

N° d'ordre : 3275

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : GEOPAC

Structure de Recherche : Géophysique et Risque Naturel

Discipline : Sciences d'ingénieur

Spécialité : Géophysique et environnement

Présentée et soutenue le 28/12/2019 par :

**Ibrahim OUCHEN**

*Le titre de la thèse*

**Observation en sciences de la terre et en sciences de l'atmosphère :**

- **Discrimination entre séismes et explosions & Effet de site (étude H/V)**
- **Caractérisation des constituants de l'atmosphère**

## JURY

Rajaâ CHERKAOUI EL MOURSILI	PES, Faculté des sciences, Université Mohammed V Rabat	Président/Rapporteur
Mimoun HARNAFI,	PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V Rabat	Directeur de Thèse
Abdelaziz MRIDEKH	PES, Faculté des sciences, Université Ibn Tofail Kenitra	Rapporteur/Examineur
Jamal EL MHAMDI,	PES, ENSET, Université Mohammed V Rabat	Rapporteur/Examineur
Youssef TIMOULALI,	PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V Rabat	Examineur
Abdelwahid MELLOUKI,	Directeur de recherche, CNRS, Orléans	Examineur

Année Universitaire :  
2019-2020

*À mes chers parents*

*Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.*

*Je mis entre vos mains le fruit de longues années d'études, de longs mois de distance de votre amour de votre tendresse, de longs jours d'apprentissage  
Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais vous exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais vous décevoir, ni trahir votre confiance et vos sacrifices.*

*Puisse Dieu tout-puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et Bonheur.*

*A mes frères et mes sœurs*

## Avant-Propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de la structure de recherche Géophysique et Risque Naturel (GRN) de l'institut scientifique, au centre de recherche GEOPAC (Geophysics, Naturel Patrimony and Green Chemistry) et en collaboration avec le laboratoire ICARE au CNRS d'Orléans.

Au terme de ce mémoire, je tiens à exprimer tous mes vifs remerciements à toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je voudrais dans un premier temps à remercier très chaleureusement, mon directeur de thèse le Professeur M. **HARNAFI Mimoun**, pour tout ce qu'il m'a appris tout au long de ce travail de recherche, pour son encadrement précieux et leur précieux conseil et disponibilités, et pour la grande rigueur scientifique. Je le remercie très sincèrement pour ces années de thèse au sein de l'Institut Scientifique de Rabat.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury, d'être intéressés à mon travail de recherche. Et plus particulièrement Madame **CHERKAOUI EL MOURSLI Rajaâ**, présidente du jury pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail de recherche, et le soutien qui m'a beaucoup aidé en mobilisant tous les moyens possibles pour l'avancement dans la deuxième partie de recherche, en tant que coordinatrice du projet MARSU à l'université Mohammed V. Veuillez trouver ici l'expression de mon entière gratitude d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit et d'avoir pris du temps pour le lire.

Monsieur **EL MHAMDI Jamal**, professeur à l'ENSET de Rabat, qui a accepté de faire partie de mon jury de thèse, et d'accepter d'être partie de cette honorable commission en tant que rapporteur, veuillez trouver ici mon entière gratitude.

Monsieur **MRIDEKH Abdelaziz**, professeur à la faculté des sciences à l'université Ibn Tofail à Kenitra, qui a bien voulu examiner ce manuscrit en tant que rapporteur, veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

Mes plus vifs remerciements à Monsieur **MELLOUKI Abdelwahid**, Directeur de recherche au CNRS d'Orléans, Laboratoire ICARE, groupe Réactivité Atmosphérique

(RA), de m'accueillir dans son laboratoire pour un stage de recherche d'un an dans le cadre du projet MARSU, avec lui j'ai eu de nombreux échanges fructueux. Ses discussions scientifiques, toujours intéressantes m'ont beaucoup aidé à voir plus large et à faire une auto évaluation dans le domaine de la recherche atmosphérique.

Monsieur **TIMOULALI Youssef**, professeur à l'institut scientifique et également un grand connaisseur de la géotectonique, je vous remerciais pour l'intérêt que vous accordez à ce travail.

Madame **DAËLE Véronique**, Directeur de recherche au CNRS d'Orléans, Laboratoire ICARE, pour ses conseils et les discussions que j'ai eus avec elle et qui m'ont aidé et facilité mon avancement lors de mon stage de recherche au sein de l'équipe Réactivité Atmosphérique.

Egalement un vrai grand Merci à monsieur **EL FELLAH Younes** Professeur à Institut agronomique et vétérinaire IAV Hassan II, Département de l'énergie et des machines agricoles, génie rural. Pour sa disponibilité tout le temps, ses discussions scientifiques qui m'ont vraiment aidé durant toutes les années de ma thèse.

La Faculté des Sciences et l'Institut Scientifique sont deux piliers de la recherche au Maroc, ils m'ont donné l'honneur de bénéficier de leurs infrastructures ; à cet effet, je remercie Monsieur le Doyen et le Directeur de ces deux établissements.

Ce travail a été réalisé en grande partie à l'Institut Scientifique avec l'équipe OSST. Le LIMIARF et tout son personnel chercheur m'ont toujours accueilli et simplifié les procédures administratives. Le CeDOC de la Faculté exerce un rôle facilitateur, je remercie Pr. **LFERD Mohamed** en premier temps et Pr. **GUENBOUR Abdallah** pour leurs disponibilités et leurs suivis.

Grâce à l'appui du Ministère de l'enseignement supérieur, j'ai pu bénéficier de la bourse d'état durant trois années. Merci

Je suis très reconnaissant au programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, pour le financement de mon stage de recherche en France.

Enfin, un grand merci à ma grande famille ainsi que mes amis qui ont égayé mon séjour à Orléans, je cite le groupe RA à l'ICARE ainsi que mes collègues au de l'équipe Ondes sismiques et structures de la terre au Maroc pour leurs encouragements.

## Résumé :

Ce travail de recherche est formé de deux grands volets :

-Le premier s'intéresse à l'analyse des signaux sismiques fournis par des stations larges bandes des réseaux sismiques, acquis dans le cadre de la coopération internationale avec l'Institut Scientifique. Pour étudier les possibilités et les méthodes de discriminations entre un séisme et une explosion. Nous utilisons la méthode de l'analyse spectrale qui fournit de meilleurs résultats, pour les spectres situés entre 9 à 12 Hz pour une explosion et entre 1 à 3 Hz pour un séisme. Nous adoptons, la méthode de Nakamura pour évaluer l'effet de l'amplification et/ou atténuation du bruit sismique dans chaque station, les valeurs de la fréquence dominante du site, et le calcul de l'épaisseur de la couche sédimentaire superficielle.

-Le deuxième volet concerne la caractérisation des constituants atmosphériques. Ce nouvel axe de recherche est dicté par le montage de la première station de recherche (Atlas Mohammed V) en sciences de l'atmosphère, unique en son genre au Maroc à Michlifén (Ifrane). Ce volet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration internationale à travers le projet européen (H2020, RISE/Marie Curie) (MARSU) dans le but d'intégrer le réseau global d'observation atmosphérique (GAW). Dans ce cadre j'ai effectué un séjour scientifique d'une année dans le laboratoire (ICARE) au CNRS d'Orléans pour le démarrage de l'observatoire de l'atmosphère à Michlifén. Nous avons effectué des mesures sur l'acide nitreux (HONO) et sur l'AIM (Ambiant Ion Monitor) au supersite d'Orléans. Nous avons pu également effectuer des travaux de mesures sur les composants atmosphériques à la station Atlas UM5.

**Mots clés :** Réseaux sismiques ; discrimination ; Effet de site (méthode H/V), MARSU, Recherche Atmosphérique, Atlas Mohammed V.

## **Abstract:**

This research work consists of two main parts:

-The first part focuses on the analysis of seismic signals provided by broadband stations of the seismic networks, acquired in the framework of international cooperation with the Scientific Institute. To study the possibilities and methods of discrimination between an earthquake and an explosion. We use the spectral analysis method, which provides better results, for spectra between 9 to 12 Hz for an explosion and between 1 to 3 Hz for an earthquake. We adopt the Nakamura method to assess the effect of amplification and/or attenuation of seismic noise in each station, the values of the dominant frequency of the site, and the calculation of the thickness of the surface sedimentary layer.

-The second part concerns the characterization of atmospheric constituents. This new line of research aims to set up and develop the first research station (Atlas Mohammed V) in atmospheric science topic, unique in its kind in Morocco in Michlifén (Ifrane). This component is part of international collaboration through the European project (H2020, RISE / Marie Curie) (MARSU), with the aim of integrating this station into the Global Atmospheric Observing Network (GAW). In this context, I conducted a scientific stay of one year in the laboratory (ICARE) at CNRS Orléans, in order to start the Observatory of Atmospheric Research in Michlifén. We have carried out some studies on nitrous acid (HONO) and on the AIM instrument (Ambient Ion Monitor) at the supersite of Orleans. We also have performed some studies on atmospheric components at the Atlas UM5 station.

**Keywords:** *Seismic networks; discrimination; site effect (H / V method), MARSU, Atmospheric Research, Atlas Mohammed V.*

## ملخص

يتكون هذا البحث من مكونين رئيسيين:

-الجزء الأول يتعلق بتحليل الإشارات الزلزالية التي توفرها محطات الشبكات الزلزالية، التي يتم الحصول عليها في إطار التعاون الدولي مع المعهد العلمي. لدراسة إمكانات وأساليب التمييز بين إشارة الزلزال والانفجار. من بين الأساليب المستخدمة تلك القائمة على التحليل الطيفي، حيث توفر نتائج أفضل، للأطياف الواقعة بين 9 إلى 12 هرتز للانفجار وبين 1 إلى 3 هرتز للزلزال. في هذا الجزء، تم استخدام طريقة ناكامورا لتقييم تأثير تضخم الضوضاء الزلزالية و/أو تخفيفها في كل محطة، وتم استخدام قيم التردد السائد  $(f_0 (H/V))$  في حساب سمك الطبقة الرسوبية السطحية.

- الجزء الثاني يتعلق بتحليل مكونات الغلاف الجوي. يحث هذا الخط الجديد من الأبحاث الى إنشاء أول محطة بحث (أطلس محمد الخامس) في علوم الغلاف الجوي (أطلس محمد الخامس)، وهي محطة فريدة من نوعها في المغرب في ميشليفن (إفران). هذا المكون جزء من تعاون دولي من خلال المشروع الأوروبي (H2020،RISE/Marie Curie) (MARSU) بهدف الاندماج داخل الشبكة العالمية لرصد الغلاف الجوي (GAW). في هذا السياق، قمت بإقامة علمية لمدة عام في المختبر (ICARE) بالمركز الوطني للأبحاث العلمية بفرنسا لبدء العمل بالمرصد الجوي في ميشليفن. حيث أجرينا قياسات على حمض النيتروز (HONO) وعلى AIM (جهاز رصد الأيونات) في موقع أورليان بفرنسا. وتمكنا أيضاً من إجراء قياسات على مكونات الغلاف الجوي في محطة أطلس محمد الخامس.

**كلمات مفاتيح:** شبكات زلزالية؛ التمييز؛ تأثير الموقع (طريقة H/V)؛ MARSU؛ أبحاث الغلاف الجوي؛ أطلس محمد الخامس.

# Table des matières :

<b>Avant-Propos</b> .....	2
<b>Résumé :</b> .....	5
<b>Abstract:</b> .....	6
<b>ملخص</b> .....	7
<b>Table des matières :</b> .....	8
<b>Introduction Générale :</b> .....	12
<b>PARTIE 1 :</b> .....	15
Observation en sciences de la terre :.....	15
-Discrimination entre séismes et explosion & Etude H/V (effet de site) .....	15
🌐 <b>Chapitre 1 :</b> Cadre d'étude global ; Projet de recherche ; Donnée et réseaux sismique.....	16
<b>1. Introduction :</b> .....	17
<b>2. Contexte Géodynamique :</b> .....	18
a. Le domaine de l'Atlas :.....	21
b. Domaine du Bético-Rifian :.....	21
c. Le domaine atlantique :.....	21
<b>3. Réseau sismique et Projet de l'Institut Scientifique :</b> .....	21
3.1 Introduction :.....	21
3.2 Le réseau sismique permanent et les observatoires d'IS :.....	23
3.3 Le réseau mobile et station temporaire d'IS :.....	26
<b>4. Instrumentations :</b> .....	30
<b>5. La donnée sismique :</b> .....	34
<b>6. Conclusion</b> .....	35
🌐 <b>Chapitre 2 :</b> Discrimination entre un événement sismique et une explosion.....	36
<b>1. Introduction</b> .....	37
<b>2. Discrimination des sources sismiques : tremblement de Terre et explosion :</b> .....	39

<b>3. Les méthodes de discrimination et l'application sur les données sismique marocaine :</b>	40
3.1 Localisation :	40
3.2 Profondeur :	40
3.3 Durée du signal :	41
3.4 Méthode d'analyse spectrale :	42
3.5 Méthode Mb/Ms :	43
<b>4. Résultats et discussion :</b>	44
<b>5. Conclusion :</b>	51
📍 <b>Chapitre 3 : Effet de site et calcule des facteurs d'amplification du sol sur le réseau sismique marocain.</b>	52
<b>1. Résumé détaillé du travail :</b>	53
<b>2. Soil amplification factors at the seismographic network stations sites in morocco from seismic ambient noise</b>	56
<b>2.1 Abstract:</b>	56
<b>2.2 Introduction:</b>	57
<b>2.3 Geological setting :</b>	60
<b>2.4 Data and method :</b>	62
<b>2.5 Results and Discussion:</b>	65
<b>Acknowledgments:</b>	71
<b>3. Conclusion:</b>	71
<b>Liste des tableaux :</b>	72
<b>Liste des figures :</b>	73
<b>PARTIE 2 :</b>	75
Observation en sciences de l'atmosphère :	75
-Caractérisation de certains polluants Atmosphériques.....	75
<b>Introduction Générale :</b>	76
📍 <b>Chapitre 1 : La pollution atmosphérique, les différents polluants, méthodes et réseaux de mesures.</b>	79
<b>1. Pollution Atmosphérique :</b>	80
1.1 Les sources des polluants atmosphériques :	81
1.1.1 Les polluants primaires :	82
1.1.2 Les polluants secondaires.....	87
1.2. Réglementation .....	87
<b>2. Méthodes de mesure :</b>	88

<b>3. Réseaux et stations de mesure :</b>	89
3.1 Réseaux de mesures :	89
3. 1.1 Réseaux GAW :	90
3. 1.2 Réseaux ICOS :	90
3. 2. Stations de mesure de la pollution	91
<b>4. Conclusion</b>	92
🌐 <b>Chapitre 2 : Stage de Recherche et Caractérisation des polluants atmosphérique dans la région centre du Loiret à Orléans.</b>	94
<b>1. Introduction:</b>	95
<b>2. Mise en situation contexte :</b>	96
<b>3. Supersite Voltaire :</b>	98
3.1 Description :	98
3.2 Instrumentation :	99
3.2.1 LOPAP :	100
3.2.2 Ambient Ion Monitor 'AIM' :	101
<b>4. Résultats de mesure sur le Supersite Voltaire :</b>	103
4.1 HONO :	103
4.1.1 Source d' HONO :	103
4.1.2 Variation d'HONO	104
4.1.3 Conversion du NO <sub>2</sub> en HONO sur la surface des aérosols :	107
4.1.4 La variation journalière :	109
4.2 Ambient Ion Monitor AIM :	110
4.2.1 Software :	110
4.2.2 Calibration :	110
4.2.3 Quelques résultats de l'AIM :	112
<b>5. Conclusion :</b>	116
🌐 <b>Chapitre 3 : Station de recherche atmosphérique Atlas Mohammed V.</b>	118
<b>1. Introduction :</b>	119
<b>2. Description et instrumentation :</b>	121
2.1 Description :	121
2.2. Protocoles de mesure :	122
2.3 Instrumentation :	123
<b>3. Fonctionnement :</b>	126
<b>4. Résultats et discussions :</b>	127

**5. Conclusion :** ..... 136  
**Liste des Tableaux :** ..... 138  
**Liste des figures :** ..... 139  
**Références :** ..... 141

## Introduction Générale:

### 1. Observation en science de la terre :

Au cours du 20ème siècle, La science des tremblements de terre a eu une importance majeure.

Elle regroupe plusieurs disciplines, notamment la physique, les mathématiques, la mécanique, la géologie etc... Cette science a fait un progrès significatif dans la compréhension de la physique de base des séismes. Au vu du rôle historique de l'institut scientifique, le renouvellement de la discipline sismologie s'est traduit par la création de l'unité de recherche onde sismique et structure de la terre en 2011 (OSST), Aujourd'hui elle a pris le nom de Géophysique et risque naturel (GRN). Les efforts déployés se manifestent par les différentes activités issues de plusieurs collaborations à caractère nationale et internationale. Une banque de données sismiques a été élaborée et promet de donner lieu à plusieurs études et recherches.

La sismologie, a connu un développement substantiel, grâce au développement de nouveau matériel sismique, actuellement, au sien de notre structure, on utilise des stations large bande, digital et de grande capacité de stockage de données. Grace à la coopération internationale entre l'Institut Scientifique avec différentes institutions internationales :

- Institut Jaume Almera des sciences de la terre de Barcelone-Espagne.
- Université de l'Orgon, U.S.A
- Université de Bristol, R.U
- Université de Munster, Allemagne.

Et l'implication de l'Institut Scientifique dans les Project de rechercher tel que TopoIberia, Picasso (Programme d'enquête sur le renversement du système convectif de la mer d'Alboran), and Marocco-Array. Nous avons installé plus de 80 stations sismiques sur la partie Nord du Maroc.

Deux profils sismiques ont été réalisés à l'aide de 1000 géophone espacés de 750m, sur une distance totale de 720 Km :

- SIMA (Imagerie sismique de l'Atlas marocain; Ayarza et al., 2014), entre Tanger et Merzouga.

- RIFSIS (Enquêtes sismiques sur le Rif ; Gallart et al., 2012), entre Sidi Kassem et Berkane, puis Tanger Zaida.

Pour le présent travail nous avons utilisés les données des stations sismiques installées entre (2010-2013) dans la partie Nord du Maroc.

Cette partie se focalise sur l'analyse des signaux fournis par des stations larges bandes lors de ces projets, afin d'appliquer les méthodes de discrimination entre les événements naturels et artificiels et discuté des différents paramètres qui donnent une meilleure distinction entre le signal d'un événement sismique et celui d'une explosion au Maroc.

La méthode de Nakamura a été utilisée pour évaluer l'effet de l'amplification et/ou atténuation du bruit sismique, afin de vérifier la performance de l'installation des stations sismique, par le calcul des valeurs de la fréquence dominante  $f_0$  (H/V), qui est utilisée pour montrer l'épaisseur de la couche sédimentaire superficielle sous chaque station.

## **2. Observation en science de l'Atmosphère :**

La pollution atmosphérique a été définie comme l'accumulation dans l'air de substances à des concentrations entraînant des dommages aux êtres vivants (Caselli, 1995). Il y a quelques décennies, on pensait que cette pollution n'était produite que par les sociétés industrialisées. Toutefois, depuis les années 70, elle s'installe dans les grands centres urbains des pays en développement.

La composition de l'atmosphère a progressivement changé au cours des derniers millions d'années, ce n'est qu'au cours des deux ou trois cents dernières années, depuis le début de la révolution industrielle en Europe et en Amérique du Nord, cependant, que l'homme a commencé à affecter cette changement. Le processus s'est accéléré au cours des 50 dernières années, alors que davantage de pays se sont également engagés dans un développement économique rapide. Le Maroc est exposé au mouvement des différents types de masse d'air, susceptibles de véhiculer les polluants de l'océan Atlantique, de la Méditerranée et du Sahara.

La deuxième partie est consacrée à l'observation en science de l'atmosphère, ce nouvel axe de recherche, est dicté par l'implication de l'Université Mohammed V dans le projet

européen de recherche et d'innovation Horizon 2020, RISE / Marie Curie, MARSU 'MARine atmospheric Science Unraveled', piloté par le CNRS d'Orléans, cette collaboration entre UM5 et le CNRS d'Orléans est concrétisée au Maroc, par la création et le démarrage de la station de recherche atmosphérique à Michlifen (Ifrane). Un projet portant le nom de (MARSU) est conclu entre UM5 et ICARE (Orléans), défini le cadre d'échange de chercheur/Doctorants, et qui m'a permis d'effectuer un séjour scientifique d'une année à Orléans. Nous avons effectué des travaux sur la caractérisation de la pollution atmosphérique dans la région centre val de la Loire, avec des mesures sur l'acide nitreux (HONO), et sur la composition des particules fines et des gaz précurseurs Anion/Cation, mesurées par l'AIM (Ambiant Ion Monitor) au supersite d'Orléans.

