoup plus atténuée. Les sources d'émission de ces ondes sont dites lointaines et proches (i.e locales) respectivement. Dans ces conditions, les sources régionales se situent dans la bande de fréquences [1 - 2] Hz. Du fait de la distance (~ 3 km) qui sépare les micro-baromètres, le réseau de mesures de la station I17CI est moins efficace pour détecter les sources locales (i.e distance de propagation de l'ordre de

centaine de mètres à quelques dizaines de kilomètres). Dans la base de données du CID, les détections de la station I17CI dans leur grande majorité, sont des sources régionales. C'est pour cela que dans cette présente étude, nous allons nous focaliser sur les ondes infrasons dont la fréquence se situe dans la bande [1 - 2Hz], c'est-à-dire les ondes infrasons de sources régionales. Les bulletins de détections élaborés par les analystes couvrent la période d'octobre 2009 à Juin 2016.

II-3. Méthodes

Le traitement des signaux enregistrés par les micro-baromètres lors du passage d'une onde infrasonore au-dessus de ceux-ci se fait par la méthode PMCC [6]. Cette méthode est basée sur le critère de similitude des signaux enregistrés par les différents capteurs de la station pour un évènement donné. Par ailleurs, la détection des ondes infrasonores se fait en déterminant des fenêtres temporelles où l'onde se propage au dessus des micro-baromètres. Cette technique est traduite par *l'Équation 1* :

$$\Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki} = 0 \quad (1)$$

où, Δt_{ij} est le temps écoulé (en seconde) entre la détection de l'onde infrason par le capteur i et par le capteur j [6].

Ainsi, lorsque cette relation est vérifiée, les caractéristiques de l'onde sont calculées. Les informations sont ensuite enregistrées en fichiers textes pour constituer des bulletins de détections. Ces bulletins exploitables sont par la suite visualisés automatiquement à l'aide d'un autre logiciel DTK-DIVA (DASE Tools Kit Détection Infrason Valorisé Automatiquement) sur un pas de temps n'excédant pas 72 h pour réduire la taille des informations à analyser.

III - RÉSULTATS

Les sources émettrices des ondes infrasons détectées par la station I17CI sont de plusieurs catégories : fixes ou mobiles ; permanentes ou ponctuelles ; saisonnières ou non. La détection des ondes infrasonores est assujettie à l'organisation des champs de vent en altitude dans la troposphère, stratosphère et mésosphère et aussi à la variation de la température dans ces couches atmosphériques. Ainsi, le changement de la direction du vent et la variation de la température constituent des guides d'onde pour la propagation des ondes [7]. C'est pourquoi, en fonction des saisons de l'année, certaines sources d'onde seraient détectées par la station et d'autres sources non détectées. La station I17CI est située en zone équatoriale d'Afrique de l'Ouest et la plupart des

sources émettrices d'ondes infrasons dans cette région ne sont pas trop loin de la zone équatoriale. Ainsi l'analyse des ondes infrasons dans la bande de fréquences [1 - 2] Hz permet une meilleure caractérisation des sources concernées. Ces détections sont de deux types : les détections produites par les sources saisonnières et celles générées par les sources permanentes. Les sources saisonnières produisent des évènements de façon périodique alors que les sources permanentes en produisent dans des directions fixes sur toute la période d'étude.

III-1. Les sources saisonnières

Dans la bande de fréquences [1 - 2] Hz, sur la **Figure 2**, la station I17CI effectue plusieurs détections de signaux d'onde infrasons (point en couleur) générés par diverses sources dans quasiment toutes les directions (i.e azimuth). Notons ici que l'azimut est l'angle que fait la direction Nord et celle de la source émettrice d'onde infrasons vu de la station de mesures.