Le travail effectué dans cette partie, consiste aussi à donner un aperçu sur le domaine de pollution atmosphérique, une description des polluants existe dans l'air, les opérations de traitement et d'analyse des données collectées. Le tout est décliné sous forme de résultats interprétant le comportement de la composition des polluants atmosphériques.

Nous présentons à la fin de cette partie la station de recherche atmosphérique Atlas Mohammed V installée à Ifrane, avec les principaux travaux de mesure et d'analyse de pollution réalisée dans cet observatoire, les différentes instrumentations et les résultats des concentrations des gaz polluants collectés pour la première fois dans cette zone rurale et déclinées à la recherche scientifique. C'est le premier observatoire de ce type dans l'Afrique du Nord pour de la quantification des principaux polluants atmosphériques.

Un ensemble de travaux, sont en cours de publication, et certains d'eux seront réalisés dans les prochaines années, après l'analyse et l'interprétation des résultats massifs collectés sur la station Atlas AM5, depuis l'installation, ainsi que les mesures effectuées pendant la campagne de mesure Atlas 2019 organisée à Ifrane.

---

## **PARTIE 1 :**

---

Observation en sciences de la terre :

-Discrimination entre séismes et explosion & Etude H/V  
(effet de site)

---

- 🌍 **Chapitre 1 :** Cadre d'étude global ; Projet de recherche ; Donnée et réseaux sismique.
  
- 🌍 **Chapitre 2 :** Discrimination entre un événement sismique et une explosion.
  
- 🌍 **Chapitre 3 :** Soil amplification factors at the seismographic network stations sites in Morocco from seismic ambient noise

## **Chapitre 1 : Cadre d'étude global ; Projet de recherche ; Données et réseaux sismiques.**

*Nous présenterons dans ce chapitre le cadre d'étude global, les projets de recherche et le réseau sismique de l'institut scientifique ainsi que les données prêtes pour mener les diverses études de recherches*

## 1. Introduction :

Le Maroc est situé à l'extrémité nord-ouest de l'Afrique, il est entouré par les plaques mobiles de la mer méditerranée au Nord et l'océan atlantique à l'Ouest. au cours de sa longue histoire géologique conditionnée par cette position, entre les continents africains, européen et américain...plusieurs cycles orogéniques se sont succédés, contribuant chacun, par son contexte géodynamique et son ampleur, à façonner les grands domaines structuraux du Maroc. C'est ainsi que l'on en distingue quatre domaines définis en fonction de la localisation : Le Rif, les Atlas, la Meseta et le domaine saharien. Ces domaines sont caractérisés par la présence de chaînes de montagnes, les chaînes récentes du cycle alpin et les chaînes anciennes, érodées, du cycle hercynien et des cycles précambriens. Il est donc important de connaître les différentes géodynamiques conduisant à la formation de ces structures géologiques.

La plaque africaine se rapproche de la plaque eurasiatique, cet espace est considéré par plusieurs auteurs comme une zone de 'frontière' entre ces deux plaques, ([Dewey et al., 1989](#), [Balanya et Garcia-Dueñas, 1987](#); [Platt et Vissers, 1989](#); [Garcia-Dueñas et al., 1992](#); [Wattset al., 1993](#); [Comas et al., 1999](#); [Cloetingh et al., 1992](#); [Docherty et Banda, 1995](#); [Soto et al., 1996](#); [Perez-Belzuz et al., 1997](#)). Dans un premier temps, on expliquera dans le contexte géodynamique de ce rapprochement qui est en relation étroite avec la situation du Maroc entre un continent (Afrique), un océan (Atlantique) et une zone de collision de plaques active (système de ceinture alpine).

Il en résulte une topographie accidentée avec une large gamme de terrains affleurant s'étendant de l'Archéen au Cénozoïque, ainsi que divers systèmes tectoniques allant des bassins sédimentaires aux ceintures plissées métamorphiques. Dans un deuxième temps, on présentera les différents domaines géologiques de la chaîne atlasique ainsi que ceux de l'Anti-Atlas dont sa partie sud constitue notre terrain d'étude. On présentera brièvement leur évolution tectonique depuis le début du Mésozoïque. Finalement, on s'intéressera à l'activité et la donnée sismique au Maroc dans le contexte géodynamique.

## 2. Contexte Géodynamique :

Le Maroc est un point critique entre une marge passive (océan Atlantique), la mer méditerranée en passe de se fermer et un vieux craton (Afrique). C'est un lieu fantastique où les interactions géodynamiques entre manteau et lithosphère sont illustrées.

Plusieurs études ont documentées les activités géologiques significatives au Maroc :

-La tectonique et la sismicité (Cherkaoui 1988; El Alami et al. 2004; Medina et al. 2011).

-La magmatisme (Agard, 1973; Harmand et Cantagrel, 1984; Berrahma et Delaloye, 1989; Berrahma et al., 1993; El Azzouzi et al., 1999)

-Les mouvements de blocs tectoniques documentés à partir des observations GPS actuelles (Platzman et al. 1993; Stich et al. 2006; Tahayt et al. 2008; Palano et al. 2012).

Le mouvement convergent est documenté à partir des données de vitesse GPS (figure 1.1-A) (Stich et al. 2006; Koulali et al. 2011; Palano et al. 2012). Celles-ci révèlent à une rotation de l'Afrique généralement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à l'Eurasie, et une rotation de l'Eurasie dans le sens des aiguilles d'une montre (par exemple, Palano et al., 2012). Dans ce cadre, la zone la plus active est localisée dans le Rif et la mer d'Alboran. Cependant, la lithosphère marocaine se caractérise par une zone anormalement amincie située sous les domaines de l'Atlas (Frizon de Lamotte et al., 1991; Frizon de Lamotte et al., 2004; Teixell et al., 2005; Zeyen et al., 2005; Missenard et al., 2006; Missenard et Anita, 2011), qui forment une bande étroite singulière dirigée NE-SO recouverte du volcanisme alcalin cénozoïque (Figure 1.1-B).

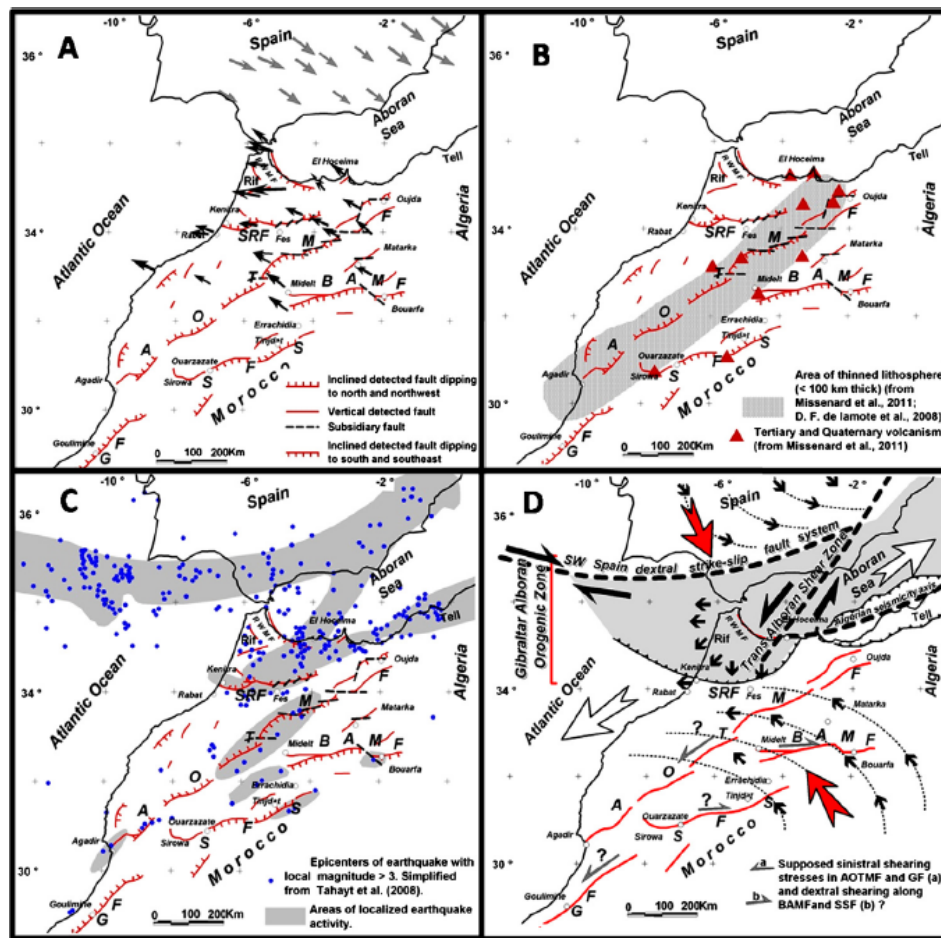
L'activité sismique est concentrée dans la zone mobile au nord de la chaîne de l'Atlas, où la majorité des épicentres sont généralement situés dans le Rif et la mer d'Alboran (figure 1.1-C). Dans le domaine Meseta-Atlas, les séismes importants ( $M_d > 3$ ) sont localisés le long des failles détectées ou confirmées.

Les conséquences de la géométrie de GAOZ (Gibraltar Alboran Orogenic Zone) peuvent être interprétées par deux contextes géodynamiques concurrents :

-Un modèle de processus de subduction active (El Alami et al., 2004; Teixell et al., 2005; Koulali et al., 2011; Pedrera et al., 2011; Balanya et al., 2012

).

-Des mécanismes de transpression/transtension (Stich et al., 2006; Mauffret, 2007; Koullali et al., 2011) (figure 1.1-D).



**Figure 1. 1 :** Les principales failles détectées dans le cadre géologique du Maroc et de la jonction d'Iberia. (A) le champ de vitesse combiné GPS (B) Localisation du magmatisme cénozoïque à quaternaire (triangle rouge). (C) Sismicité de la zone orogénique Alboran au Maroc et à Gibraltar (GAZ). (D) Modèle de transpression/transtension illustrant l'évolution des principales failles détectées. (Khattach et al. 2013)

La situation géographique du Maroc à l'extrémité Nord-Ouest de l'Afrique, est traduite par une sismicité relativement élevée. La zone sismique la plus active est localisée dans le Rif et la mer d'Alboran. Ceci est cohérent avec le fait que cette région correspond à la zone de contact entre les deux plaques convergentes, l'Eurasie et l'Afrique.

Cherkaoui et EL Hassani (2012) établie la carte de sismicité du Maroc de la période 1901 à 2010 (Figure 1.2), qui présente la zone d'étude et la sismicité avec les magnitudes. Tous les événements supérieurs à 3 ont été représentés, selon la localisation et la magnitude. Cette dernière a été représentée avec un cercle, le rayon est une fonction

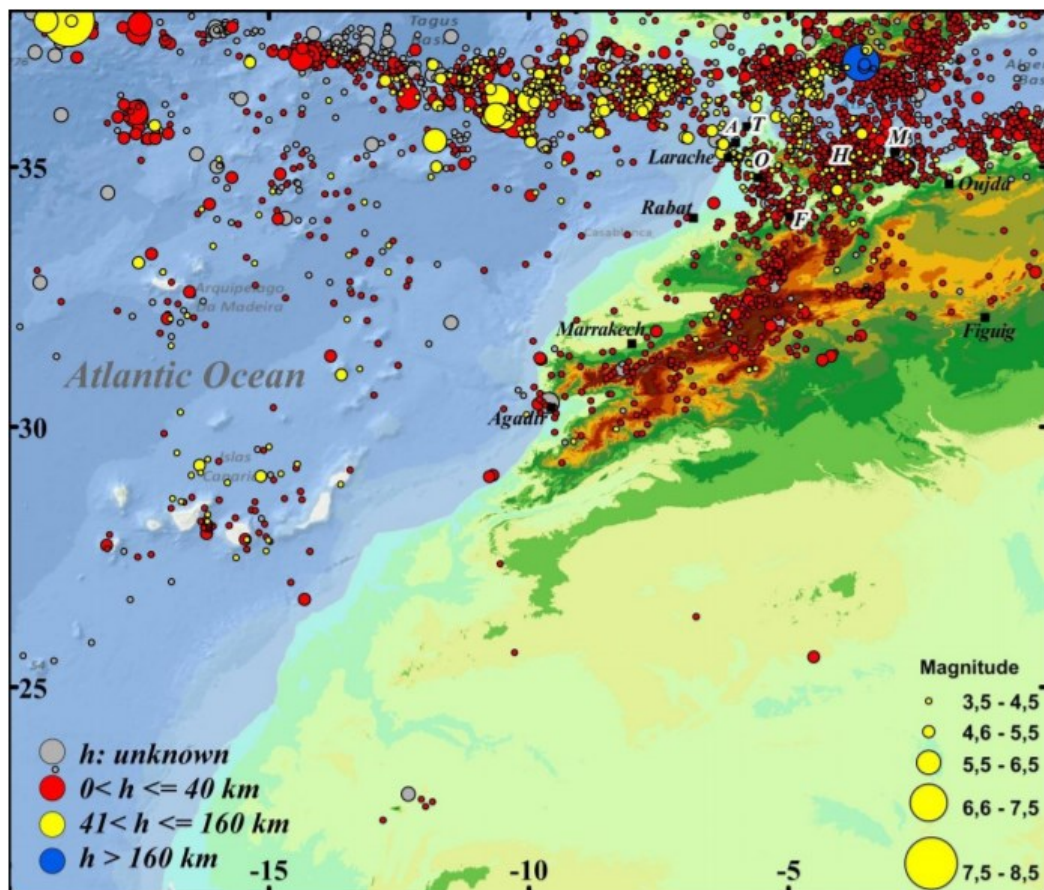
exponentielle de la magnitude. La magnitude 3 peut être considérée comme représentative d'une faible sismicité.

Seulement deux séismes qui ont dépassé la magnitude 6 qui est considérée comme une sismicité de grande amplitude.

- Séisme d'Agadir en Février 1960 (12 000 victimes).
- Séisme d'Al Hoceima en Février 2004 (629 victimes).

Autres tremblements de terre avec moins de grandeurs ont tué de nombreuses personnes et causé des dégâts d'importants (1969 ; Rissani, 1992, Al Hoceima, 1994).

Dans cette analyse, nous ne considérerons que la sismicité récente, que nous pouvons établir pour la période allant de 2007 à 2010, car ce sont les données qui pourraient être liées à l'activité d'origine artificielle. Ainsi que cette période coïncide approximativement avec l'installation des stations sismiques dans le territoire Marocain.



**Figure 1. 2 :** La carte de sismicité du Maroc et de ses environs de 1901 à 2010 à partir de magnitude  $M=3,5$  (Cherkaoui et EL Hassani 2012).

En analysant cette distribution de la sismicité au Maroc et de ses environs pour la période 1901-2010, on peut établir que les épicentres sont répartis sur trois domaines géologiques principaux (figure 1.2) avec les caractéristiques suivantes :

### **a. Le domaine de l'Atlas :**

L'activité sismique est principalement localisée dans le Moyen Atlas et le haut Atlas Central. Cette sismicité est due en grande partie à la présence d'un réseau complexe de failles actives. La faille de l'Atlas du Sud, qui part d'Agadir et passe près de Figuig, est marquée par de violents tremblements de terre et qui pouvant ressembler à celui d'Agadir (1960, Md = 5,9). (Cherkaoui et al. 2012).

### **b. Domaine du Bético-Rifian :**

Cette zone est située entre le Sud-Est de l'Espagne au Nord et la chaîne Rifaine au sud, c'est un site marqué par une activité sismique très dense et qui met l'accent sur le rapprochement et la collision entre les deux plaques tectoniques Afrique-Eurasie. Cette convergence est marquée par de graves tremblements de terre dans le sud de l'Espagne, dans la mer d'Alboran et dans la partie Nord du Maroc, à l'instar du séisme à Al Hoceima en 2004 (Md = 6,3).

### **c. Le domaine atlantique :**

Où on distingue clairement la limite entre les deux plaques, représenté par la ligne sismique Açores-Gibraltar-Sicile. Celle-ci est ponctuée par des tremblements de terre de magnitude  $\geq 6$ . De plus, ces séismes océaniques, en particulier ceux localisés au Sud-Ouest du cap Saint-Vincent, affectent la péninsule ibérique et le Maroc, comme ce fut le cas lors des tremblements de terre de 1755 (Md  $\approx 8,5$ ) et 1969 (Md = 7,3) ayant largement touché toute la partie Nord du Maroc (Figure 1.2). (Charkaoui et al. 2007).

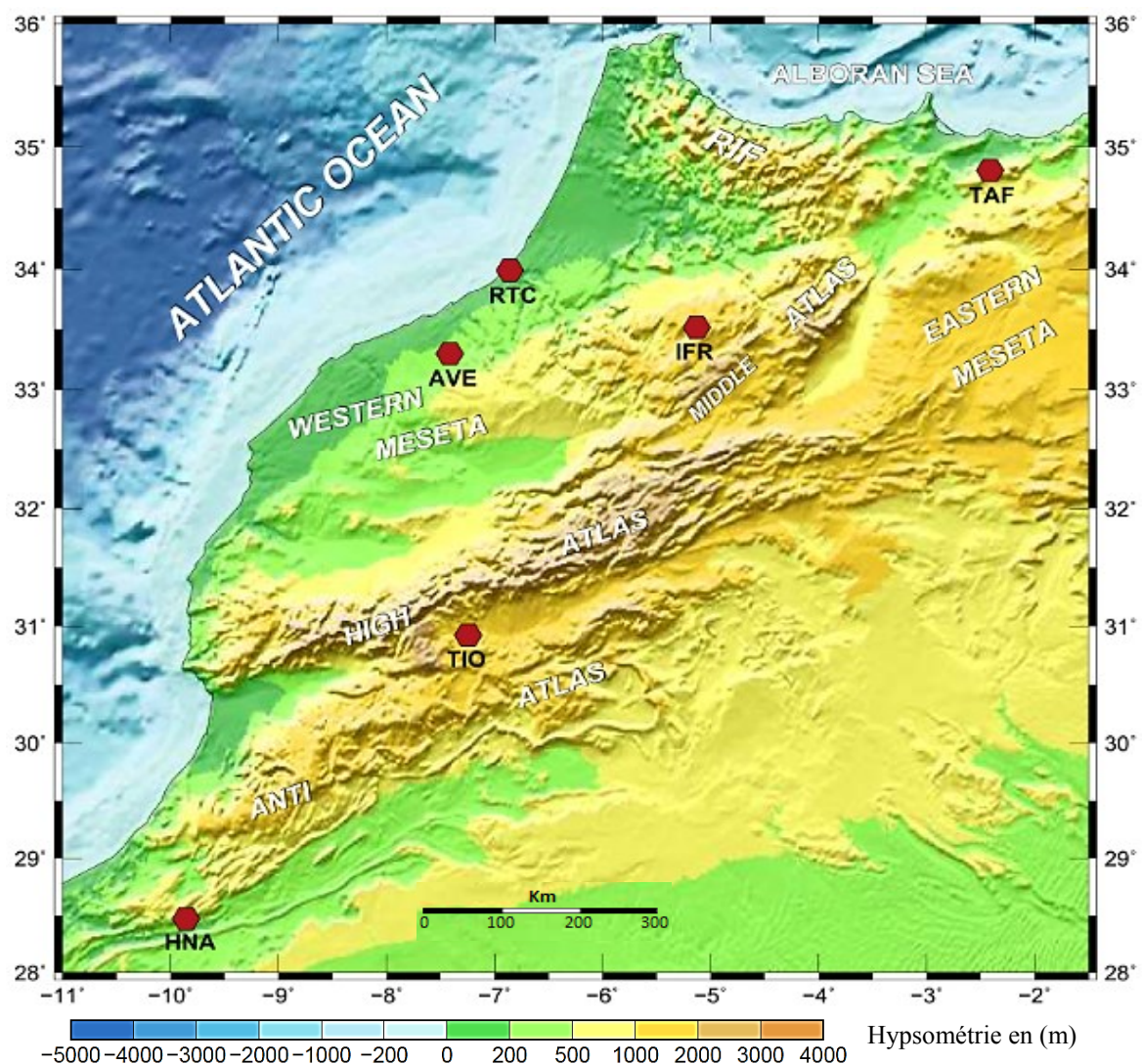
## **3. Réseau sismique et Projet de l'Institut Scientifique :**

### **3.1 Introduction :**

Comparé à d'autres pays méditerranéens (Algérie, Italie, Grèce, Turquie, etc.), le Maroc est caractérisé avec une activité sismique modérée, largement liée à la convergence entre l'Afrique et l'Eurasie. Cependant, chaque année, des tremblements de terre sont ressentis par la population et, dans certains cas, causent des dommages locaux qui peuvent être importants. L'enregistrement des données sismiques n'a commencé qu'après 1937 avec

la mise en service du premier sismographe au Maroc, à l'Observatoire géophysique Ibn Rochd (Averroès) par l'institut scientifique.

Par la suite, et sur le plan de la recherche fondamentale, l'Institut Scientifique à la vocation de mener des études et des recherche dans l'ensemble du territoire marocain en matière de géophysique, notamment la sismologie. A cet effet, les initiatives des chercheurs aboutissent à l'installation d'autres observatoires sismologique constituant le réseau de l'institut scientifique, Qui a été composé de huit stations : Averroès, Ifrane, Tiouine, Tafoghalt, Rabat-Institut et Aouinet Torkoz, Beni Mellal et Errachidia. Ces deux derniers ne sont commencés qu'à partir de 2015 (figure 1.3)



*Figure 1.3 : Carte de déploiement de station sismique permanente de l'institut scientifique*

### 3.2 Le réseau sismique permanent et les observatoires d'IS :

C'est en 1937 que l'Institut de scientifique, en tant qu'institution de l'État, a Commencé le déploiement du premier réseau sismique national, par la construction du premier observatoire, est celui d'Averroès. Mais malheureusement, cette progression d'installation de l'instrumentation a été ralentie par les divers événements qui ont secoué l'histoire du Maroc, on en parle sur l'indépendance en 1956, jusqu'en 1960. Après le séisme catastrophique d'Agadir, des décisions ont été prises pour la création d'un réseau sismologique national qui devrait couvrir une grande partie du territoire national par l'Institut Scientifique.

Les sites ont été sélectionnés sur la base de faibles niveaux de bruit sismique, dans la gamme de fréquences de réponse des capteurs. Le tableau 1 représente les coordonnées de toutes ces stations permanentes ainsi que l'année d'installation. Les enregistrements de données sismiques dans les observatoires de l'institut scientifique permettent de déterminer la magnitude d'un tremblement de terre, les lois d'atténuation, et les effets de site sismiques plus le calcul des facteurs d'amplification du sol. Grâce au développement des méthodes numériques, ce type de mesure permet également de déterminer les accélérations liées aux tremblements de terre destructeurs.

**Tableau 1. 1 :** Le réseau sismologique de l'institut scientifique ce compose de six stations équipées de capteurs à trois composantes : Averroès, Ifrane, Tiouine, Taforalt, Rabat-Institutet Aouin et Torkoz.

<i>Station</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Année d'installation</i>
<b>AVE</b> (Averroes)	33.2981	-7.4133	230.0	1937
<b>IFR</b> (Ifrane)	33.5166	-5.1272	1630.0	1964
<b>TIO</b> (Tiouine)	30.922541	-7.245420	1393.5	1971
<b>RTC</b> (Rabat)	33.988100	-6.856900	50.0	1966
<b>HNA</b> (Aouinat lhna)	28.472517	-9.855449	50.0	1991
<b>TAF</b> (Tafoghralt)	34.810040	-2.411610	854.0	1972

**Observatoire Averroès (AVE) (Figure 1.4):** Après le remaniement et l'organisation de l'institut scientifique en 1930, et l'expansion de son service météorologie vers toutes les branches de physique du globe. Laissant la place à la naissance d'une nouvelle spécialité de la géophysique et de météorologie. Et en 1937 le Maroc disposait sa première station

séismologique dans cet observatoire, les enregistrements sont eus premier temps sur papier. Les deux sismographes horizontaux (N-S et E-W) Mainka de 450 kg de masse ont commencé à enregistrer, avec une période de 12 s, et la troisième composante vertical a été ajouté au début des années soixante, de type Coulomb-Grenet.

En 2006, dans le but d'évoluer le réseau sismique de l'institut scientifique et la progression vers la transmission analogique des données, une station large bande a été installé par coopération entre l'institut scientifique et l'Universidad Complutense de Madrid (UCM) et le Real instituto y observatorio de l'armada de san fernando (ROA).



**Figure 1. 4 :** Observatoire Averroès (AVE) bâtiments principale

**Observatoire d'Ifrane (IFR) (Figure 1.5) :** Après la catastrophe d'Agadir en 1960, la station d'Ifrane vienne d'être construite à partir du 31 Octobre 1964 avec une station à trois composantes à couplage électromagnétiques sismo-galva, courte période, type APX. En 2005, cette station a été évoluée avec l'installation d'une station numérique, courte période, de type Hathor 3, à trois composantes, avec la station analogique de type MEQ 800, et pour passer à la transmission analogique (comme celle d'Averroès), une deuxième station sismologique de type large bande a été installer en 2007.



**Figure 1. 5 :** Observatoire d'Ifrane

**Observatoire de Tiouine (TIO)** Créé en 1971 à Ouarzazate, avec l'installation d'un sismomètre vertical Short-period de type Willmore Mk II (enregistrement à ancre) à période réglable ajustée à  $T=1$  sec. Il a été remplacé après une dizaine d'année avec un sismomètre MEQ 800. En 2008 une autre évolution de la station avec un sismographe large bande.

**La station de recherche Aouinet Torkoz (ANTZ)** (Figure 1.6) : Caractérisé par sa position stratégique loin de toute activité industrielle ou bruit océanique, la station sismologique d'Aouinet Torkoz a été installer en 1991, Il fallait attendre 2007, pour que la nouvelle installation d'un sismomètre de type Very Large Band soit mise en place, dans le cadre d'une coopération scientifique entre l'IS et l'Institut Technique Supérieur de Lisbonne,



**Figure 1. 6** : Le nouveau bâtiment de la Station de Recherches Présahariennes d'Aouinet Torkoz

**Rabat-Institut (RBA)** : En 1966 l'institut scientifique disposait de sa première station sismologique installer au sous-sol, c'est un sismographe à trois composantes et analogique de type MEQ 800. En 2005 la deuxième station numérique de type Hathor 3 Broad band à trois composantes. Mais malheureusement, la qualité de données n'est pas bonne, c'est dû au bruit de fond qui très élevé à cause l'agitation de la mer et aux activités industrielle et humaine.

**Taforalt (TAF)** : En 1979 et dans un local de la commune un sismographe analogique à enregistrement sur papier de type VR-100 avec un sismomètre vertical short period est installé. La modernisation de cette station a été faite en 17 mars 2007, avec une deuxième station numérique Hathor 3, short period aussi, qui a été mise en service.

### 3.3 Le réseau mobile et station temporaire d'IS :

Avec l'approche moderne, l'Institut scientifique (IS) a abordé une nouvelle configuration du réseau sismique depuis 2007, afin de mener des études et des recherches dans l'ensemble du territoire marocain en matière de géophysique. Pour cette raison, un nouveau réseau a été installé après l'intégration de l'institut scientifique dans des projets de coopération internationaux, qui ont permis de renouveler et consolider le réseau sismique national via les observatoires par un matériel moderne. Parmi les buts fondamentaux de ces coopérations, on peut citer, la constitution d'une base de données sismique en utilisant 80 stations sismologiques implantées sur plus de 200 sites (Tableaux 1.3 ; 1.4 ; 1.5 ; 1.6) afin de faire une bonne couverture/quantité de données surtout dans la partie nord et le Rif qui est considéré comme un siège d'activité sismique importante.

**Tableau 1. 2 :** liste de station Broadband temporaires de l'université de Munster

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
<b>MM01</b>	31.5427	-7.6766	767
<b>MM02</b>	31.2322	-7.4215	2004
<b>MM03</b>	30.8776	-6.8996	1203
<b>MM04</b>	30.7374	-6.6296	1533
<b>MM05</b>	30.6804	-6.3895	993
<b>MM06</b>	30.5081	-6.0664	866
<b>MM07</b>	30.2584	-5.6084	731
<b>MM08</b>	31.0259	-6.4921	1278
<b>MM09</b>	30.586	-7.2009	1466
<b>MM10</b>	30.5299	-7.9284	1058
<b>MM11</b>	30.6459	-8.5964	572
<b>MM12</b>	30.4052	-8.827	358
<b>MM13</b>	30.5392	-9.5835	420
<b>MM14</b>	30.0424	-9.1694	774
<b>MM15</b>	31.1991	-8.8973	955

**Tableau 1. 3 :** liste de station Broadband temporaires de l'université de Bristol

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Nom de la Station
<b>MB16</b>	29.7026	-9.5269	259	Assaka
<b>MB17</b>	29.75891	-8.97758	957	Ameln
<b>MB18</b>	30.08408	-8.46033	1736	Ighrem
<b>MB19</b>	29.74105	-7.979389	722	Tata
<b>MB20</b>	29.9029	-7.2914	599	Tissint
<b>MB21</b>	30.08851	-6.87492	692	Foum Zguid

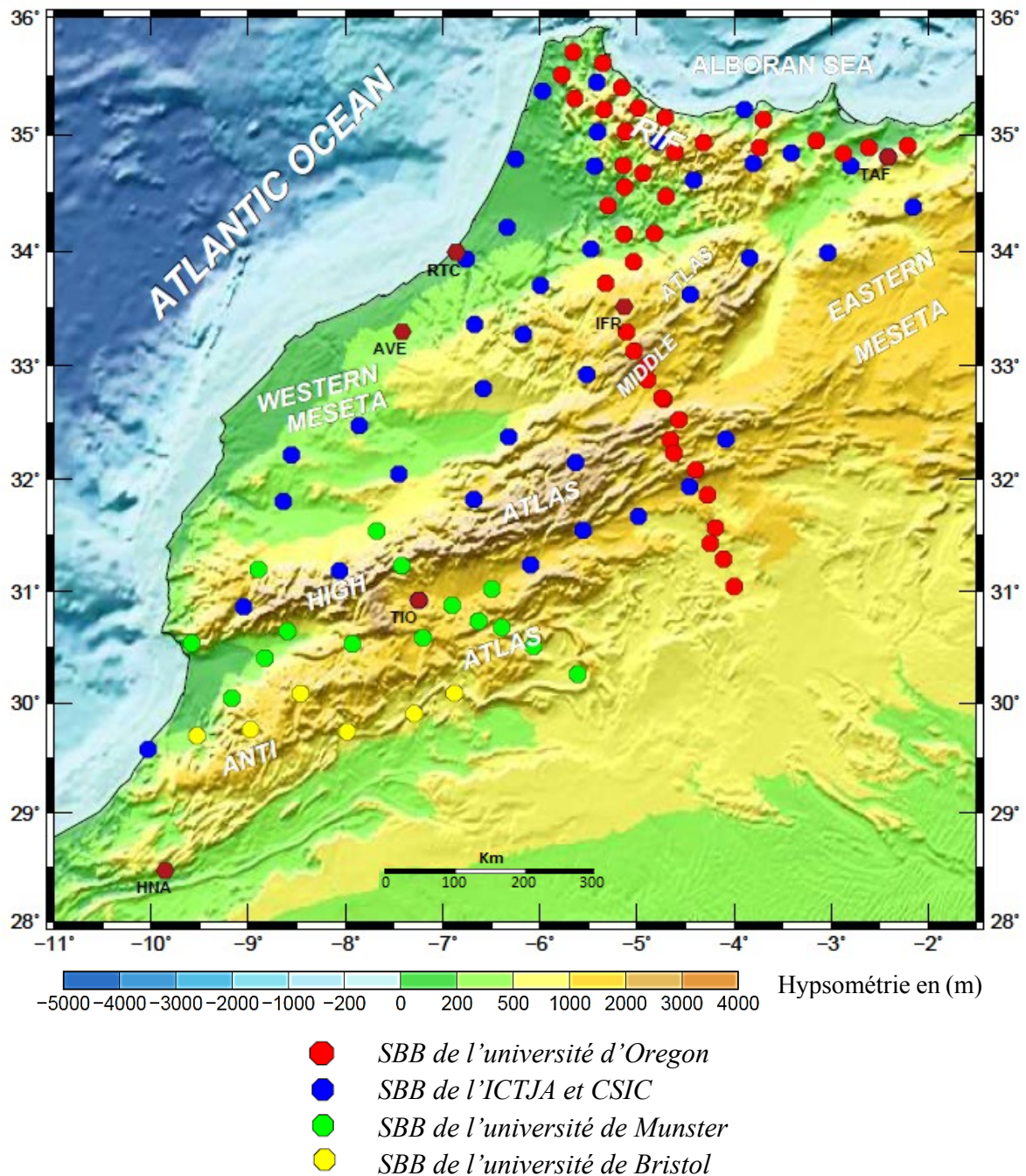
**Tableau 1. 4 : Station Broadband temporaires de l'ICTJA de CSIC**

<i>Station</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Nom de la Station</i>
<i>ALHU</i>	35.213270	-3.890140	63.0	<i>Al Hoceima</i>
<i>M001</i>	33.929260	-6.756040	192.0	<i>Barrage Rabat</i>
<i>M002</i>	35.370390	-5.971240	242.0	<i>Sidi Lyamani</i>
<i>NKM</i>	35.447600	-5.410420	423.0	<i>Nakla</i>
<i>M004</i>	34.791830	-6.249770	119.0	<i>Ain Flefle</i>
<i>M005</i>	35.024750	-5.403090	204.0	<i>Pont Loukas</i>
<i>M006</i>	34.938370	-4.775120	1048.0	<i>Tamorrot, Bab-Barrad</i>
<i>M007</i>	34.756140	-3.800990	1345.0	<i>Tizi-Ouzli</i>
<i>M008</i>	34.732610	-2.797340	296.0	<i>Mechra-Hammadi</i>
<i>M010</i>	34.206150	-6.335290	121.0	<i>Sidi Yahya</i>
<i>M011</i>	34.016630	-5.472140	845.0	<i>Zerhoun</i>
<i>M012</i>	34.730060	-5.434270	227.0	<i>Kharrouba</i>
<i>M013</i>	34.610330	-4.414590	537.0	<i>Taounate</i>
<i>M014</i>	33.939650	-3.837160	924.0	<i>Ras-Ksar</i>
<i>M015</i>	33.984530	-3.035030	1079.0	<i>Debdou</i>
<i>M016</i>	34.378580	-2.156560	1613.0	<i>Jerada</i>
<i>M017</i>	33.698810	-5.990600	657.0	<i>MF Kasba hrira</i>
<i>M018</i>	33.622850	-4.448540	1090.0	<i>Adrej</i>
<i>M019</i>	31.937730	-4.456230	1095.0	<i>Errachidia</i>
<i>M201</i>	33.273411	-6.166739	863.8	<i>Moulay Bouazza</i>
<i>M202</i>	32.922180	-5.513684	1443.5	<i>18km West Khenifra</i>
<i>M203</i>	32.150406	-5.631010	2219.4	<i>Imilchil Mairie</i>
<i>M204</i>	30.864603	-9.047147	953.7	<i>Timagzounine</i>
<i>M205</i>	32.376896	-6.319063	608.5	<i>Beni Mellal Faculty</i>
<i>M206</i>	32.801315	-6.578210	748.9	<i>8km sud Oued Zem</i>
<i>M207</i>	31.187525	-8.062423	1059.3	<i>Ouirgane</i>
<i>M208</i>	29.578123	10.032167	114.5	<i>Mireleft</i>
<i>M210</i>	32.354267	-4.082016	1432.7	<i>Gourrama</i>
<i>M211</i>	30.922541	-7.245420	1393.5	<i>Tiouine</i>
<i>M212</i>	33.363907	-6.667953	730.8	<i>La ghoualem</i>
<i>M213</i>	32.216270	-8.555970	302.0	<i>Youssoufia</i>
<i>M214</i>	31.822237	-6.679138	1245.5	<i>Sakat Azilal</i>
<i>M215</i>	32.046501	-7.449135	518.8	<i>Kalaat Es Sraghna</i>
<i>M216</i>	34.842419	-3.407344	536.8	<i>Driwach tlat Boubkar</i>
<i>M217</i>	31.671852	-4.983050	1070.9	<i>Goulmima</i>
<i>M218</i>	31.547239	-5.551305	1403.0	<i>Tinghir</i>
<i>M301</i>	32.475570	-7.858030	474.0	<i>Skhour Errhamna</i>
<i>M310</i>	31.239483	-6.094933	1486.0	<i>Kalaate Mgouna</i>
<i>M316</i>	31.804780	-8.639980	260.0	<i>Sidi Chiker</i>

**Tableau 1. 5 : liste de station Broadband temporaires de l'université d'Oregon**

<i>Station</i>	<i>Latitude (°)</i>	<i>Longitude (°)</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Nom de la Station</i>
<b>PM01</b>	35.701600	-5.654300	280.0	<i>Roummane</i>
<b>PM02</b>	35.610100	-5.347100	0.0	<i>Tetouan</i>
<b>PM03</b>	35.510400	-5.771300	58.0	<i>Dar_Chaoui</i>
<b>PM04</b>	35.402600	-5.152500	53.0	<i>Quad_Laou</i>
<b>PM05</b>	35.213400	-5.336800	442.0	<i>Face_Chaouen</i>
<b>PM06</b>	35.308600	-5.639000	186.0	<i>Beni_Arouss</i>
<b>PM07</b>	35.227500	-4.986300	632.0	<i>Nowhere</i>
<b>PM08</b>	35.144800	-4.708200	253.0	<i>Bni_Smih_Sud_Jabha</i>
<b>PM09</b>	35.027300	-5.114500	453.0	<i>Bouzina</i>
<b>PM10</b>	34.737900	-5.136800	213.0	<i>N_Fez_el_Bali</i>
<b>PM11</b>	34.930800	-4.311900	919.0	<i>Targuist</i>
<b>PM12</b>	34.850500	-4.608400	1527.0	<i>Taounat_Lakchour</i>
<b>PM13</b>	34.672300	-4.935400	500.0	<i>Ghafsay</i>
<b>PM14</b>	34.552200	-5.126700	174.0	<i>Fez_al_Bali</i>
<b>PM15</b>	34.469400	-4.699700	362.0	<i>Ain_Aicha</i>
<b>PM16</b>	35.130400	-3.694800	593.0	<i>Imzourene</i>
<b>PM17</b>	34.391400	-5.295400	316.0	<i>Anabra</i>
<b>PM18</b>	34.150000	-4.819500	393.0	<i>Ain_Kansera</i>
<b>PM19</b>	34.142700	-5.130800	278.0	<i>Jouaber</i>
<b>PM20</b>	33.906400	-5.032900	611.0	<i>Ben_Souda</i>
<b>PM21</b>	33.720500	-5.319700	1013.0	<i>El_Hajib</i>
<b>PM22</b>	33.294700	-5.107100	1492.0	<i>Timahdite</i>
<b>PM23</b>	33.128000	-5.030000	1990.0	<i>Bou_Anger</i>
<b>PM24</b>	32.995300	-4.897900	1599.0	<i>Talialit</i>
<b>PM25</b>	32.875700	-4.888000	1417.0	<i>Ait_Ghiat</i>
<b>PM26</b>	32.524500	-4.565900	1840.0	<i>Ait_Daoud_ou_Moussa</i>
<b>PM27</b>	32.349900	-4.653700	1468.0	<i>Imiter</i>
<b>PM28</b>	32.231700	-4.617100	1399.0	<i>Rich</i>
<b>PM29</b>	32.084400	-4.391300	1230.0	<i>Ar_Rachidia</i>
<b>PM30</b>	31.863400	-4.271800	1020.0	<i>Meshki</i>
<b>PM31</b>	32.706300	-4.719500	1509.0	<i>Midelt</i>
<b>PM31A</b>	32.718600	-4.739000	1424.0	<i>Midelt-a</i>
<b>PM32</b>	31.568000	-4.191400	898.0	<i>Yerdi</i>
<b>PM33</b>	31.431800	-4.242700	851.0	<i>Erfoud</i>
<b>PM34</b>	31.291200	-4.106800	810.0	<i>Rissani</i>
<b>PM35</b>	31.046300	-3.995800	743.0	<i>Merzouga</i>
<b>PM36</b>	34.889400	-3.735900	702.0	<i>Telat_Azlaf</i>
<b>PM37</b>	34.950700	-3.150600	214.0	<i>Tiztoutine</i>
<b>PM38</b>	34.838500	-2.873700	412.0	<i>Hassi_Berkane</i>
<b>PM39</b>	34.889000	-2.610400	198.0	<i>Aklim</i>
<b>PM40</b>	34.907500	-2.210400	330.0	<i>Ain_Reggada</i>

Ces grands projets de recherche en sismologie ‘TopoIberia, PICASSO et MoroccoArray’ (figure 1.7) sont financés par le ministère de la recherche scientifique espagnol ‘ICTJA del CSIC’, l’université d’Oregon (USA), l’université de Bristol et l’université de Münster (Allemagne) entre 2007 et 2012. Un nombre important de thèses, d’articles et de rapports scientifiques ont été publiés à la suite de ces projets.