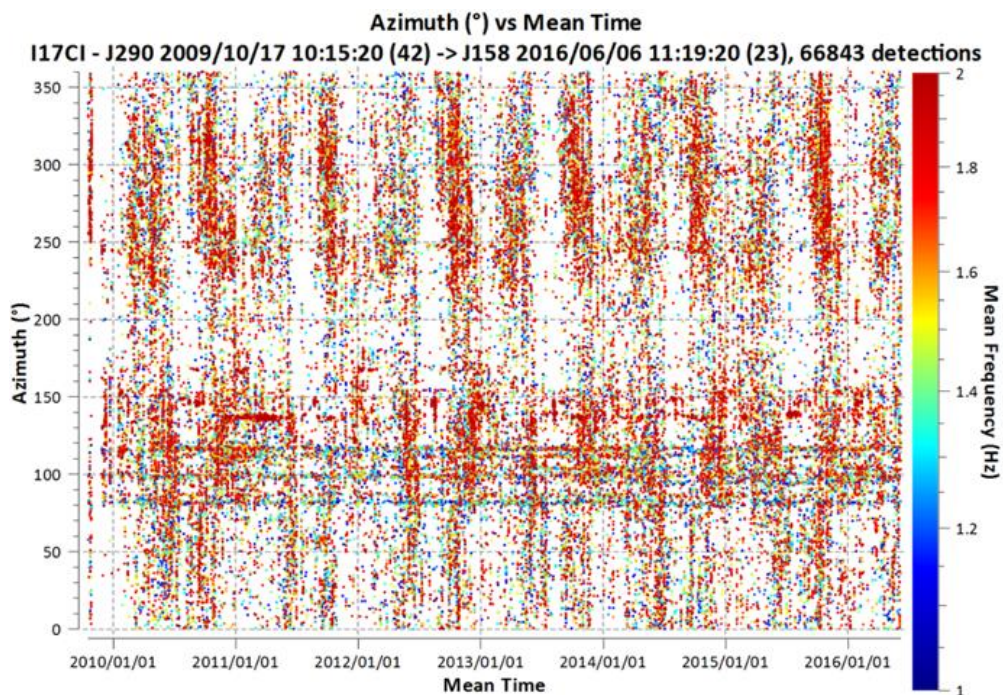


Figure 2 : Représentation en nuage de points des détections de la station I17CI en coordonnées temps-fréquence sur la période d'Octobre 2009 à Juin 2016 dans la bande de fréquence [1 - 2Hz]. L'azimut des détections est sur l'axe des ordonnées. Chaque point représente une détection

Les détections (points en couleur) s'organisent sous forme de cycle pour toutes les années de la période d'étude. En effet, cette organisation des détections est caractérisée par une oscillation Nord – Sud ou Sud – Nord pour certaines détections. Ces détections sont importantes en début et en fin d'année avec une baisse en milieu d'année. La fréquence des signaux détectés renseigne sur la nature de la source. En effet, les sources émettrices de ces ondes infrasons sont généralement les systèmes convectifs qui apportent les précipitations sur la zone ouest africaine particulièrement sur la Côte d'Ivoire. Ces sources sont dominées par des fréquences supérieures à 1,6 Hz donc elles ne sont pas trop éloignées de la station car l'absorption des ondes acoustiques dans l'atmosphère augmente avec la fréquence. En effet, l'exploitation des vitesses des ondes détectées par le réseau microbarométrique de la station I17CI associées à leurs fréquences, permet de mieux caractériser les sources d'émission. Sur la **Figure 3**, deux bandes de vitesse extrêmes dominant et expliquent le type de signaux infrasonores détectés. Les signaux dont les vitesses sont comprises dans la bande [400 - 500] m/s caractérisent les sources très proches des capteurs micro-baromètres et se propagent directement à travers la troposphère (couche de l'atmosphère terrestre comprise entre 7 km aux pôles et 18 Km à l'équateur selon les saisons climatiques). Tandis que les signaux dont les vitesses sont comprises dans la bande [280 - 360] m/s se propagent de la troposphère jusqu'à la stratosphère (couche atmosphérique terrestre au dessus de la troposphère qui s'étend jusqu'à ~50 km) et sont éloignés des micro-baromètres. Par ailleurs, les sources saisonnières émettent des ondes infrasons de vitesses variant entre 340 et 360 m/s et donc se propagent dans le guide d'onde troposphérique [8]. L'analyse de ces vitesses de propagation montre que ces ondes sont d'origines variées et leur propagation est fonction du milieu et de la période de l'année.