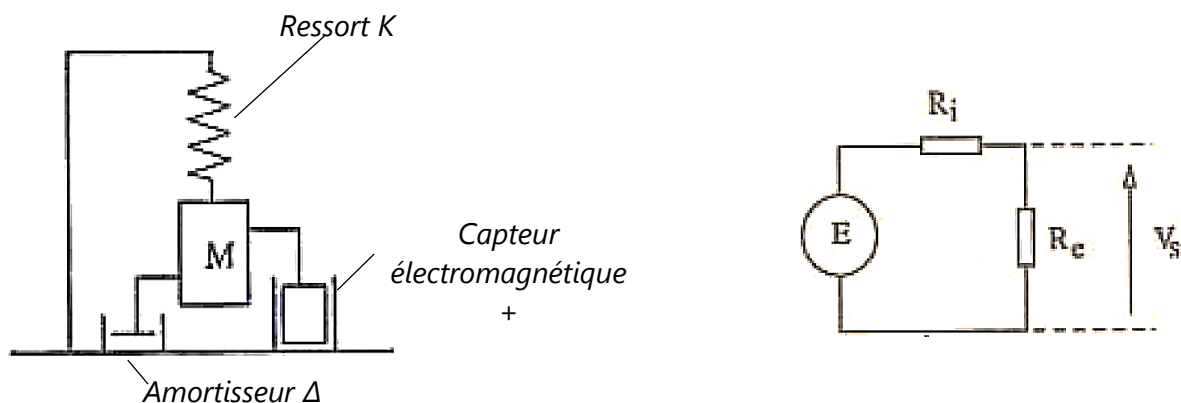
**Figure 1. 7 :** Déploiement du réseau temporaire de l'institut scientifique

## 4. Instrumentations :

Au sein de l'institut scientifique on dispose deux modèles de sismomètres, électromagnétique et électrique :

- Le modèle électromagnétique ou courte période (Figure 1.8), avec bobine mobile dans l'entrefer d'un aimant circulaire. Cette bobine a une fréquence propre de 1 Hz, amortissement 0,7 et générant une vitesse de rotation constante de 145 v/m/s, fabriqué par la société Kinometrics. Un autre modèle du sismomètre courte période, celui de Mark L4 (fréquence propre 1 Hz, amortissement 0,7 et générateur constant 175 v/ m/s) de Lennartz, caractérisé par sa petite taille et ses bonnes conditions. Un troisième modèle s'appelle le modèle de Geotech S13 a également une fréquence propre d'1 Hz et à générateur constant 629 v/m/s. L'unité de conditionnement de signal dispose d'un système d'amplification et de modulation. Le signal du sismomètre passe par un amplificateur à gain variable, avec une plage comprise entre 30 dB-90 dB par pas de 6 dB.

Modèle Mécanique :

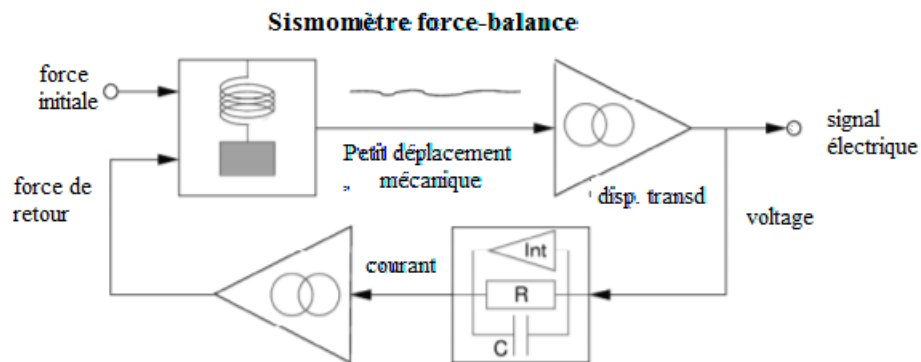


**Figure 1. 8 :** Sismomètre vertical et son circuit équivalent du générateur électromagnétique

- Le Modèle électronique ou sismomètre large bande avec un système actif à trois composants capables de détecter les mouvements du sol sur une large bande de fréquences, d'où le terme «Broadband». Ces capteurs sont le plus souvent utilisés dans des expériences passives, enregistrant les mouvements faibles des tremblements de terre régionaux et tésismiques, ainsi que le bruit ambiant.

Ces capteurs sismiques modernes utilisent la force de retour négatif pour maintenir le mouvement de la masse faible (comme illustré dans la figure 1.9). Cela aide à éviter les

problèmes d'imperfections mécaniques du capteur. Trois nouveaux sismomètres 3C large bande exploitant cette technologie sont utilisés dans le réseau de l'institut scientifique



**Figure 1. 9 :** Schémas fonctionnels des sismomètres à retour (large bande). Idéalement, dans cette configuration, la suspension mécanique et le capteur de déplacement ne détectent pas l'amplitude complète du mouvement du sol, qui n'est présent que dans le chemin de retour.

-le sismomètre Guralp : est un sismomètre trois axes conçu spécialement pour les installations de puits, composé de trois capteurs dans un boîtier scellé, capable de mesurer simultanément les composantes Nord/Sud, Est/Ouest et verticales du mouvement du sol (figure 1.10). Chaque capteur est sensible aux vibrations du sol dans la gamme de fréquences 0,003-50 Hz, une réponse en fréquence large bande rendue possible par l'électronique de rétroaction à équilibrage de force avancée. Guralp est conçu pour être monté sur une surface dure, presque horizontale, couplée au substrat rocheux. Les composants électroniques lui permettent de compenser une inclinaison pouvant aller jusqu'à 3° par rapport à l'horizontale. Une fois nivelé et centré, le 3T commencera à fonctionner automatiquement. Il génère des tensions analogiques représentant la vitesse au sol sur des lignes différentielles équilibrées. Le sismomètre est autonome en dehors de son alimentation de 12 volts. Le centrage et le verrouillage en masse peuvent être effectués en envoyant des signaux de commande à l'instrument, soit via l'unité de commande portable, soit via un numériseur Guralp connecté.

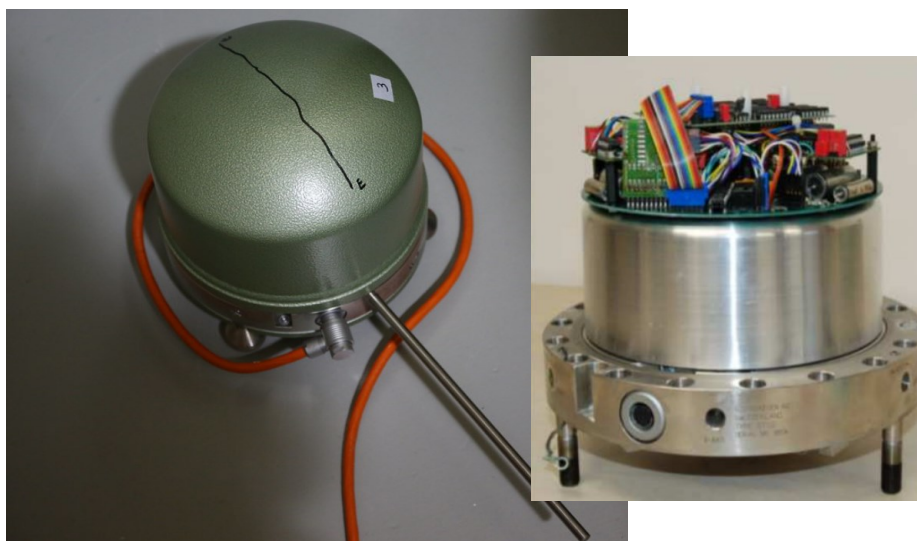


**Figure 1. 10 :** Sismomètre Guralp

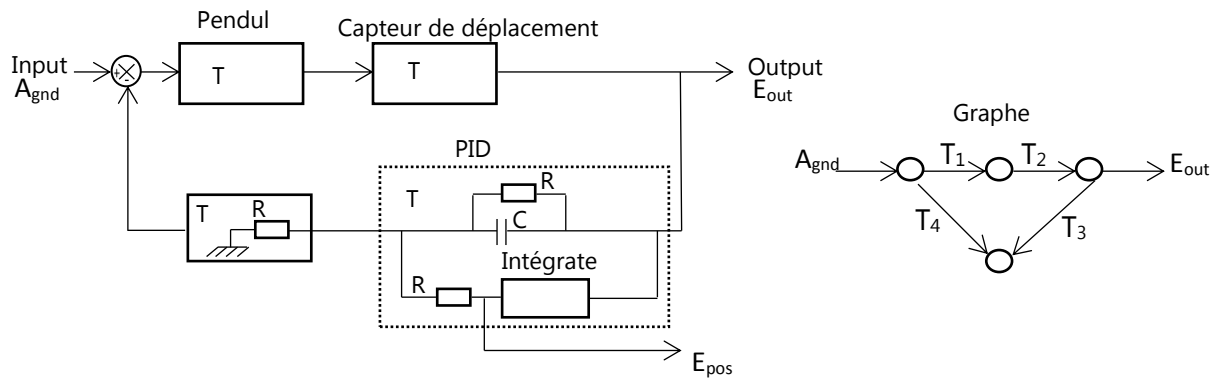
-Le sismomètre STS-2 : le sismomètre large bande 3C Streckeisen STS-2 (figure 1.11) est utilisé pour l'installation d'une station sismique permanente enregistrant des données continues. Il a été démontré que, sur certains sites, la composante verticale du sismomètre STS-2 dans la bande 1-5 MHz n'est que 6-10 dB moins sensible que celle d'un STS-1 (Widmer-Schmidrig, 2003), cet écart est souvent compris entre 20 et 25 dB (par exemple, Berger et al., 2004). Hanka (2000) a montré que les performances sonores de la STS-2 sur de longues périodes peuvent être considérablement améliorées par un blindage thermique étendu.

Le principe du sismomètre STS-2 consiste à répondre à un oscillateur libre avec une période de 120 secondes (0.008 Hz), avec un retour différentiel, la sortie est proportionnelle à la vitesse du sol entre une période de 120 s (0.008 Hz) jusqu'aux hautes fréquences 50 Hz (période 0.02 s) (Tableau 1.7). La figure 1.11 montre le sismomètre STS-2 contenant trois capteurs identiques avec des circuits électroniques et de puissance montés dans un boîtier cylindrique (23 cm de diamètre et 26 cm de hauteur).

En générale, les calibrations d'un sismomètre sont souvent effectués avant les expériences, car leurs paramètres dynamiques peuvent varier pendant le transport et/ou la décroissance en fonction du temps d'utilisation. Une méthode pratique pour la calibration des sismomètres utilisant un dispositif de «table de test» conçu par le professeur Wielandt, qui peut être évalué la réponse en fréquence et la sensibilité des sismomètres (Wielandt, 2002).



**Figure 1. 11** : Sismomètre STS-2 portable à large bande 3C intégré. Côté gauche, STS-2 installé physiquement sur une surface plane. Côté droit, une vue de la partie interne, où certaines cartes électroniques et un boîtier cylindrique



**Figure 1. 12 :** schéma fonctionnel et graphe du Sismomètre STS2

-Le sismomètre Nanometrics Trillium 120PA : Un sismomètre large bande à trois composantes et à équilibrage de force, adapté aux applications portables et fixes. Ce sismomètre est conçu pour une installation sous la surface afin d'optimiser les performances sismiques tout en minimisant les coûts et la logistique liés à la configuration du site.



**Figure 1. 13 :** L'installation typique proposer pour l'installation d'une station Broadband de type Nanometrics Trillium 120PA

L'installation typique proposer pour l'installation d'une station Broadband temporaire est de creuser une niche jusqu'à 70 cm de profondeur et 40 cm de diamètre, au fond de laquelle on met une dalle en béton. Le coffret est placé dedans avec au fond du sable sec (environ 10 cm d'épaisseur). Ensuite une tuile est ajustée sur le sable, puis le sismomètre déposé dessus, correctement orienté (figure 1.13). Ces étapes d'installation

assurent une bonne isolation contre le vent et les aléas de température. Le sable, placé au fond du récipient réduit les vibrations à haute fréquence.

**Tableau 1. 6 :** *Spécifications des sismomètres (broadband) 3C et des numériseurs haute résolution 24 bits utilisés fréquemment dans le réseau de l'Institut Scientifique de Rabat.*

Maker	Type sismomètre	Freq-band-Hz	Sensitivity-volt/(m/s)	numériseur
Streckeisen	STS-2	0.008-50	1500	Quanterra
Guralp	CMG-3T	0.008-50	1500	Reftek130
Guralp	CMG-40T	0.033-50	800	Reftek130
Nanometrics	Trilium240	0.004-35	1200	Taurus
Guralp	6TD	0.03-50	1200	Guralp-CD24

## 5. La donnée sismique :

Les données sismiques enregistrées par les stations sismologiques, sont sauvegardées en continu et à haute fréquence d'échantillonnage, 20 Hz pour les stations permanentes et 100 Hz pour les stations temporaires, sont archivées dans des 'Banques de Données' (BdD). Cette dernière est un système de sauvegarde pérenne des données sismiques, et aussi un système de distribution des informations.

La maîtrise de donnée et leur sauvegarde dépend du support physique et la pérennité de ces données. Et l'accès aux données est effectué à l'aide de logiciels qui permettent la communication avec la banque de données. Citons : netdc (Networked Data Center Protocol), seedlink, etc... Les fichiers de données extraits sont, en général, au format SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data). Le fichier SEED est en deux parties. Une partie relative aux caractéristiques de la station : nom, localisation, altitude, type d'instrument, pôles et zéros des différentes bandes passantes, etc., et la deuxième partie contient le signal sismique.

Une fois le fichier de données, au format SEED, récupéré et enregistré sur l'ordinateur, il faut le convertir dans un format compatible avec le logiciel de traitement utilisé. Il n'y a pas si longtemps, chaque utilisateur écrivait ces programmes de traitement (en fortran, en C, etc.) pour visualiser, filtrer...(traiter ces données). Il existe maintenant des logiciels très conviviaux qui permettent de faire ces opérations rapidement avec des risques d'erreurs moindres.


De très nombreux logiciels permettent de faire les manipulations et l'analyse des signaux sismiques, certains dédiés à la sismologie : SAC, [(Seismic Analysis Code) <http://www.iris.edu>], Pitsa, SeiSan (Havskov and Ottemoller, SeisAn Earthquake analysis software, Seis. Res. Lett., 70, 1999, 2008) et bien d'autres, (voir le site ORFEUS pour une liste exhaustive : <http://www.orfeus-eu.org/Software/softwarelib.html>) et d'autres plus généraux et plus ouverts à toutes sortes de traitement du signal (matlab, maple, octave, etc..). Le fichier de données en format SEED est donc relu avec un programme universel nommé 'rdseed' (pour seed reader) qui va restituer le signal sismique dans le format correspondant au logiciel de traitement. Le fichier de données (exprimées en digit) est accompagné par le fichier des pôles et zéros correspondants à la bande passante de la chaîne d'acquisition.

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cité le contexte général d'étude géophysique commençant par définir le contexte géologique et géodynamique, ensuite par la présentation des réseaux sismique de l'institut scientifique mené lors des projets de recherche que nous avons citée aussi, avec des investigations sur l'instrumentation et les données sismiques.

Le réseau et les données sismologiques et instrumentales installées au Maroc à des fins de recherche scientifique montrent la nécessité de développer ce réseau afin d'être à l'abri des tremblements de terre susceptibles de causer des pertes de vies humaines et des dommages matériels, surtout dans les régions où le risque sismique est élevé. Ce réseau de prévention doit être pris en compte dans les régions d'Al Hoceima et d'Agadir, et dans d'autres régions du Maroc, où l'activité sismique est importante.

Au niveau territorial, l'Institut Scientifique est le premier organisme utilisateur des données sismiques dans la recherche scientifique. Mentionnons qu'une association entre l'IS et le réseau sismologique du CNRST doit incessamment être envisagée. Elle permettra d'améliorer la couverture instrumentale, la synergie entre les chercheurs les universitaires et les autres intervenants, afin de fusionner des moyens humains et logistique.

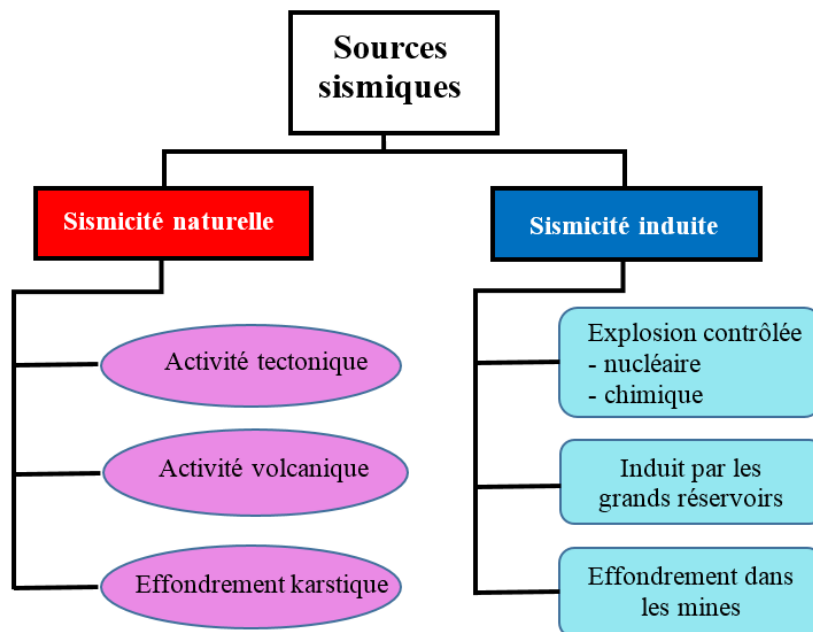
 **Chapitre 2 :** Discrimination entre un événement sismique et une explosion.

# 1. Introduction

On peut considérer que l'activité sismique liée à la tectonique d'une région, est celle formée par l'ensemble événements ayant pour origine une source sismique naturelle. De même, il existe d'autres types de sources, provoqués par les explosions (figure 1.14).

Nous incluons dans la sismicité naturelle l'activité d'origine tectonique, volcanique et moins fréquemment celle qui a pour origine les effondrements sporadiques de cavités karstiques instables. Dans la sismicité induite par l'action de l'homme, nous incluons les tremblements de terre pouvant survenir lors des phases de remplissage et d'exploitation de grands réservoirs, obéissant à un mécanisme tectonique, et qui sont principalement provoqué par la diminution de la résistance mécanique des roches par l'action de la pression normale exercée par l'eau retenue. Nous incluons également dans cette section la sismicité qui peut survenir sous la forme de grands effondrements dans les grandes mines abandonnées et l'activité provoquée par des explosions contrôlées de nature chimique ou nucléaire. Le principal objectif de ce travail est d'appliquer certaines méthodes de discrimination entre les événements d'origine naturelle et entropique dans la partie Nord-Ouest Africaine.

La discrimination est un ensemble de techniques de détection, de localisation et d'analyse qui nous permettent de cadrer un événement dans un des groupes dans lesquels nous avons classé les sources sismiques (Figure 1.14).



*Figure 1.14 : Classification des différents types de sources sismiques.*

Les premières tâches de discrimination au niveau mondial, visant à vérifier le respect du Traité LTBT 'Limited Test Ban Treaty', porte sur l'interdiction complète des essais nucléaires. Les premiers progrès en matière de discrimination sont obtenus par l'observation des différentes caractéristiques de la propagation des ondes générées par les tremblements de terre et les explosions. Ainsi, après de nombreux travaux sur les explosions chimiques dans les carrières, [Leet \(1962\)](#) observe pour la première fois que les enregistrements téléseismiques des explosions nucléaires manquent d'ondes S, même avec une onde P très développée.

Il convient de garder à l'esprit qu'il existe dans le monde environ 200 000 tremblements de terre par an, dont la magnitude sismique est similaire à de petites explosions nucléaires et/ou chimiques qui pourraient se produire. Le problème de leur discrimination est donc d'une grande complexité si nous voulons obtenir un haut niveau de distinction entre ces événements.

Le Maroc est un de ces pays caractérisé par l'extraction minière, c'est le premier producteur mondial de phosphates à partir de carrières à ciel ouvert et souterraines. La plus grande réserve de phosphate au monde est située dans la région de Khouribga (Atlantic Meseta). L'activité minière implique un dynamitage quotidien des mines, donnant comme résultat un nombre assez important des explosions détectées dans cette région. Donc, avec ces caractéristiques, il est nécessaire de développer les recherches sur la discrimination, surtout avec les explosions qui sont enregistrées et localisées chaque jour et qui doivent être identifiées pour être éliminées de la base de données sur la carte de sismicité. Une mauvaise inclusion de ces données, résultat d'une mauvaise discrimination, peut entraîner des modifications dans les statistiques de la sismicité régionale, qui sont immédiatement transmises aux études sur les risques sismiques.

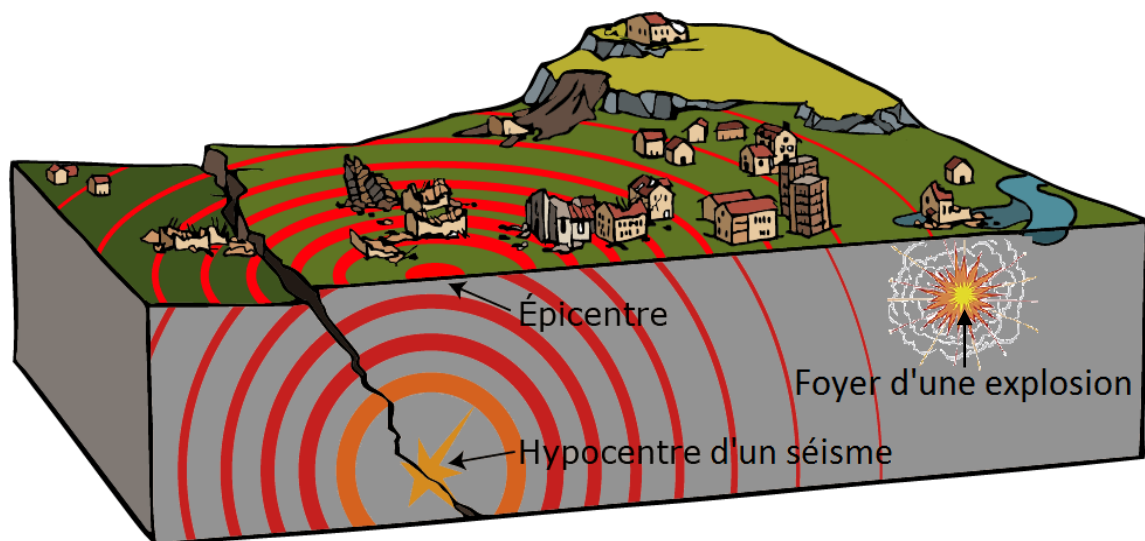
Dans ce chapitre 2, on va traiter une série de techniques de discrimination à l'échelle locale et régionale allant de la détermination du mécanisme au foyer en utilisant le moment tenseur jusqu'à l'analyse des ondes locales et régionales afin d'étudier les différentes gammes de fréquences de chaque type d'évènement. Cette étude de discrimination a été réalisée on utilisant les explosions des deux projets SIMA en Mars 2010 ([Ayarza P 2014](#)), et RIFsis en Octobre 2011 ([Gil Alba et al. 2014](#)).

Les premiers résultats obtenus qui, en comparant avec ceux obtenus à terme différé par d'autres études, nous permettent d'avoir un puissant outil de discrimination, dans le cas de séisme de magnitude moyenne entre 2 et 4 mb à une l'échelle locale, ainsi que pour les événements artificiels pour la même gamme de magnitude. Afin de mettre en place les principales conclusions et les futures lignes de recherche ouvertes à la suite de ce travail.

## 2. Discrimination des sources sismiques : tremblement de Terre et explosion :

La différence dans la génération d'un séisme et d'une explosion constitue la base de la discrimination (Figure 1.15). Les paramètres essentiels qui donnent une différence entre un séisme et une explosion sont :

- La profondeur : puisque les explosions se produisent à la surface de la terre. Par contre les séismes sont plus profonds.
- Le Mécanisme au Foyer : les séismes naturels ont deux types de polarisations, positive et négative, ce qui signifie compression et dilatation, causées par les failles sismiques.



**Figure 1. 15 :** Foyer d'un événement sismique et d'une explosion

Il semble que nous devons évidemment connaître le processus physique dans le foyer d'une explosion ou un événement sismique afin de pouvoir faire la discrimination. D'où la nécessité d'une détermination du processus d'inversion du moment tenseur, qui agglomère les propriétés d'élastique et la rupture de la source.

D'autres techniques ont été développées pour fournir des informations sur la nature de la source grâce à l'étude empirique du train d'ondes sismiques et de ses propriétés observées pour les deux types de source. Premièrement, l'étude de la variation spectrale, qui permet de caractériser les événements artificiels régionaux, et une deuxième méthode utilisant le rapport moment magnitude sur la magnitude local. Enfin, la distribution spectrale étudiée par les spectrogrammes nous permet de discriminer les explosions étudiées.

### **3. Les méthodes de discrimination et l'application sur les données sismique marocaine :**

Un grand nombre de techniques ont été utilisées pour distinguer les séismes et les explosions minières. Certaines de ces méthodes exécutent le processus d'identification des différents évènements. Dans le présent travail nous avons appliqué certain de ces méthodes de discrimination sur les signaux enregistrés dans le réseau sismique de l'Institut Scientifique.

#### **3.1 Localisation :**

La méthode d'identification principale est basée sur la localisation d'une source sismique détectée. Si l'épicentre (le point de la surface de la Terre situé au-dessus de l'emplacement) est situé dans une zone océanique, mais qu'aucun signal hydroacoustique n'a été enregistré, l'événement est alors identifié comme un tremblement de terre. On peut couramment identifier un grand nombre d'événements sismiques de cette façon, car une grande partie de l'activité sismique de la Terre se déroule sous l'océan. S'il est déterminé que l'emplacement est terrestre, alors, dans certains cas, l'événement peut toujours être identifié comme un tremblement de terre sur la seule base de l'emplacement, par ex. si le site n'est clairement pas propice aux explosions nucléaires (par exemple, près de centres de population) ou s'il n'y a aucune preuve d'activité humaine dans la région.

#### **3.2 Profondeur :**

À l'exception des emplacements d'épicentre, la profondeur de la source sismique est le discriminant le plus utile pour identifier un grand nombre de séismes. Un séisme peut

être identifié avec une grande confiance comme étant un tremblement de terre si sa profondeur est déterminée à moins de 15 km.

La procédure de détermination de la profondeur de la source fait partie de la recherche du lieu de l'événement à l'aide de l'heure d'arrivée de quatre signaux P ou plus. De plus, certains signaux sismiques, causés par l'énergie venant de la source, et réfléchi par la surface de la Terre au-dessus de l'épicentre, puis redescendant dans la Terre, sont semblables à l'onde P sur des grandes distances. Une estimation de la profondeur peut être obtenue en mesurant la différence de temps entre la première énergie d'onde P arrivée et l'heure d'arrivée de ces signaux réfléchis. L'analyse des données à large bande par modélisation des formes d'onde est particulièrement utile pour détecter ces signaux réfléchis. Des méthodes empiriques peuvent également être utilisées, basé sur la comparaison avec des événements sismiques précédemment interprétés dans la même région que l'événement à l'étude.

En principe, l'un des avantages d'utiliser la profondeur en tant que méthode d'identification est qu'elle ne dépend pas de la magnitude : elle fonctionne aussi bien pour les petits événements que pour les grands, à condition que les données de base soient d'une qualité de signal adéquate et que les signaux soient détectés sur un nombre suffisant de stations.

Cependant, il ne sera pas le seul moyen de faire la distinction entre les explosions chimiques et nucléaires, à moins que l'explosion nucléaire soit relativement grande et profonde ; ou entre les explosions nucléaires souterraines et les tremblements de terre, à moins que ceux-ci soient suffisamment profonds.

### **3.3 Durée du signal :**

Durée du signal, car pour la majorité des événements, la durée est plus longue pour les séismes que pour les explosions Y. Li et al. [32] C'est l'une des méthodes simples de discrimination. Puisque la durée de signal des séismes est supérieure à celle des explosions. La représentation temporelle pourrait nous indiquer la durée de l'événement sismique, le temps d'arrivée des phases, la magnitude, etc. En effet, pour le cas d'un signal sismique à faible ratio signal/bruit ou tronqué, il est très difficile d'avoir tous ces

paramètres. Généralement pour les évènements de moyenne magnitude la durée de signal d'un tremblement de terre est supérieure à celle d'une explosion.

### **3.4 Méthode d'analyse spectrale :**

La méthode d'analyse spectrale est basée sur la distribution du spectrogramme Amplitude-fréquence dans le domaine temporel et sur l'étude des caractéristiques spectrales des signaux et du contenu fréquentiel de formes d'onde sismiques entières. Cette méthode a été utilisée par [Kim et al. \(1994\)](#) et [Plafcan et al. \(1997\)](#). Pour étudier les caractéristiques spectrales des explosions et des séismes, nous avons calculé la distribution fréquence-temps des sismogrammes (spectrogramme). Cette méthode est un moyen utile pour étudier le contenu en fréquence de formes d'onde sismiques entières observées à des distances locales et régionales.

Le succès de cette méthode repose en partie sur le fait que le rapport entre les ondes basses fréquence et les ondes hautes fréquence est généralement différent pour les séismes et les explosions. Ainsi que, l'analyse des signaux de séisme et d'explosion sur l'ensemble de leur spectre de fréquences est un élément important des efforts actuels de recherche et de développement en matière de surveillance sismique.

Les estimations spectrales ont été calculées pour chaque fenêtre temporelle (nous utilisons généralement environ 25 secondes), avec un chevauchement de 75% entre chaque fenêtre temporelle successive, en appliquant la méthode d'estimation spectrale multicouche adaptative. Ainsi, nous avons adopté cette méthode largement appliquée car elle s'applique facilement à un grand ensemble de données et que ses techniques statistiques produisent une discrimination efficace, même si les résultats dépendent de la région étudiée.

Etant donné que l'analyse spectrale fonctionne bien lorsque les ondes de surface sont suffisamment grandes pour être mesurées. La contribution principale requise pour une analyse plus sophistiquée consiste à mieux utiliser les informations contenues dans les signaux d'onde P et d'autres signaux à haute fréquence et d'amplitude assez importante.

### 3.5 Méthode Mb/Ms :

La Méthode Mb / Ms Il est basé sur le principe que l'explosion libère plus d'énergie sous la forme d'ondes de volume et que les séismes ont plus d'énergie sous la forme d'ondes de surface. Dans le cas des explosions souterraines, elles génèrent des signaux qui tendent à avoir une magnitude d'onde de surface (Ms) et magnitudes des ondes de volume (mb) qui diffèrent de celles des signaux sismiques. Ceci est essentiellement le résultat d'explosions émettant plus d'énergie sous forme d'ondes de volume (rayonnement sismique haute fréquence) et les séismes émettant plus d'énergie sous forme d'ondes de surface (rayonnement sismique basse fréquence).

Pour utiliser cette méthode d'identification, les valeurs mb et MS sont requises pour l'événement. Pour les grands événements, ce n'est pas un problème, mais pour les plus petits événements de magnitude (inférieur à  $mb=4,5$ ), il peut être très difficile de détecter les ondes de surface de basse fréquence, car la méthode Ms: mb fonctionne intrinsèquement mieux pour identifier les faibles tremblements de terre que pour identifier les petits des explosions. Les stations internes fourniraient une capacité supplémentaire importante pour obtenir les valeurs Ms pour les événements jusqu'à  $mb=3.0$  et peut-être même en dessous.

### 3.6 Autre méthodes :

- first motion est une méthode d'identification basée sur l'étude des différences dans la direction du premier mouvement des ondes P. Nous utilisons l'observation des ondes P en raison de la nature de compression des sources d'explosion artificielles ;

-Observation des ondes S : en raison de la nature compressive des sources de l'explosion, les explosions génèrent généralement moins d'ondes de cisaillement que la plupart des séismes.

- Méthode de la complexité : De nombreux signaux d'onde de volume générés par une explosion ont tendance à être relativement simples et consistent en quelques cycles. Au contraire, la plupart des ondes de volumes générés par les vagues ont tendance à être relativement complexes et consistent en de longues séries (appelée coda).

-L'analyse du mécanisme au foyer peut expliquer la génération des ondes sismiques de manière plus quantitative et peut être utilisée comme méthodes discriminantes. Cependant, ces méthodes nécessitent des données sismiques de haute qualité et des réponses bien définies, dans les zones d'étude souhaitées. Par conséquent, l'application de ces méthodes est limitée pour les explosions, car les signaux détectés pour les explosions ont une faible amplitude et les observations sont effectuées uniquement par certaines stations sismiques locales. Cette méthode nous a permis de différencier la nature et la direction du premier mouvement des ondes P.

-La méthode du moment magnitude est la quantification la plus précise, et aussi la plus moderne permettant de mesurer la taille d'un séisme ; Cependant, les échelles de magnitude ont longtemps été utilisées pour atteindre cet objectif. Les échelles de magnitude sont les amplitudes des ondes sismiques observées avec quelques corrections d'atténuation et les corrections des distances à la source, par contre, ces quantités sont des paramètres empiriques et ne peuvent être liées à aucun paramètre physique spécifique de la source. Récemment, le moment magnitude  $M_w$  est calculé à partir du moment tenseur  $M_0$ , par la relation suivante :

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.07 \quad (M_0 \text{ in } N m) \quad (1)$$

Le moment tenseur  $M_0$ , est un paramètre statique qui n'a aucune relation avec les propriétés dynamiques de la source. Cependant, il peut être grossièrement associé à l'énergie totale rayonnée. En ce sens,  $M_0$  ou  $M_w$  peuvent être utilisés comme paramètres de quantification utiles pour un séisme.

#### **4. Résultats et discussion :**

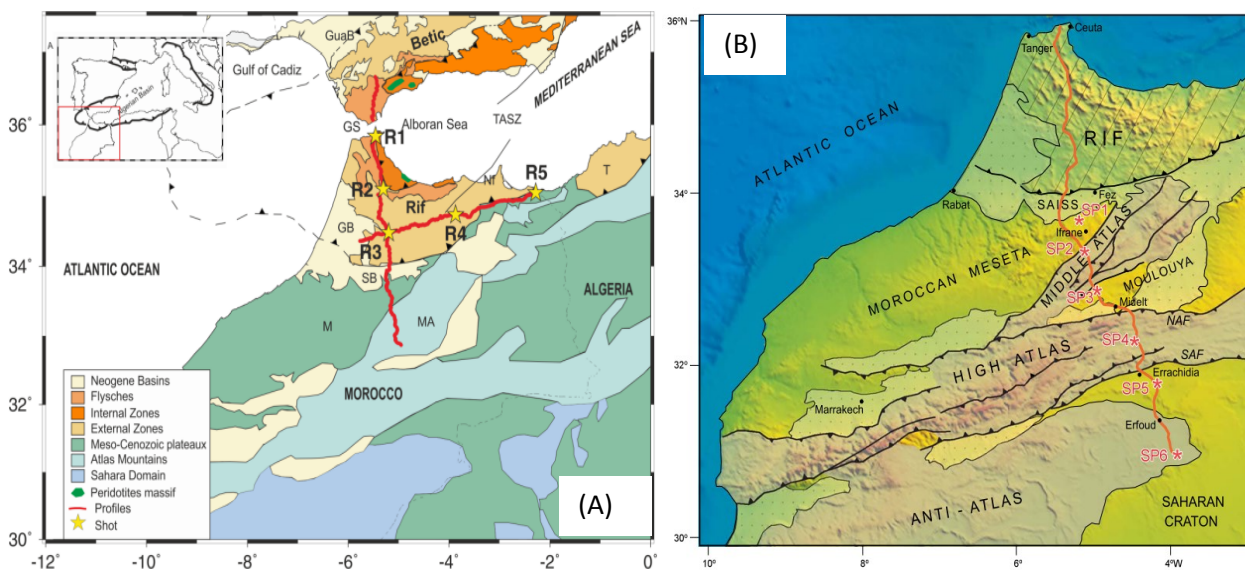
De nombreux articles ont essayé de traiter des problèmes de discrimination, en particulier dans certains cas, similaires à notre étude sur les séismes et explosions de faible magnitude [Kim et al., 1994; Dan Plafcan et al., 1997; Bettina et al., 2008; Dahy et al., 2009]. Ces travaux indiquent que l'une des méthodes les plus efficaces pour distinguer les événements artificiels à celle d'origine naturels en utilisant l'amplitude et la fréquence relatives. Afin d'examiner la distribution spectrale des séismes et des

explosions, une série d'événements, notamment des séismes et des explosions chimiques, a été sélectionnée pour évaluer les performances de notre étude (Tab 1.8).

Les données sélectionnées pour ce travail ont été collectées auprès des réseaux Picasso, Topo-Iberia et Array Marocain (voir chapitre 1). Tous ces réseaux avaient un type de sismomètre à large bande et à trois composants, équipé de sismomètres Nanometrics Trillium 120P / Streckeisen STS-2 / et de Guralp. Les événements étudiés dans ce travail ont une magnitude comprise entre 2,0 et 4,3, dont lesquels on a choisi des explosions réalisées pendant les projets de recherche RIFsis et SIMA :

-Les données d'explosion extraites de l'enquête RIFsis (2011) (Figure 1.16-A) sont acquises à partir de deux profils ; -Le premier profil 'Nord-Sud 430km', du Rif et du Moyen Atlas vers la chaîne bétique et le deuxième 'Est-Ouest 330km' du bassin du Gharb vers la frontière algérienne.

- L'expérience sismique SIMA (Figure 1.16-B) a été menée au Maroc en 2010. Avec six explosions, dont les emplacements ont été soigneusement sélectionnés sur la base d'enquêtes sur le terrain, entre Tanger et le sud de Merzouga dans le désert du Sahara.



**Figure 1. 16 (A) :** Carte de Géométrie et localisation des profils sismiques grand angle acquis par les expériences de réflexion sismique (projet RIFsis). **(B)** la Carte de l'expérience SIMA, dans cette expérience, le transect étudié a une longueur de 700 km, il part près de Merzouga, au nord du craton saharien, et se termine à la pointe de l'arc de Gibraltar.

Pour avoir une comparaison efficace on a choisi pour cette étude d'autres explosions artificielles dans les carrières de phosphate dans la région de YOUSOUFIA et BENGIRIR produits par l'Office chérifien des phosphates (OCP). La gamme de

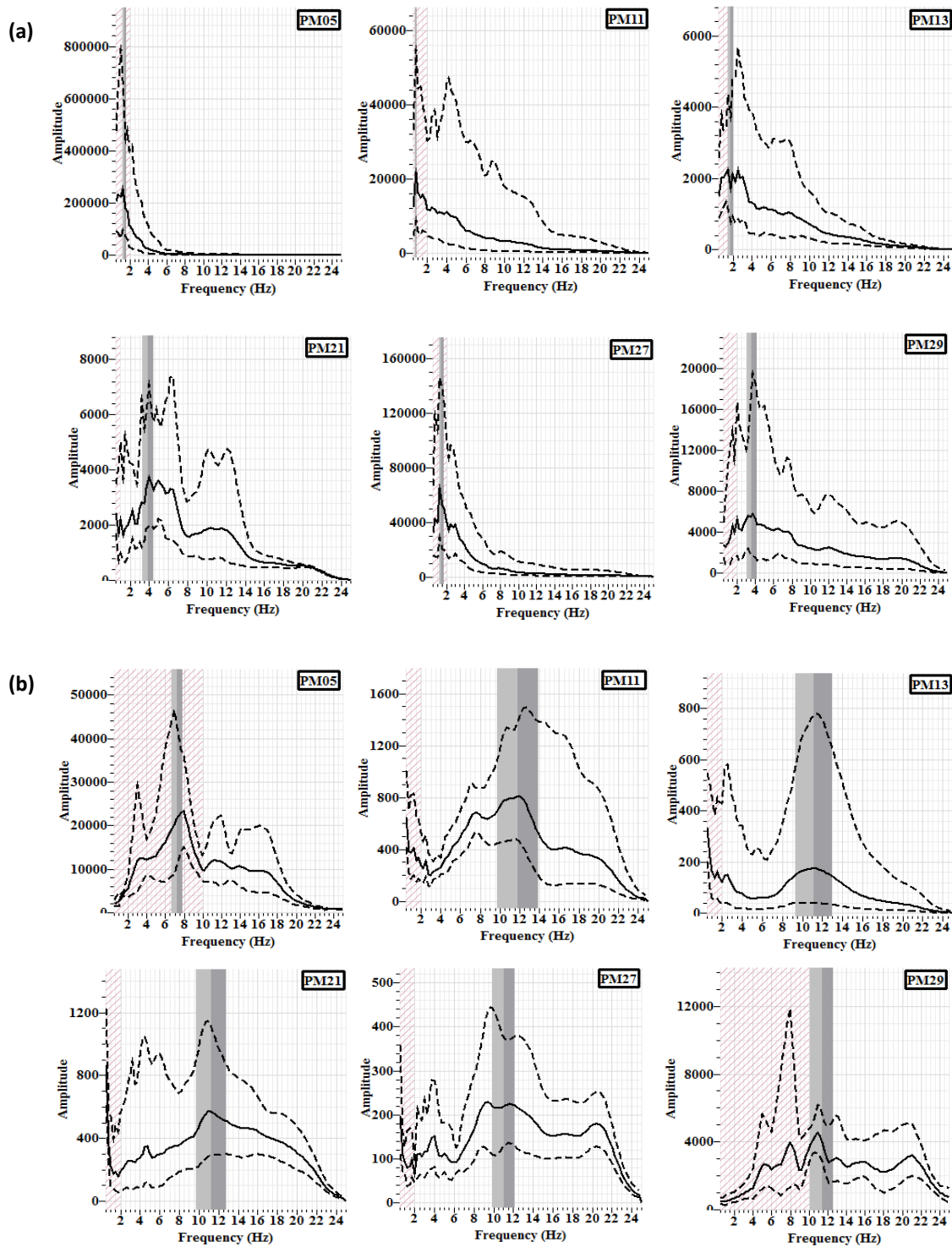
profondeur des explosions se situe entre 30 à 60 mètres tandis que pour les tremblements de terre est au-delà de 30 kilomètres. Les paramètres source de l'hypocentre des séismes et des explosions ont été déterminés par le programme HYP – en utilisant le logiciel SEISAN ; tandis que les paramètres hypo-centraux pour les explosions ont été repris du projet RIFsis et de l'expérience SIMA. Tous les événements sont enregistrés entre 2010 et 2012, entre la latitude de 30 à 36 et la longitude de -3 à -9.