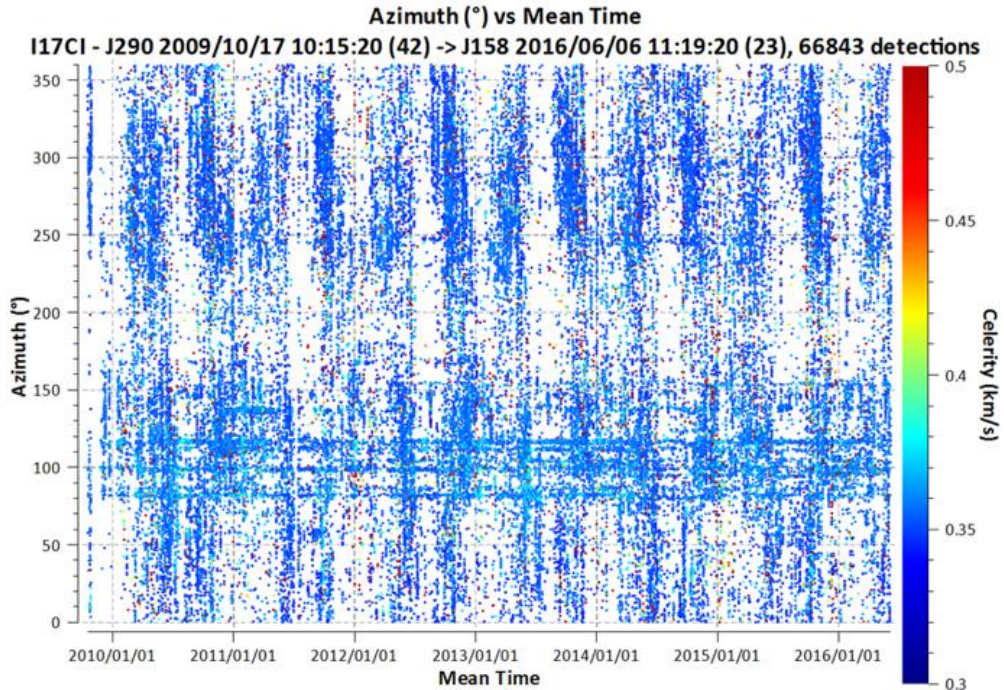


Figure 3 : Nuage de points de la vitesse de propagation des ondes infrasons détectées par la station I17CI en coordonnées temps-vitesse sur la période Octobre 2009 à Juin 2016 dans la bande de fréquence [1 - 2Hz]. Les azimuts des détections sont portés sur l'axe des ordonnées. Les vitesses sont données en km/s

Afin de mettre en évidence la saisonnalité des détections, le traitement des bulletins sur une période d'année est effectué. Ainsi la **Figure 4** montre un lien entre la saisonnalité des détections et le déplacement latitudinal des signaux. Ce déplacement est influencé par la Zone de Convergence Inter Tropical (ZCIT). Par ailleurs, des travaux précédents [5] sur les ondes de gravité ouest africaines ont établi un lien entre le déplacement de la ZCIT associé aux systèmes convectifs et la saisonnalité des détections des ondes de gravité en Afrique de l'Ouest. Ces ondes de gravité ont la même signature d'oscillation Nord – Sud ou Sud - Nord que celle des détections du réseau de mesures de la station I17CI sur la période 2009 à 2016. Les détections d'ondes infrasons montrent aussi des variations saisonnières avec une période d'activité intense pour des azimuts compris entre 200°N et 360°N de mars à juin et de septembre à novembre. On note également une autre période de faibles activités toute l'année entre 0°N et 50°N et entre 150°N et 200°N (**Figure 4**).

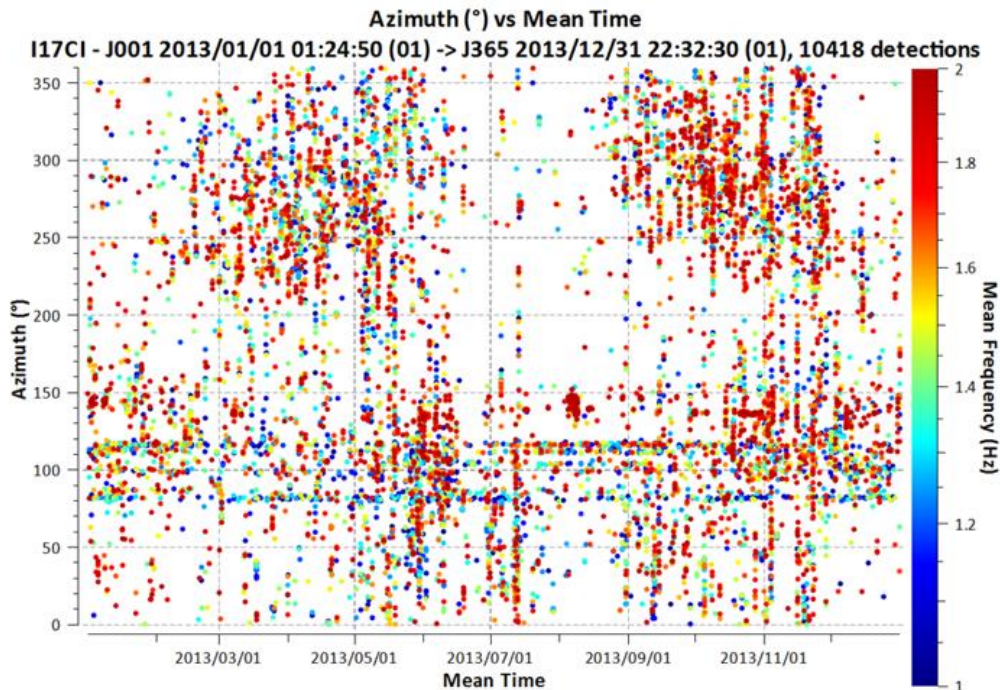


Figure 4 : Représentation en nuage de points des détections en coordonnées temps-fréquence pour l'année 2013 dans la bande de fréquence [1 - 2 Hz]

Les périodes pendant lesquelles l'on observe une intensification des détections des ondes infrasonores correspondent aux saisons orageuses. En effet, le réseau de mesures de la station I17CI est située dans la zone centre de la Côte d'Ivoire, qui du point de vu de la climatologie, enregistre deux saisons des pluies et deux saisons sèches. Ces détections sont majoritairement dues à l'activité orageuse saisonnière confirmant ainsi le caractère saisonnier de ces détections.

III-2. Les sources fixes permanentes

L'analyse des bulletins sur la période d'étude montre des détections dans des directions (azimuts) fixes quasi permanentes. Ces détections d'azimuts fixes sont produites par des sources fixes émettrices d'ondes infrasons. Ces directions permanentes privilégiées sont au nombre de quatre ($135^{\circ} \text{ N} - 141^{\circ} \text{ N}$, $81^{\circ} \text{ N} - 84^{\circ} \text{ N}$, $96^{\circ} \text{ N} - 102^{\circ} \text{ N}$ et $114^{\circ} \text{ N} - 117^{\circ} \text{ N}$). La **Figure 5** présente les détections effectuées par le réseau de mesures de la station I17CI dans ces quatre directions. Elle a été obtenue en appliquant un filtre des détections d'azimuts fixes et permanents sur toute la période d'étude.