**Tableau 1. 7 :** Liste des événements et les explosions sélectionnés pour cette étude et le calcul du moment magnitude et durée du signal avec les ML et Mc correspondants, la couleur rouge représente les explosions et le bleu représente les séismes.

date	shot/event	h:m:s	latitude	longitude	elevation (m)	depth (m)	Mw	ML	SD(s)	Mc
04/05/2010	SP1	16:00:03	33.6749	-5.19632	381.286	60	2.2	1.6	23	0.6
06/05/2010	SP3	16:59:59	32.8591	-4.96937	1525.246	30	2	1.3	34	1
07/05/2010	SP4	12:01:00	32.3023	-4.48881	1380.328	30	2.3	1.6	35	1
07/05/2010	SP5	17:00:00	31.7939	-4.21913	1029.69	30	2.3	1.6	24	0.6
08/05/2010	SP6	12:00:00	30.9917	-3.96114	713.899	30	3.1	1.8	31	0.9
11/10/2011	SR2	17:01:00	35.1038	-5.30115	496	30	2.6	1.7	40.5	1.2
12/10/2011	SR3	16:00:00	34.4859	-5.18985	276	30	2.6	1.9	31.4	0.9
13/10/2011	SR4	14:00:00	34.7388	-3.86574	1368	30	2.4	1.8	30.5	0.9
17/02/2012	SPY1	14:09:28	32.219	-8.386	390	< 100	2.4	0.9	34	1
28/02/2012	SPY2	15:13:00	32.221	-8.394	390	< 100	2.2	1.2	34	1
28/02/2012	SPB	15:04:00	32.319	-7.857	560	< 100	2.4	1	34	1
21/01/2010	EV1	16:57:07	34.7796	-5.7321	317	18000	4.3	3.4	166	2.9
19/02/2010	EV2	04:13:09	33.4289	-4.135	2232	0	2.9	2.5	101	2.3
05/08/2010	EV3	18:54:14	32.1684	-5.8418	2383	7000	4.3	4.2	212	3.3
01/03/2011	EV4	10:26:26	35.1284	-4.6936	123	76000	3.2	2.5	92.7	2.3
28/02/2012	EV5	06:26:30	32.3182	-6.9603	360	400	2.8	2.5	111.7	2.4
02/06/2010	EV6	16:35:42	34.7097	-3.8871	1157	3000	3.4	3	110.75	2.2
29/02/2012	EV7	04:11:52	32.1892	-4.8426	1631	0	2.9	2.7	115	2.5

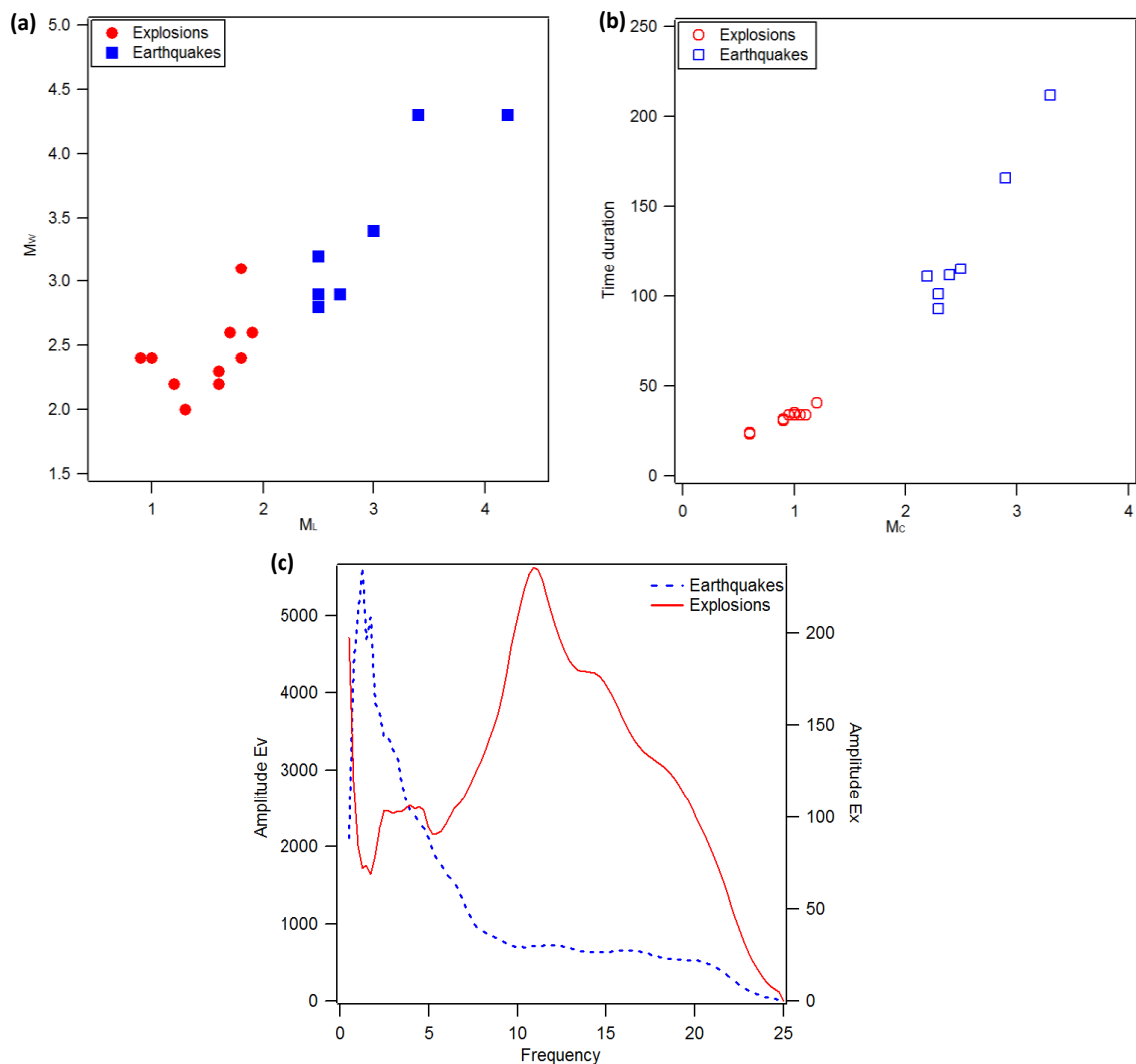
Les résultats de la répartition des spectres dans les différentes stations, illustrés à la Figure. 1.17, montrent la vue générale de la moyenne des spectrogrammes des explosions et des tremblements de terre obtenus dans chaque station, et démontrent la relation entre l'amplitude relative et fréquence détectée dans le réseau sismique marocain. Cette méthode spectrale est basé sur l'étude du rapport Amplitude-Fréquence en utilisant le logiciel Geopsy <http://www.geopsy.org/>, a été appliqué sur les explosions et les tremblements de terre détectés sur les stations sismiques existents dans la même structure géologique du Maroc, afin d'éviter les paramètres de site susceptibles d'affecter les résultats. Ce choix nous a donné d'excellents résultats et nous avons constaté que les fréquences de résonances des explosions induites sont beaucoup plus grandes que

les fréquences de résonances des tremblements de terre naturels, en particulier sur les sols durs. Le graphique de spectre de la figure 1.17 illustre et compare l'amplitude et la fréquence des explosions (a) et des séismes naturels (b) dans six stations différentes, PM05, PM11, PM13, PM21, PM27 et PM29.



**Figure 1. 17 :** (a) - Distribution amplitude-fréquence des séismes. Les lignes continues représentent les courbes moyennes, tandis que les lignes pointillées définissent les intervalles de déviation standard autour des courbes moyennes. (b) - Distribution amplitude-fréquence des explosions.

Pour améliorer notre étude de la discrimination, nous avons calculé le rapport entre la magnitude de moment  $M_W$  proposée par Hanks et Kanamori, (1979), et la magnitude locale  $M_L$  calculée en utilisant les amplitudes maximales sur les composantes Z. Cette méthode est basée sur un modèle physique de déformation d'événements sismiques qui permet de calculer la magnitude exacte dans les deux cas de grands signaux sismiques et aussi pour séismes de faible magnitude. En appliquant ce ratio dans notre cas pour les faibles et les moyens tremblements de terre et les faibles explosions, nous pouvons voir que la séparation entre eux est très claire et qu'il n'y a pas de confusion entre les deux populations (Figure 1.18 (a)); la discrimination est plus facile puisque le moment de magnitude  $M_W$  des tremblements de terre est supérieur à 2,8 N.m. Cependant, la magnitude locale des explosions est inférieure à celle des tremblements de terre.



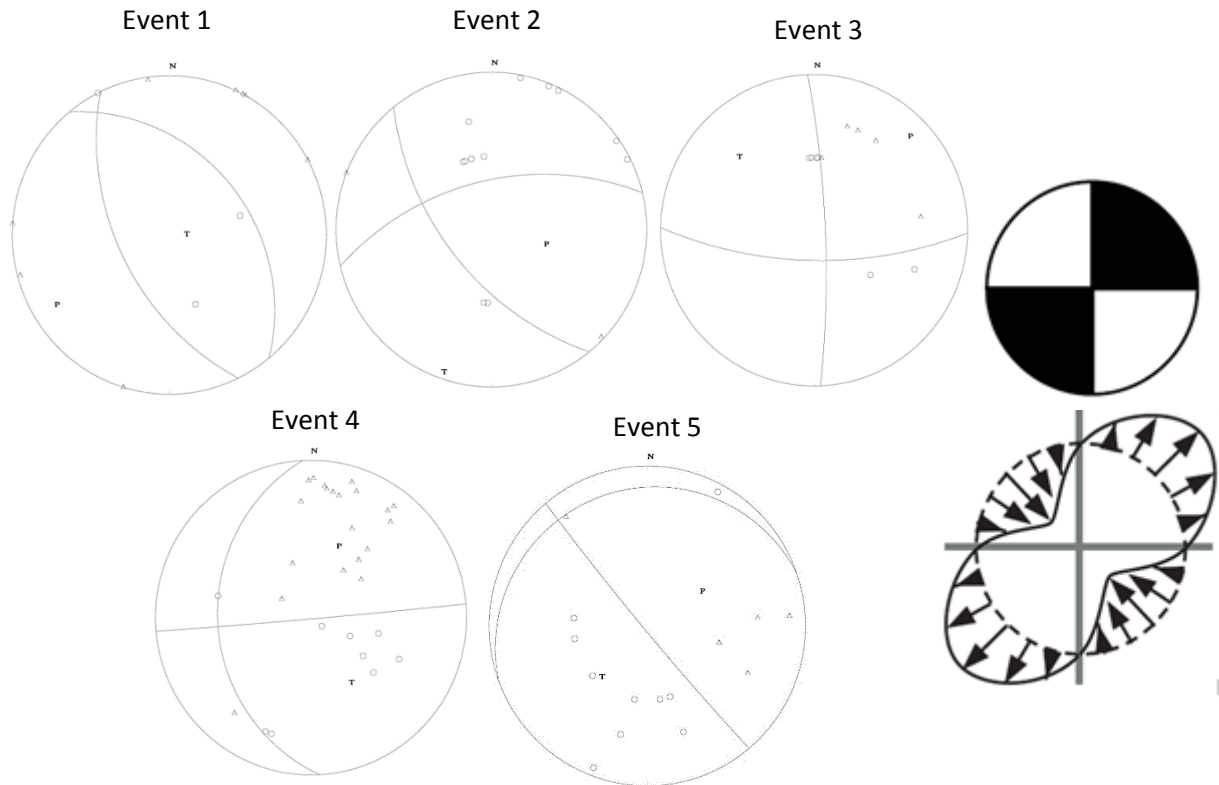
**Figure 1. 18 :** (a) - Ratios  $M_W / M_L$ , les explosions sont présentées par les cercles rouges et les séismes à carrés bleus, aux stations sismiques pour la totalité des événements étudiés. (b) - Relation entre la durée et la magnitude de la coda. (c) - Spectres moyens amplitude-fréquence de tous les événements étudiés dans ce travail.

Nous déduisons de la Figure 1.18 (b) que la corrélation entre la durée de signal et la coda magnitude constitue un facteur important pour la discrimination entre les séismes et les petites explosions, nous remarquons qu'il n'y a pas de confusions entre les deux populations. Ce discriminant fonctionne parce que la durée de signal dans le cas des tremblements de terre est nettement supérieure à celle des explosions pour les magnitudes faibles. La durée d'une explosion dépend de plusieurs facteurs, tels que le schéma de tir et la profondeur de l'explosion, ainsi que les caractéristiques géologiques de la croûte. Dans notre étude, les explosions se produisent à la surface de la Terre, c'est pourquoi la méthode utilisée est très pratique. Nous sommes également convaincus que le processus de rupture des séismes est généralement plus complexe que celui des explosions. La Figure 1.18 (b) montre que la durée relative des séismes est environ 2,5 fois plus longue que celle des explosions.

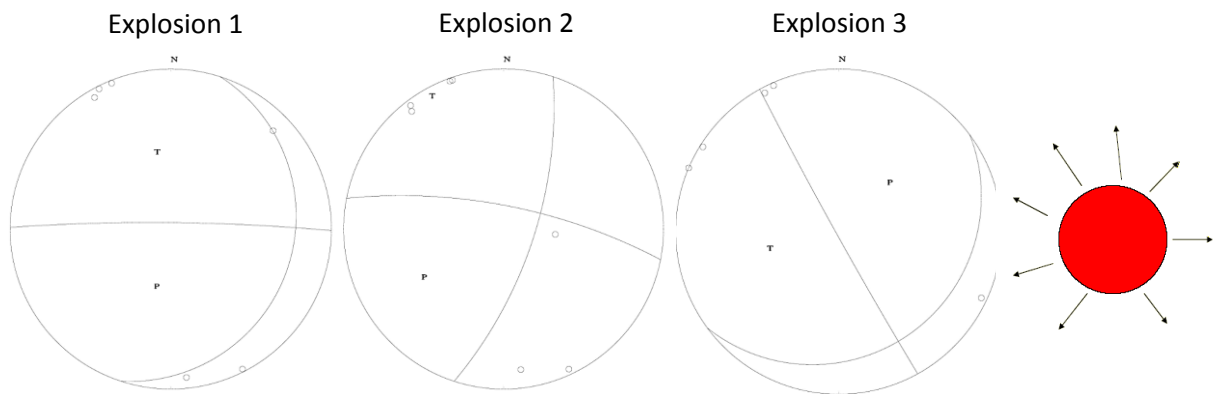
Les résultats de la distribution spectrale dans les différentes stations, qui sont représentés sur la figure 1.18(c), donnent une vision globale sur la moyenne des spectrogrammes des explosions artificielles et des tremblements de terre obtenus à partir de l'ensemble des signaux étudiés dans ce travail.

Ils attestent bien aussi la relation entre l'amplitude relative et la fréquence détectée dans le réseau sismique marocain. Comme le montre le graphique, Les maximums des amplitudes dans le domaine fréquentiel sont observés entre 9 et 12 Hz pour les explosions et entre 1 et 3 Hz pour les tremblements de terre.

Nous présentons dans les Figures 1.19 et 1.20 les solutions de polarisations et de plans de failles de séismes naturels et des explosions. Les mécanismes focaux des séismes naturels et des explosions induites sont différents. Puisque les séismes naturels ont deux types de polarisations, positive et négative, ce qui signifie compression et dilatation, causées par les failles sismiques. Cependant, les explosions induites n'ont que des polarisations positives, dues à la nature de la répartition des forces, provoquées uniquement par une compression ; la force se propage dans toutes les directions de l'intérieur vers l'extérieur.



**Figure 1. 19 :** Les résultats du mécanisme au foyer des Séismes de quelques séismes étudié dans ce travail, Les compressions sont indiquées par des cercles et les dilatations sont présentées par des triangles




**Figure 1. 20 :** Les Mécanismes au foyer des explosions étudiés et obtenus par la méthode d'inversion tenseur de moments. Les compressions sont indiquées par des cercles. Les plans nodaux présentés par les lignes continues sont juste estimés par le logiciel Seisan.

## 5. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons essayé de présenter quelques méthodes de discrimination des signaux sismiques et discuté des différents paramètres influant sur la performance et la distinction entre le signal d'un événement sismique et celui d'une explosion au Maroc. Par conséquent, nous avons essayé de vérifier la performance de ces méthodes de discriminations dans le cas d'un séisme et d'une explosion de faible magnitude. Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies entre 2007 et 2011 dans plus de 80 stations du réseau sismique Marocain, dans le cadre de différents projets (RIFSIS (octobre 2011), SIMA (mars 2010), Picasso, Topo-Iberia...). Ces stations sont distribuées sur la partie Nord du Maroc.

Le rapport fréquence-amplitude relatif utilisé pour la totalité des signaux enregistrés sur le réseau marocain montre que les explosions ont un rapport fréquence-amplitude relativement élevé par rapport aux tremblements de terre. Nous concluons que le meilleur filtre de bande de fréquence à appliquer pour les séismes est entre 1 et 3 Hz et entre 9 et 12 Hz pour les explosions.

Il convient de noter que, pour compléter notre étude de la discrimination, nous avons exploré l'effet de divers paramètres, tels l'inversion du Moment Tenseur ( $M_T$ ), le mécanisme au foyer, et nous avons essayé de classer ces signaux en fonction de la durée. Il ressort clairement des résultats de ce travail que des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les explosions régionales et des télé-séismes dans notre réseau, afin de fournir des informations précieuses sur la discrimination pour les études futures.

 **Chapitre 3** : Effet de site et calcul des facteurs d'amplification du sol sur le réseau sismique marocain.

## 1. Résumé détaillé du travail :

Les structures géologiques locales peuvent avoir un effet significatif sur le mouvement du sol sismique. Cet effet est appelé effet de site. Sur les sites caractérisés par la présence d'une couche sédimentaire épaisse et/ou d'une topographie élevée, le piégeage de l'énergie sismique peut provoquer une amplification des ondes sismiques qui augmentent l'effet du tremblement de terre (Mukhopadhyay et Bormann, 2004).

Plusieurs exemples de tremblements de terre destructeurs dans le monde entier (par exemple, Mexique 1985, Loma Prieta 1989, Le Caire 1992, Kobe 1995, Turquie 1999 et Algérie 2003) ont clairement montré que l'effet de site est un facteur important dans l'évaluation de danger sismique. Les dommages dans une certaine zone lors d'un tremblement de terre dépendent des caractéristiques de l'événement et de l'interaction entre la réponse du site et la vulnérabilité des structures (Cara et al., 2008). Du point de vue sismologique, l'effet de site est généralement représenté par la fréquence de résonance ( $f_0$ ) et l'amplification associée du mouvement du sol. Lorsque  $f_0$  du site coïncide avec la fréquence naturelle des structures, la résonance peut se produire et endommager les structures (Mukhopadhyay et Bormann, 2004).

Les enregistrements sismiques sont de plus en plus utilisés pour évaluer l'effet du site, en particulier dans les régions d'activité sismique modérée ou faible. Cette technique est très efficace aussi dans les études de microzonage sismiques et d'atténuation des risques. Cette efficacité est liée à la facilité d'utilisation du bruit sismique enregistré sur le réseau marocain ainsi que la possibilité d'avoir une large bande de fréquences ou en d'autres termes la possibilité d'étudier des structures plus profondes à moindre coût par rapport aux méthodes ou techniques de forages conventionnels très coûteuses et perturbantes (Wathelet, 2008).

Nakamura (1989) a proposé que le rapport entre la composante horizontale et la composante verticale dans le domaine fréquentiel soit une bonne estimation de l'effet de site dans la zone étudiée. Cette technique a d'abord été appliquée pour la première fois sur le bruit sismique dans les zones urbaines du Japon. Cette méthode a été largement diffusée ces dernières années à cause de la rapidité et d'économie dans son exécution.

Nakamura suppose que le rapport (H/V) ou le rapport spectral correspond à la fonction de transfert des niveaux de surface soumis à des mouvements horizontaux. Il se base sur l'hypothèse qu'un micro séisme ou un bruit sismique, est composé par des ondes de volumes et par les ondes de surface de Rayleigh, induites par des sources artificielles (trains, circulation, l'impact des vagues sur les rivages etc.). Les composantes horizontale et verticale des enregistrements sont considérées comme similaires dans la base rocheuse.

Ce travail est une application de la méthode H/V sur le réseau sismique marocain composé de 23 stations large bande déployées dans les différents domaines géologiques existe au Maroc. L'objectif est de caractériser l'épaisseur des formations sédimentaires superficielles sous la station afin de mettre en évidence la variation de l'épaisseur qui peut correspondre au milieu géologique. La zone d'étude couvre la partie Nord du Maroc, à savoir, la ceinture Rifian au Nord, le centre, les chaînes Atlantique, la Meseta et enfin l'Anti-Atlas. L'avantage de cette méthode revient au fait que le bruit sismique est nécessaire pour cette étude est disponible partout et en tout instant.

Cette étude s'inscrit dans le prolongement des travaux antérieurs d'[El Fellah et al. \(2014\)](#) [\(2016\)](#), pour détecter les problèmes opérationnels. Afin de caractériser les performances des stations hautes fréquences déployées sur le territoire marocain. Les résultats obtenus devraient être utile pour le prochain emplacement des stations sismiques des instituts de recherche sur le territoire marocain à l'avenir et optimiser la distribution des stations locales. Nous avons présenté un modèle 3D de distribution de la fréquence fondamentale, de l'épaisseur et de l'amplitude pour les réseaux sismiques permanents et temporaires au Maroc.

Les facteurs d'amplification du sol calculés à partir des courbes H / V sont obtenus en effectuant les cinq étapes suivantes :

1. Découpage des signaux des trois composants dans des fenêtres temporelles de 25 secondes. Un algorithme de déclenchement est utilisé pour éliminer les fenêtres contenant des signaux transitoires ou des séismes.

2. Calcul et lissage des spectres de Fourier des trois composantes de chaque fenêtre. La technique utilisée ici pour le lissage est celle proposée par Konno et Ohmachi (1998).
3. Calcul de la moyenne "H" des 2 composantes horizontales - pour chaque fenêtre sélectionnée.
4. Calcul du rapport H/V pour chaque fenêtre.
5. Calcul la moyenne et de l'écart-type des rapports H/V sur toutes les fenêtres sélectionnées

Afin d'illustrer les paramètres d'amplification du sol à l'emplacement des stations sismiques, les résultats obtenus dans cette étude représentent la répartition de ces facteurs sur les différentes zones géologiques. Les valeurs de la fréquence fondamentale du site ( $f_0$ ) varient principalement en fonction de la nature géologique ; on peut distinguer trois types de courbes, selon leur forme, et selon les zones géologiques existe au Maroc :

Type 1 : Courbes caractérisés par des pics larges avec une fréquence fondamentale  $f_0$  élevée située entre 8,5 Hz et 12 Hz dans la zone Anti Atlas. Ces typologies peuvent être attribuées à des couches minces de faible épaisseur où le substrat volcanique se situe à une profondeur comprise entre 2 et 3 mètres. Cette épaisseur augmente au milieu des hauts atlas et diminue vers le sud, où on a trouvé des points plus profonds, aller jusqu'aux 161m. Si nous continuons vers le sud de l'Anti-Atlas, la transition vers les faibles épaisseurs apparaît clairement avec des fréquences fondamentales assez importantes, qui dépassent 12Hz.

Type 2 : Dans la zone du moyen l'Atlas, la Thickness présente moins de variation. Elle varie entre 5 et 6 mètres. Pour le domaine du Meseta, l'épaisseur calculée varie entre 20 et 100 m (tableau 1.9), le plus profond point détecté est à la station AVE (145m de profondeur). Bien que l'emplacement de la station ne couvre pas toute la zone et il faut prendre en considération la variation de l'altitude. Pour avoir une meilleure résolution, il est nécessaire d'avoir un réseau sismique très dense dans chaque zone.

-Type 3: Ce type caractérise la zone du Rif. Nous avons obtenu deux types de courbes dans cette zone : -le premier montre deux maximums d'amplitude similaire avec de

basses fréquences fondamentales comprises entre 1,5 Hz et 2,5 Hz, ce qui montre que l'épaisseur de la couche externe est importante . Pour la partie Nord, ces fréquence fondamentale augmente à 6Hz. –le deuxième type pour la partie ouest du Rif, où nous avons trouvé des fréquences fondamentales entre 6Hz et 8Hz, avec des faibles épaisseurs de 5 à 6 mètres.

## **2. Soil amplification factors at the seismographic network stations sites in morocco from seismic ambient noise**

### **2.1 Abstract:**

Knowledge of the soil response to seismic activity allows to better incorporate the constraints of seismic risk reduction. The experimental methods employed to determine site effects seek to obtain seismic amplification parameters by means of measuring earthquakes or seismic background noise. In this work, we present the main set of results of the microtremor data analysis based on the horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio technique at broadband seismic stations in order to get the fundamental site frequency ( $f_0$ ) and its associated amplitude of ground motion ( $A_0$ ). These stations were deployed in different structural domains: Rif, Middle, High and Anti Atlas Mountains. This study was carried out using the Nakamura technique, based on the measurements of background noise at each measurement site. Nakamura's method makes it possible to evaluate the effect of the superficial layers on the seismic signal. The  $f_0$  (H/V) values were used in the calculation of bedrock depth at measured sites. The thickness of unconsolidated sediments at the investigated sites was determined. The parameters obtained in this work allowed us to highlight a set of distribution figures of the fundamental frequency ( $f_0$ ), amplification ( $A_0$ ) (H/V) and soft sediment thickness throughout the location of study and to show the agreement with the geological setting.

### **Keywords:**

H/V spectral ratio, amplification factor, frequency wavenumber, Thickness of sediments

## 2.2 Introduction:

The work presented here is the H/V method, which is a passive method that uses three-component measurements of ambient seismic noise (e.g., microtremors induced by wind, ocean waves, anthropogenic activity, etc.). In opposition to active shallow seismic techniques (e.g., reflection, refraction or multi-channel surface-wave), which use an artificial seismic source such as hammer blow, weight drop or an explosive charge to obtain a seismic response from the subsurface,

In order to obtain the distribution of fundamental frequency and lower limit of amplification factors in the uppermost 30 m layer in the site of interest, microtremor surveys may be the best choice for this purpose. In the current research, the H/V ratio technique, which was proposed by Nakamura (1989), is applied to estimate the site response from microtremor records at the study sites. Nakamura hypothesized that the vertical component of ambient seismic noise is relatively uninfluenced by the sediments, and can, therefore, be used to remove the source effects from the horizontal components. In other words, the H/V ratio is the ratio between the Fourier spectra of the horizontal and vertical components of seismic noise.

$$H / V (\omega) = \left\{ \left[ S^2 (\omega)_{NS} + S^2 (\omega)_{EW} \right] / 2S^2 (\omega)_V \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Where the terms  $[S(\omega)_{NS}$  and  $S(\omega)_{EW}]$  and  $[S(\omega)_V]$  are the ratios of the horizontal and vertical spectra of the ambient seismic noise respectively and  $\omega$  is the angular frequency.

The H/V ratio is an adequate estimation of the site response to S waves, providing reliable estimates about resonant frequencies, this suggestion of Nakamura is confirmed by several authors such as Duval et al. (1994), Lachet et al. (1996), they conclude that these ratios are much more stable than the raw noise spectra. In the present research, the recorded background noise was used to distinguish the subsurface sediment amplification in investigated areas. The main target of this study is to exhibit the subsurface characteristics of soil layers. The spectral ratio analysis of the horizontal and vertical components of the ambient seismic noise determines the resonance frequency. The H/V method has been used to estimate unconsolidated sediment thickness, map the bedrock surface, and infer fault locations (e.g., Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999;

Delgado et al, 2000; Parolai et al, 2002), and a method to predict site response to earthquake seismicity by micro-zoning studies (e.g. Nakamura,1989; Rial et al, 1992; Konno and Ohmachi, 1998). The seismic resonance frequency,  $f_m$ , of the  $n$  mode that is related to sediment thickness  $Z$  can be determined from the relation:

$$f_m = (2n + 1)(V_s / 4Z) \quad (2)$$

Where  $V_s$  is the average shear-wave velocity in meters per second (m/s) of the sediment layer overlying bedrock,  $Z$  is given in meters, and  $f_m$  is given in hertz (Hz) (Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999). The fundamental resonance frequency,  $f_{r0}$ , is given when  $n = 0$  and higher-order modes of the resonance frequency are given by  $n \geq 1$ . The relation between sediment thickness,  $Z$ , and resonance frequency can be given by:

$$Z = a f_{r0} b \quad (3)$$

The coefficients  $a$  and  $b$  are determined from non-linear regression of  $f_{r0}$  data acquired at sites where  $Z$  is known (e.g., adjacent to boreholes), and among the advantages of equation (3) is that explicit measurement of  $V_s$  is not required. Ibs-von Seht and Wohlenberg (1999) and Parolai et al (2002) have published equations linking sediment thickness to resonance frequency as a function of correlation with drilling in Germany. Ibs-von Seht et al. (1999) found that the values of fitting parameters  $a$  and  $b$  equal to 96 and -1.388 respectively while Parolai et al (2002) estimated the values of  $a$  and  $b$  equal to 108 and -1.551 respectively.

Abd el-aal (2017) developed A MATLAB Program to perform a nonlinear regression fit of equation (3) with 95% confidence bounds and the following parameters obtained for many sites in Egypt. Where  $a$  and  $b$  are equal to 90 and -1.45.

In order to characterize the performance of the broadband stations deployed on Moroccan territory, this study is an extension of previous work of El Fellah et al. (2014) (2016), to detect operational problems. The study bellow should be useful for the next location of seismic stations of scientific institutes in the Moroccan territory in the future and optimize the distribution of local stations. We presented a 3D model of distribution of Thickness and frequencies fundamentals for permanent and temporary seismic networks in Morocco.

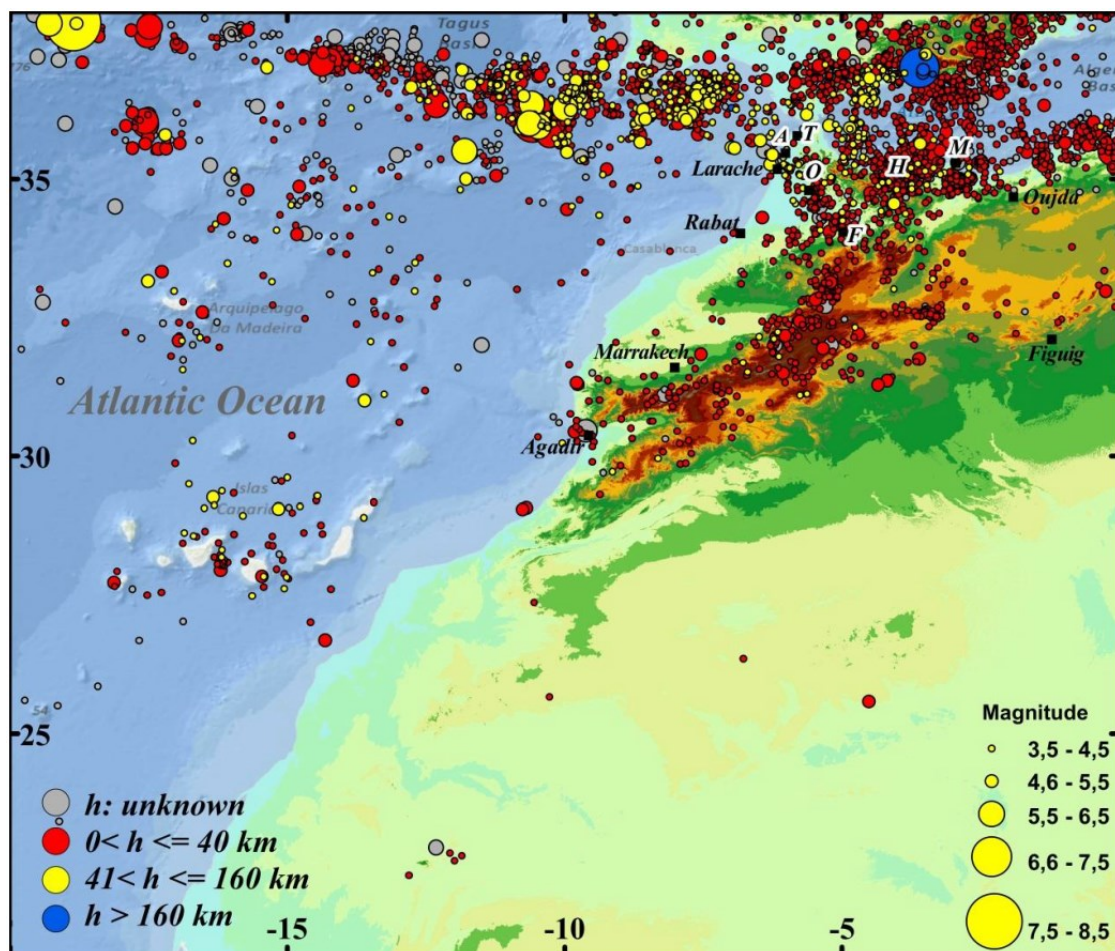
The seismic action used for the dimensioning of the structures depends on the seismotectonic context of the site of implantation of the structure, which makes it possible to define the regional hazard, but also of the geotechnical context, which makes it possible to define the local hazard. If the regional hazard is defined by the legislator, or by specific studies in the case of special risk structures, the local hazard, in turn, depends on the local characterization of the dynamic behavior of the sites that can induce significant modifications of the site seismic action.

Traditional geotechnical tests provide information on lithology and soil resistance to the right of soundings but do not allow characterizing their seismic behavior at the site scale. Geophysical measurements provide access to the dynamic behavior of soils at particular points (Cross Hole) or along with specific profiles (SASW). With these methods, the generalization and multiplication of point or profile information are necessary to develop seismic micro-zoning. This implies the implementation of important means.

Methods based on background noise recordings and H / V treatment make it possible to characterize the resonance frequency of the subsoil surface layers and provide information characteristic of their behavior with respect to seismic movements. Depending on the available tests, the frequency gives access either to the thickness of the surface layers or to the speed of the shear waves (Vs). The major advantage of this technique is that it is economical in terms of both means and time, which allows its rapid deployment over large areas, on which meshes adapted to map the frequencies of a site, can be realized. In addition to the spot tests, the frequency mapping makes it possible to judge the homogeneity of the seismic behavior of a site and to deduce a mapping of the thicknesses or speeds of the shear waves.

This paper presents a case of application of the H / V method at 23 seismic broadband stations deployed in three heterogeneous domain of Morocco. The objective is to characterize the thickness of the superficial sedimentary formations over Moroccan country in order to highlight variations of these thicknesses that may correspond to the different geological structures.

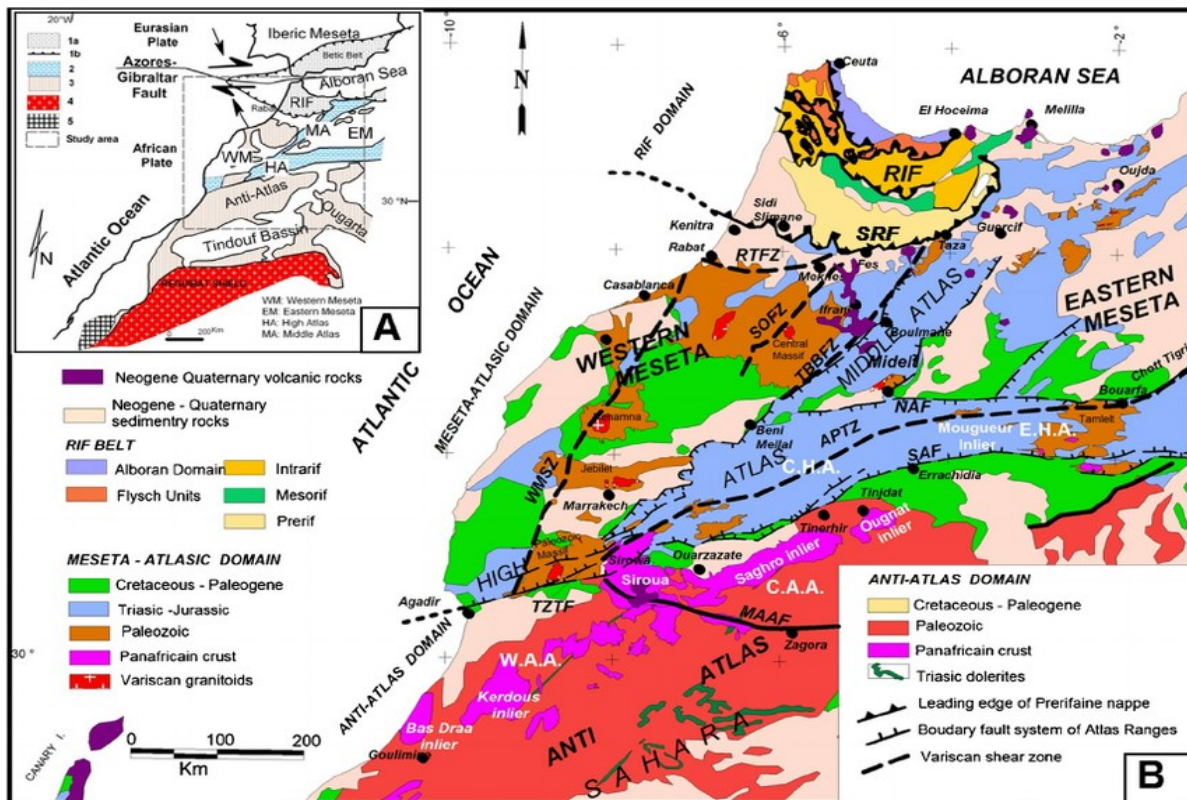
We follow the variations of the thickness from North to South of Morocco. The study area covers practically the north of Morocco, namely the Rifian belt, central Morocco, the Atlantic and Meseta chains and finally the Anti-Atlas in the South. this study area is characterized by a seismotectonic complexity, despite the fact that Morocco has a moderate seismic activity since it is located at the extreme north-west of Africa (Figure 1.21), where the African plate collides with the European plate and the reconciliation rate is about 0.5 cm/year on average in the Strait of Gibraltar, we collected data for four years (2011-2014), from our network contains 23 permanent and temporary stations



*Figure 1. 21 : Seismicity map of Morocco for the period between 1901 and 2010 (Cherkaoui et al, 2012)*

### 2.3 Geological setting :

The examination of the structural map of NW Africa allows locating Morocco with four large regions, which are in fact also structural domains (Figure 1.22) (D. Khattach et al 2013).



**Figure 1. 22 :** (A) Tectonic units in Morocco (left); (B) The main geological formations in the study area (right). D. Khattach et al 2013

Rif: It is a recent assembly line, formed with the Tertiary sector. She belongs to the alpine chains, which result, from the Africa-Eurasia collision and more precisely with the chain rifo-tellienne from North Africa. This chain consists of immigrant units carted on the margin of the Africa plate.

Atlases: the Middle Atlas and High Atlas, are part of the Atlantic chain, formed in the Tertiary, these intra-continental chains are located in the African continent extends to Tunisia and constitutes the deformed tectonic foreland of the chain rifo-tellienne. The méso-Cenozoic sediments, autochthon, are faulted and folded.

Meseta: regions of plains, plates, hills. Tabular méso-Cenozoic grounds constitute the cover of a Paleozoic base folded, metamorphized and granitized during the formation of the Hercynian chain. This Hercynian base appears in “buttonholes”. We distinguish Western Meseta and Eastern Meseta separated by the Middle Atlas.

Southern Morocco: This is the Saharan domain whose limit corresponds to the South Atlas fault. We distinguish the Anti-Atlas mountainous region south of Haut Atlas

resulting from a recent extensive anticlinal folding and, beyond, the Sahara proper, a region of vast plains and desert plateaus. This domain is characterized by a Precambrian basement (Archean and Proterozoic) deformed by orogenesis eburnian and pan-African and covered by a Paleozoic cover weakly deformed during the Hercynian Orogeny. Mesocenozoic cover, little thick, is tabular (hamadas).

All these areas are characterized by the presence of mountain ranges, the recent chains of the Alpine cycle and the old, eroded, Hercynian and Precambrian cycles. (Christians Hoepffner 2010).