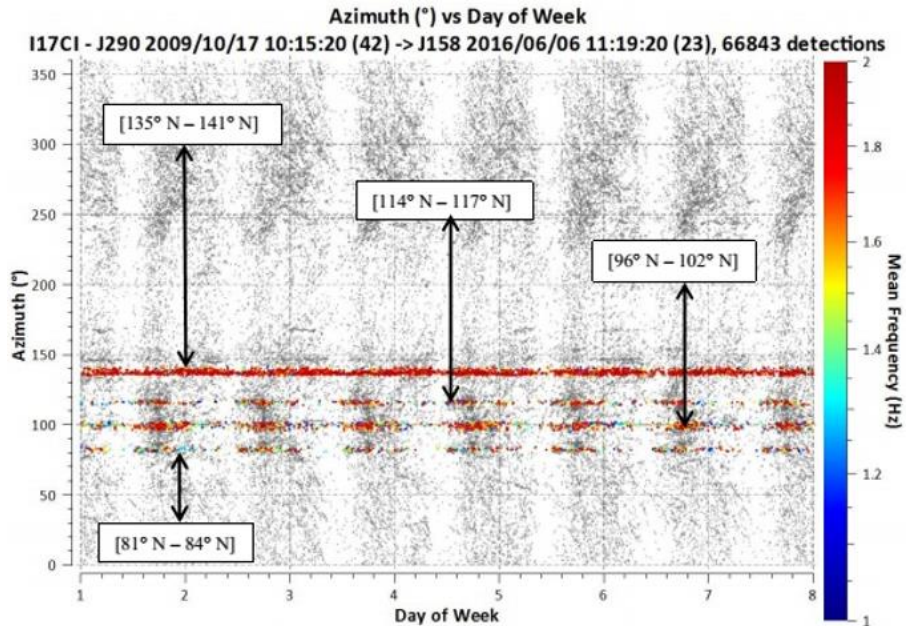


Figure 5 : Représentation spectrale des azimuts des détections en fonction du jour de la semaine (en nuage de points) des évènements infrasonores d'Octobre 2009 à juin 2016 dans les directions $81^{\circ} \text{ N} - 84^{\circ} \text{ N}$, $96^{\circ} \text{ N} - 102^{\circ} \text{ N}$, $114^{\circ} \text{ N} - 117^{\circ} \text{ N}$ et $135^{\circ} \text{ N} - 141^{\circ} \text{ N}$

Dans la direction $135^{\circ} \text{ N} - 141^{\circ} \text{ N}$ les détections sont effectuées tous les jours de la semaine et pratiquement toutes les heures de la journée. Notons que cette direction orientée du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, est aussi celle des alizés maritimes. Dans les trois autres directions, les détections possèdent des configurations similaires sur toute la période d'étude. Le nombre de détections est faible dans la matinée et plus importante dans la soirée. Cette particularité des détections est due à l'organisation des champs de vents et aux variations de la température aux différentes heures de la journée. La direction $135^{\circ} \text{ N} - 141^{\circ} \text{ N}$ est celle du Sud-est (région d'Abidjan) et la projection de l'azimut dans cette direction à partir de l'application Google Earth, montre certaines usines qui fonctionnent de façon permanente (**Figure 6**). Dans cette direction, l'on peut noter la présence de plusieurs sources fixes associées aux activités humaines. Les activités industrielles et manufacturières (usines, aéroport, etc.) existantes depuis 1970 seraient des sources d'émissions d'ondes infrasons détectées dans cette direction. En effet, au sein des usines, les chaudières, les cheminées d'évacuation de gaz sous haute pression et les ventilateurs des tours de refroidissement entraînent des déplacements de grand volume d'air dont les conséquences sont la production des ondes infrasons. En ce qui concerne l'aéroport FHB, se sont les trafics aériens qui génèrent énormément de signaux infrasons dans l'atmosphère par le fonctionnement des turboréacteurs et hélices des avions lors des décollages et atterrissages [9].



Figure 6 : Projection sur Google Earth des azimuts des détections dans la direction Sud-Est ($135^{\circ}\text{N} - 141^{\circ}\text{N}$). Ces azimuts sont orientés en direction de la zone d'Abidjan en général et vers l'aéroport Felix Houphouët-Boigny et les zones industrielles de Vridi et Yopougon en particulier. Les détections couvrent la période d'octobre 2009 à juin 2016 et ont une longueur maximum de 200 km avec une largeur de bande angulaire de 3° d'ouverture

Les trois autres secteurs ($81^{\circ}\text{N} - 84^{\circ}\text{N}$, $96^{\circ}\text{N} - 102^{\circ}\text{N}$ et $114^{\circ}\text{N} - 117^{\circ}\text{N}$) de propagation sont de directions d'Est de la Côte d'Ivoire. La projection de leurs azimuts par l'application Google Earth permet de localiser des sources potentielles émettrices d'ondes infrasonores dans les régions de l'Est de la Côte d'Ivoire, de l'Ouest et du Sud-Ouest du Ghana (**Figure 7**). Dans le secteur $114^{\circ}\text{N} - 117^{\circ}\text{N}$, les sources responsables des émissions d'ondes infrasonores détectées par le réseau de mesures de la station I17CI pourraient être t les barrages hydroélectriques d'Ayamé 1 et 2 (Côte d'Ivoire) (**Figure 7e**) et la centrale thermique de Takoradi (Ghana) (**Figure 7g**). La mine de Chirano (**Figure 7c**), la zone industrielle d'Accra (**Figure 7h**), le barrage hydroélectrique VRA d'Akuse (**Figure 7f**) et le barrage hydroélectrique d'Akosombo (**Figure 7d**) au Ghana seraient les sources potentielles émettrices dans la direction $96^{\circ}\text{N} - 102^{\circ}\text{N}$. Notons que les barrages d'Ayamé 1 et 2, d'Akosombo et celui de VRA d'Akuse sont en exploitation depuis 1959, 1965 et 1982 respectivement. Par ailleurs, du côté du secteur $81^{\circ}\text{N} - 84^{\circ}\text{N}$, se trouvent la mine d'Ahafo (**Figure 7a**) et le barrage de Nangbeto (**Figure 7b**). En effet, les barrages dans leur fonctionnement, s'opposent à l'écoulement

normal de l'eau, par conséquent, celle-ci s'accumule (retenue d'eau) et l'ouverture des vannes pour assurer la production d'électricité entraîne la mise en marche des turbines qui émettent des ondes infrasons. En ce qui concerne les mines d'or à ciel ouvert de Chirano et d'Ahafo et la centrale thermique de Takoradi qui fonctionnent respectivement depuis 2005, 2006 et 1999, c'est l'utilisation d'explosifs et de certains engins pour l'extraction de l'or qui génère des ondes infrasonores.

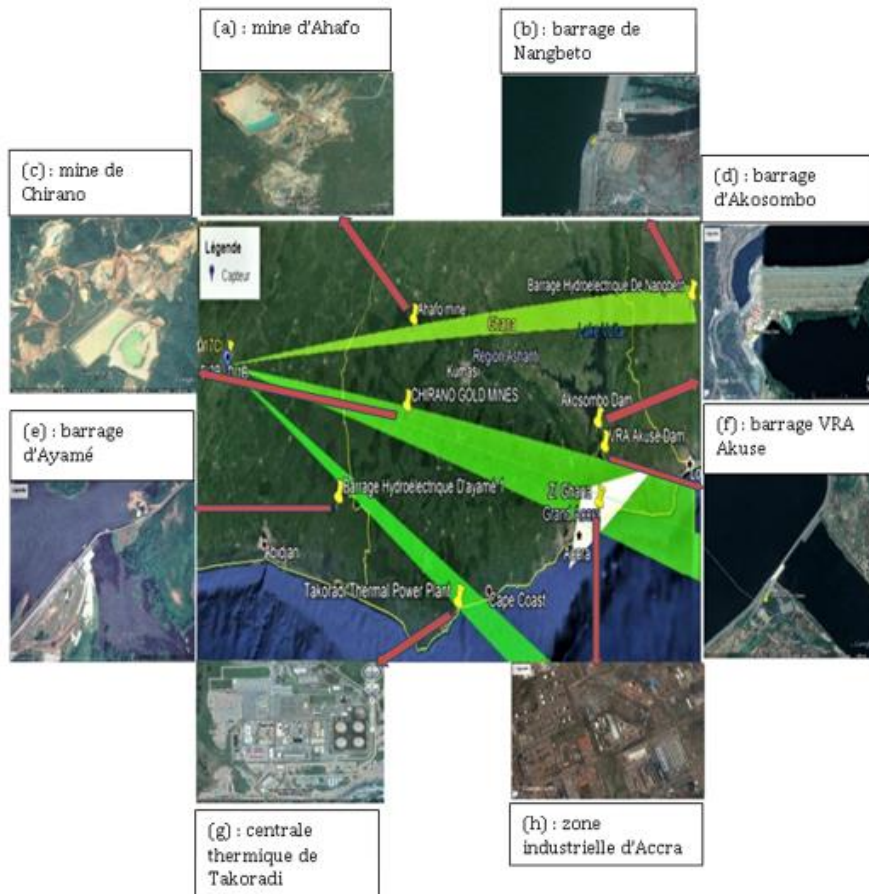


Figure 7 : Projection sur Google Earth des azimuts des détections dans les directions $81^{\circ} N - 84^{\circ} N$, $96^{\circ} N - 102^{\circ} N$ et $114^{\circ} N - 117^{\circ} N$. Les icones en jaune représentent : (a)- Mine d'or d'Ahafo (Ghana); (b)- Barrage hydroélectrique de Nangbeto (Togo); (c)- Mine d'or de Chirano (Ghana); (d)- Barrage hydroélectrique d'Akosombo (Ghana); (e)- Barrage hydroélectrique d'Ayamé (Cote d'Ivoire); (f)- Barrage hydroélectrique de VRA Akuse (Ghana); (g)- Centrale thermique de Takoradi (Ghana); (h)- Zone Industrielle Heavy (Ghana). La longueur maximale de ces projections est de 1000 km avec une largeur de bande angulaire de 3° d'ouverture

IV - DISCUSSION

La localisation précise d'une source émettrice d'ondes infrasonores par les capteurs microbarométriques est possible avec au minimum deux (2) stations du type I17CI. En effet, la zone d'intercession des azimuts des directions projetées de chaque station à partir de l'application Google Earth indique la position probable de la source émettrice. Plus l'on dispose de beaucoup de capteurs microbarométriques pour la détection des ondes infrasons, plus précise est la localisation des sources émettrices. Du fait de son éloignement par rapport aux autres stations infrasons (2000 km de la station I11CV au Cap vert à l'ouest, 3500 km de la station I48TN en Tunisie au Nord et 2000 km de la station I50GN en Ascension, en ce qui concerne les stations supposées plus proches), compte tenu du protocole établi et mis en place par l'OTICE, les détections de sources émettrices par la station I17CI ne sont pas assez précises. En effet dans une même direction, l'on peut avoir plusieurs sources émettrices rendant ainsi complexe leur identification individuelle. Par exemple la mine d'Ahafo et le barrage de Nangbeto sont dans le même secteur dans la direction 81° N – 84° N alors qu'ils génèrent des ondes infrasons. C'est également les cas de la mine de Chirano, la zone industrielle du Ghana, le barrage d'Akosombo et celui de VRA Akuse qui sont situés dans le secteur dans la direction 96° N- 102° N et la Centrale thermique de Takoradi et les barrages d'Ayamé 1 et 2 dans le secteur dans la direction 114° N – 117° N. Par ailleurs, les signaux détectés dans le secteur Sud-Est de la Côte d'Ivoire (i.e 135° N – 141° N) montrent une déviation azimutale des ondes infrasons. Cette déviation est caractérisée par un décalage entre la direction calculée ou observée des sources probables émettrices et la direction réelle de celles-ci. [10] ont observé une déviation azimutale d'environ 10° degrés au niveau des détections produites par une source émettrice fixe. Cette déviation est due à la vitesse des vents atmosphériques qui influence la propagation des ondes infrasons.

V - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les ondes infrasonores détectées par le réseau de mesures de la station I17CI sur la période Octobre 2009 à Juin 2016 ont été traitées et analysées dans la bande de fréquences [1 - 2Hz]. Cette bande de fréquences permet de détecter les sources régionales d'émission d'ondes infrasonores. Par ailleurs, l'analyse des bulletins a permis de mettre en évidence deux catégories de détections. A savoir les détections provoquées par les sources saisonnières associées à la manifestation de la ZCIT et celles causées par les sources fixes permanentes. Les sources saisonnières sont liées aux activités orageuses (convection profonde des cellules nuageuses, des éclairs et des sprites) dont les manifestations temporelles sont également liées au déplacement de la ZCIT.

Alors que les sources fixes permanentes sont associées aux activités anthropiques (usines, mines d'extraction d'or et barrages hydroélectriques). La détection des ondes infrasons produites par les sources régionales en Afrique de l'ouest serait étroitement liée à l'organisation des régimes de vents dans la région. Ces régimes de vents sont troposphériques et s'organisent avec le Jet d'Est Africain (JEA) dans la moyenne troposphère (autour de 650 hPa) d'une part, le Jet d'Est Tropical (JET) autour de 200hPa et le Jet d'Ouest Subtropical (JOST) dans la haute troposphère d'autre part. Ces Jets ont des directions qui varient selon les saisons climatiques et peuvent constituer des guides d'ondes saisonniers pour la propagation des ondes infrasons dans la sous-région. De ce fait, ces travaux pourraient servir de résultats préliminaires pour mener à bien une étude de propagation d'ondes infrasons et leurs facteurs dynamiques conditionnels en Afrique de l'ouest. Cela conduirait ainsi à utiliser les signaux enregistrés par plusieurs stations de mesures et aussi à documenter la dynamique du climat ouest-africain à différentes échelles temporelles afin d'améliorer la localisation des sources émettrices d'ondes infrasons. A cet effet, des initiatives ont été prises tout récemment par la Station Géophysique de Lamto (Côte d'Ivoire) et un projet d'installation d'une station infrason mobile dénommée I68CI a été mis en place et exécuté au Nord-Est de la Côte d'Ivoire plus précisément dans la réserve de Bouna. Ce projet a vu la participation du Centre National de Données (CND) de Côte d'Ivoire représenté par la Station Géophysique de Lamto et l'OTICE.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de la Station Géophysique de Lamto, pour son soutien technique. Les auteurs remercient également, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) de France particulièrement son Département Analyse, Surveillance, Environnement (DASE) qui a fourni les données (i.e bulletins) pour réaliser ces travaux.. Nos remerciements vont enfin à l'endroit de l'OTICE qui a permis et organisé de nombreuses formations de renforcement de capacité et des conférences à l'endroit des chercheurs et personnels de la Station Géophysique de Lamto (160km au Nord D'Abidjan sur l'autoroute Nord) dans le domaine des infrasons et de leurs applications.

RÉFÉRENCES

- [1] - A. Le PICHON, E. BLANC and B. ALCOVERRO, 'Infrasons dans l'atmosphère. Revue scientifique et technique de la Direction des Applications Militaires', N° 26 Décembre (2002)
- [2] - H. KANAMORI, J. MORI and D. G. HARKRIDER, 'Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions'. *Journal Of Geophysical Research*, 99 (November) (1994) 947 - 961
- [3] - M. RIPEPE and E. MARCHETTI, 'Infrasound Monitoring of Volcano-Related Hazards for Civil Protection ' *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, (2019) 1107 - 1140 p.
- [4] - I. HUNCHUZOV and S. KULICHKOV, 'Internal Gravity Wave Perturbations and Their Impacts on Infrasound Propagation in the Atmosphere' *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, (2019) 551 - 590 p.
- [5] - E. BLANC, T. FARGES, A. Le PICHON and P. HEINRICH, 'Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in western Africa'. *Journal Of Geophysical Research*, (June), (2014) 6409 - 6418. <https://doi.org/10.1002/2013JD020499>
- [6] - Y. CANSI, 'An automatic seismic event processing for detection and location : The P.M.C.C . method'. *Geophysical Research Letters*, 22 (1995) 1021 - 1024 p.
- [7] - D. J. BROWN, C. N. KATZ, R. Le BRAS, M. P. FLANAGAN, J. WANG and A. K. GAULT, 'Infrasonic Signal Detection and Source Location at the Prototype International Data Centre'. *Pure and Applied Geophysics*, 159 (2002) 1081 - 1125 p.
- [8] - L. CERANNA, A. Le PICHON, D. N. GREEN and P. MIALLE, 'The Buncefield explosion : a benchmark for infrasound analysis across Central Europe'. *Geophysical Journal International*, 177, (2009) 491 - 508 p. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03998.x>
- [9] - A. Le PICHON, M. GARCE, E. BLANC, M. BARTHELEMY and D. P. DROB, 'Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde'. *Journal of Acoustical Society of America*, 111 (1) (2002) 629 - 641. <https://doi.org/10.1121/1.1404434>
- [10] - A. Le PICHON and E. BLANC, 'Les mesures d'infrasons pour décrypter la dynamique atmosphérique'. *Clefs CEA*, 54 (2006) 40 - 46 <https://doi.org/10.1029/2005JD006020>