## 2.4 Data and method :

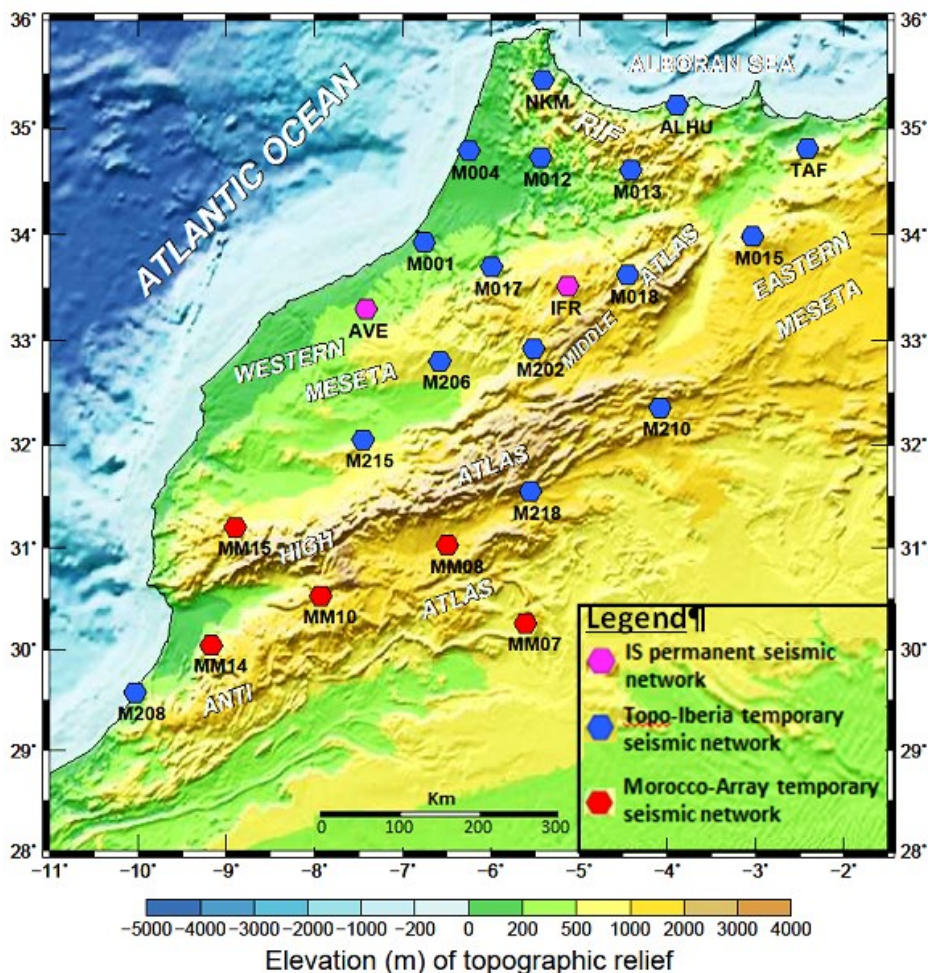
Nakamura (1989) introduced a method based on the calculation of H / V spectral ratios between horizontal and vertical components at the studied site. Although the theory behind this technique is still debated, Lachet and Bard (1994) and Dravinski et al. (1996) have shown that it allows us to determine the fundamental resonant frequency, related to a resonance 1D, 2D or 3D. On the other hand, they have also demonstrated that the amplitude of the H / V peaks does not correspond to the amplification determined by the technique of the site/reference spectral ratios. Several explanations have been proposed to understand, in the case of 1D resonances, the correspondence between the peak frequency of the H / V curve ( $f_{HV}$ ) and the fundamental frequency ( $f_0$ ). Bonnefoy-Claudet (2004) and Bonnefoy-Claudet et al. (2006a) showed that depending on the speed contrast between bedrock and sediment fill and depending on the position of the noise sources (in the bedrock or in the sediments, far or near).

The H/V peak can be explained by the S-wave resonance, the ellipticity of the Rayleigh fundamental mode, and/or the Airy phase of the fundamental mode of Love. Moreover, in the case of 2D resonances, the peaks of the H/V curves calculated individually on the axial and perpendicular components to the valley correspond to the resonant frequencies of the modes SH0 and SV0 respectively. Steimen et al. (2003) found, however, that in order to detect 2D resonances, the site/reference spectral ratio technique was more efficient than the H / V method. In this paper, we calculate H / V ratios using Sesarray's Geopsy software (Wathelet et al., 2008, [www.geopsy.org](http://www.geopsy.org))

**Tableau 1. 8** : Table1: network stations (ALHU, AVE, IFR, NKM, TAF, M004 and M001, ALHU, AVE, IFR, NKM, TAF, M004, M001, M215, M218, MM07, MM08, MM10, MM14, MM15 and M012) distributed in the all Morrocan area. (the Rif with green color) (Atlas and Meseta with blue color) (Anti Atlas with black color)

Stations	Sensor type	Digitizer type	Communication	Lat(°)	Long(°)	Altitude (meter)	F <sub>0</sub> HV (Hz)	A <sub>0</sub> Amplitude HV	Our Thickness 2017	Thickness A Ibs- von 1996	Thickness B Parolai 2002
ALHU	Trillium 120	Taurus	Flash disk	35.213	-3.890	63.0	7.8681	4.5602	4.521	5.480	4.405
M001	Trillium 120	Taurus	Flash disk	33.929	-6.756	192.0	6.6716	5.3393	5.7426	6.890	5.689
NKM	Trillium 120	Taurus	Flash disk	35.447	-5.410	423.0	1.3611	1.7585	57.5575	62.579	66.952
M004	Trillium 120	Taurus	Flash disk	34.791	-6.249	119.0	6.5199	1.6685	5.9374	7.114	5.896
TAF	Trillium 120	Taurus	Flash disk	34.810	-2.411	854.0	2.2179	1.2265	28.3548	31.776	31.396
M012	Trillium 120	Taurus	Flash disk	34.730	-5.434	227.0	6.4718	2.3644	6.0014	7.187	5.964
M013	Trillium 120	Taurus	Flash disk	34.610	-4.414	537.0	1.7207	2.2813	40.9704	45.197	46.542
AVE	STS-2	Quanterra Q330	Satellite	33.298	-7.413	230.0	0.7173	2.8488	145.7056	152.250	180.814
IFR	STS-2	Quanterra Q330	Internet	33.516	-5.127	1630.0	6.7223	2.6031	5.6799	6.818	5.623
M015	Trillium 120	Taurus	Flash disk	33.984	-3.035	1079.0	5.9683	3.7062	6.7493	8.042	6.762
M017	Trillium 120	Taurus	Flash disk	33.698	-5.990	657.0	0.9617	1.5778	95.2434	101.347	114.744
M018	Trillium 120	Taurus	Flash disk	33.622	-4.448	1090.0	5.9920	3.1153	6.7106	7.998	6.721
M202	Trillium 120	Taurus	Flash disk	32.922	-5.513	1443.5	2.9833	3.3649	18.4473	21.057	19.823
M206	Trillium 120	Taurus	Flash disk	32.801	-6.578	748.9	2.9481	4.6330	18.7675	21.407	20.191
M215	Trillium 120	Taurus	Flash disk	32.046	-7.449	518.8	1.4618	1.9750	51.8985	56.677	59.935
M208	Trillium 120	Taurus	Flash disk	29.578	-10.032	114.5	11.4685	2.9052	2.6179	3.248	2.455
M210	Trillium 120	Taurus	Flash disk	32.354	-4.082	1432.7	9.0595	2.0333	3.685	4.506	3.540
M218	Trillium 120	Taurus	Flash disk	31.547	-5.551	1403.0	0.6607	1.8489	164.1483	170.650	205.398
MM07	Trillium 120	Taurus	Flash disk	30.258	-5.608	731.0	12.6676	1.4736	2.2664	2.830	2.104
MM08	Trillium 120	Taurus	Flash disk	31.025	-6.492	1278.0	2.4985	2.7212	23.8565	26.933	26.099
MM10	Trillium 120	Taurus	Flash disk	30.529	-7.928	1058.0	12.2657	3.0238	2.3749	2.959	2.212
MM14	Trillium 120	Taurus	Flash disk	30.042	-9.169	774.0	8.5221	1.5219	4.0267	4.905	3.892

In this work, we calculate soil amplification factors at 23 seismic broadband stations deployed in three heterogenous domains of Morocco (Table 1.9). The largest amount of the data was provided by the temporary Topo-Iberia and Morocco array experiment (19 stations, blue and red polygons) (Figure 1.23), type Nanometrics Trillium 120P and Taurus dataloggers. Which continuously records data sampled at a rate of 100 samples/sec. additionally, we analyze data from two permanent stations from the seismic network of a scientific institute, type and Quanterra Q330 dataloggers, which also saves data continuously at the same rate. We calculate the Thickness from the resonance frequency obtained in the H/V method giving by  $Z = a.f_0 b$  with three methods: Ibs-von Seht and Wohlenberg (1999), Parolai et al (2002), and [9] Abd el-aal (2017).



**Figure 1. 23 :** Distribution of 23 temporary and permanent broadband stations in Moroccan country; the colour scale displays relative hypsometry. Two permanent stations of the Scientific Institute were installed in the Averroes and Ifrane observatories (pink). Sixteen ICJTA temporary stations were located in different regions within the project Topo-Iberia and cover the north and centre of the country (red). The IFG installed the other five stations in the south as part of Morocco Array project (blue).

The H / V curves are calculated in five steps:

- 1). Cutting the signals of each of the three components into time windows. The length of these signals is generally adapted to each frequency. In addition, a triggering algorithm can be used to not consider windows containing transient signals.
- 2). Calculation and smoothing of the Fourier spectra of the three components of each of the windows. The technique used here for smoothing is that proposed by [Konno and Ohmachi \(1998\)](#).
- 3). Calculation of the quadratic mean of the horizontal components for each window.
- 4). Calculation of the H / V ratio for each of the windows.
- 5). Calculation of the mean and the standard deviation of the H / V curve.

The interpretation of the H / V peaks in terms of fundamental resonance is based on the reliability criteria of the H / V curve and peak clarity. These two criteria were defined during the SESAME project ([SESAME-project, 2004a](#)), with the aim of helping to make a decision on the reliability of the results of the method.

The data is based on the number of wave cycles for each frequency in each of the time windows, the total number of cycles at this frequency and the standard deviation of the H/V peak amplitude. The criterion of clarity aims to verify that the frequency of the H/V peak can be interpreted as the fundamental frequency. It is also based on the amplitude of the peak, its width as well as the standard deviations of its frequency and amplitude.

## **2.5 Results and Discussion:**

The near-surface layers due to the site effect distinguish two categories of soil amplification:

-The first is related to the shape of the local topography, for the sites located on the ridges of mountains or hills, the seismic waves are focused because of the characteristics of convexity.

-The second is the site effect associated with the displacement of seismic waves in the soft material underlying the rock. This category of site effect occurs in valleys recently filled with sediments.

In order to illustrate the phenomenon of amplification, we present in the following figures (Figure. 1.24, Figure 1.25, and Figure 1.26) the distribution of the amplification factors on the various geological zones of Morocco. The values of the fundamental frequency of the site ( $f_0$ ) vary mainly according to the geological composition; we can distinguish three types of curves according to their form, which clearly identifies three different zones:

-Type 1: broad peaks with a high fundamental frequency  $f_0$  varies between 8.5Hz and 12Hz in the Anti Atlas zone. These typologies can be attributed to thin layers with low thickness and volcanic substratum lies at a depth between 2 and 3 meters.

The thickness of the crust increases in the middle of the high atlases and decreases towards the south and towards the Anti Atlas, where we find the deepest point at 161m obtained on the station M218 and 23m on the station MM08. If we continue towards the South of the Anti-Atlas, the transition towards the low thicknesses appears clearly on the two stations MM10 and MM07 with rather important fundamental frequencies, which exceed 12Hz.

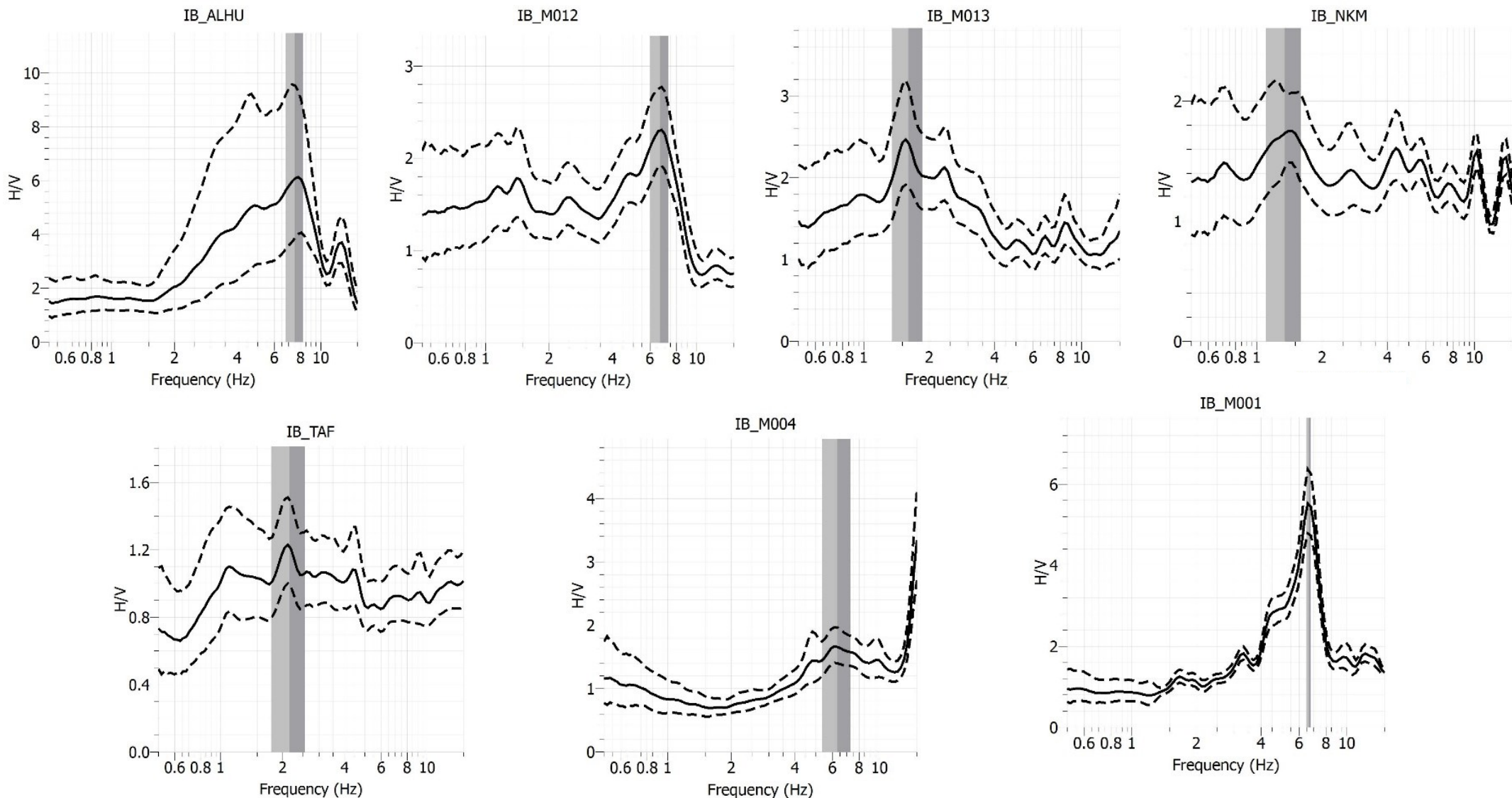
-Type 2: In the middle area of the Atlas, the crustal thickness shows less variation, varies between 5 and 6m and lower than that of the Meseta domain where the thicknesses are higher between 20 and 100m (Table 1.9) and the deepest is detecting at the AVE station (145m deep). Although the location of the station does not cover the whole area and the highest altitudes, several stations are located in the middle and others towards the East and West extremities (IFR stations, M018, M017, and M202) near the main channel. The results of this study are consistent with the hypothesis of lack of crustal root under the Atlas chain (Teixell et al., 2005; Zeyen et al., 2005; Missenard et al., 2006).

In order to ensure the conclusions, we need other measurement stations in this area since there are several gaps in the location of the stations (for example, in East South East IFR and M018 stations) should do not exceed 100 km and coincide with the areas where the surrounding stations give a relatively consistent picture. Therefore, future studies will

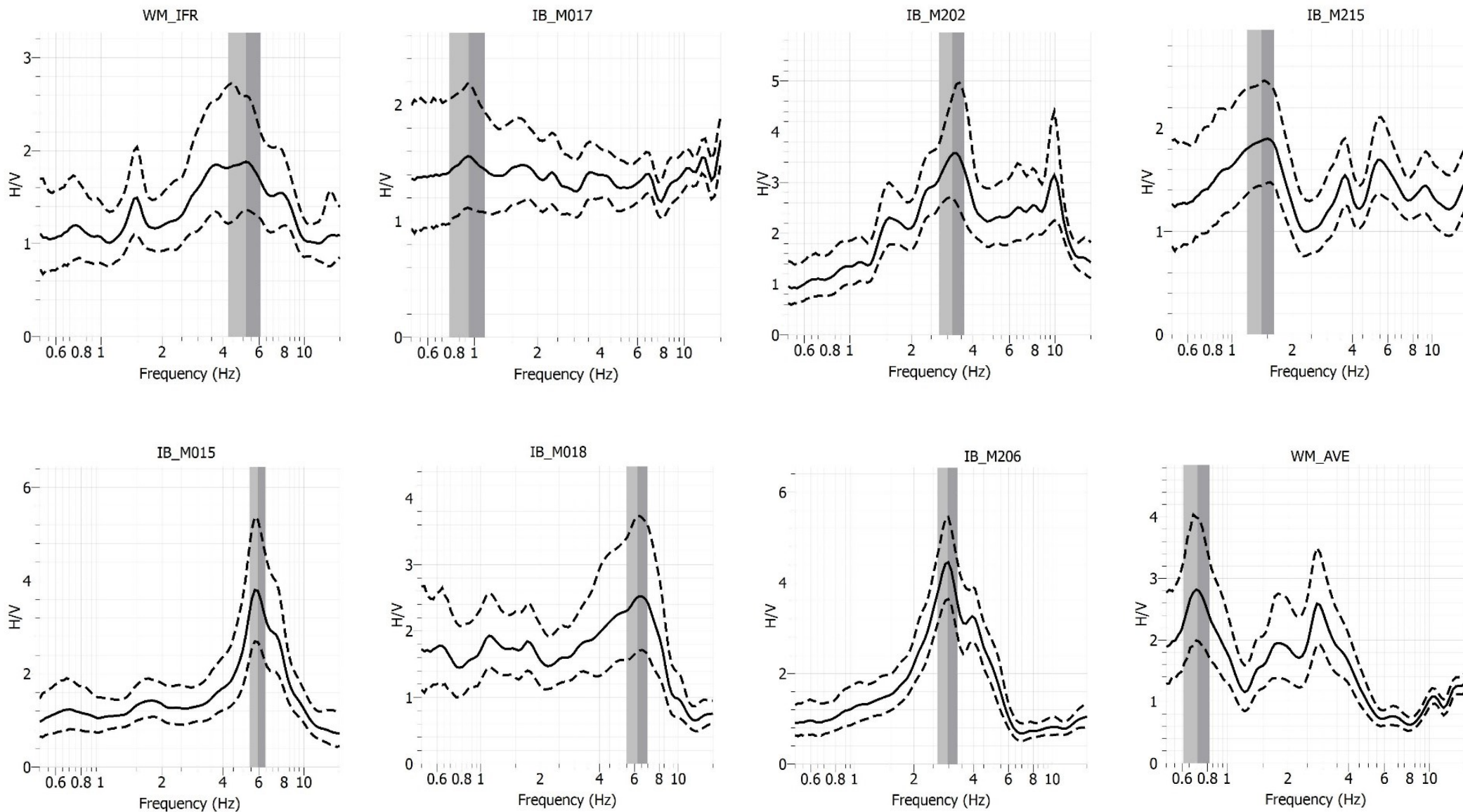
have to test the hypothesis of lateral homogeneity emerging from these results. Meanwhile, the crustal thickness measurements reported in this study indicate the presence of three fundamentally different domains reflecting different geodynamic developments.

-Type 3: For this type that characterizes the Rif area we propose two alternative interpretations: if we look to the three stations (NKM, M013, and TAF) in the area of the Rif belt (Figures 1.24). The signals show two pulses of similar amplitude M013 and NKM with low fundamental frequencies between 1,5Hz and 2,5Hz. These pulses have a certain change if one goes up to the north on the ALHU station and the fundamental frequency increase to 6Hz. For the western part of the Rif we find the stations M012 and M004, with fundamental frequency varies between 6Hz and 8Hz and low thickness 5 to 6 meters, this latter increases if you go up to the extremities (NKM) to attend 57 meters.

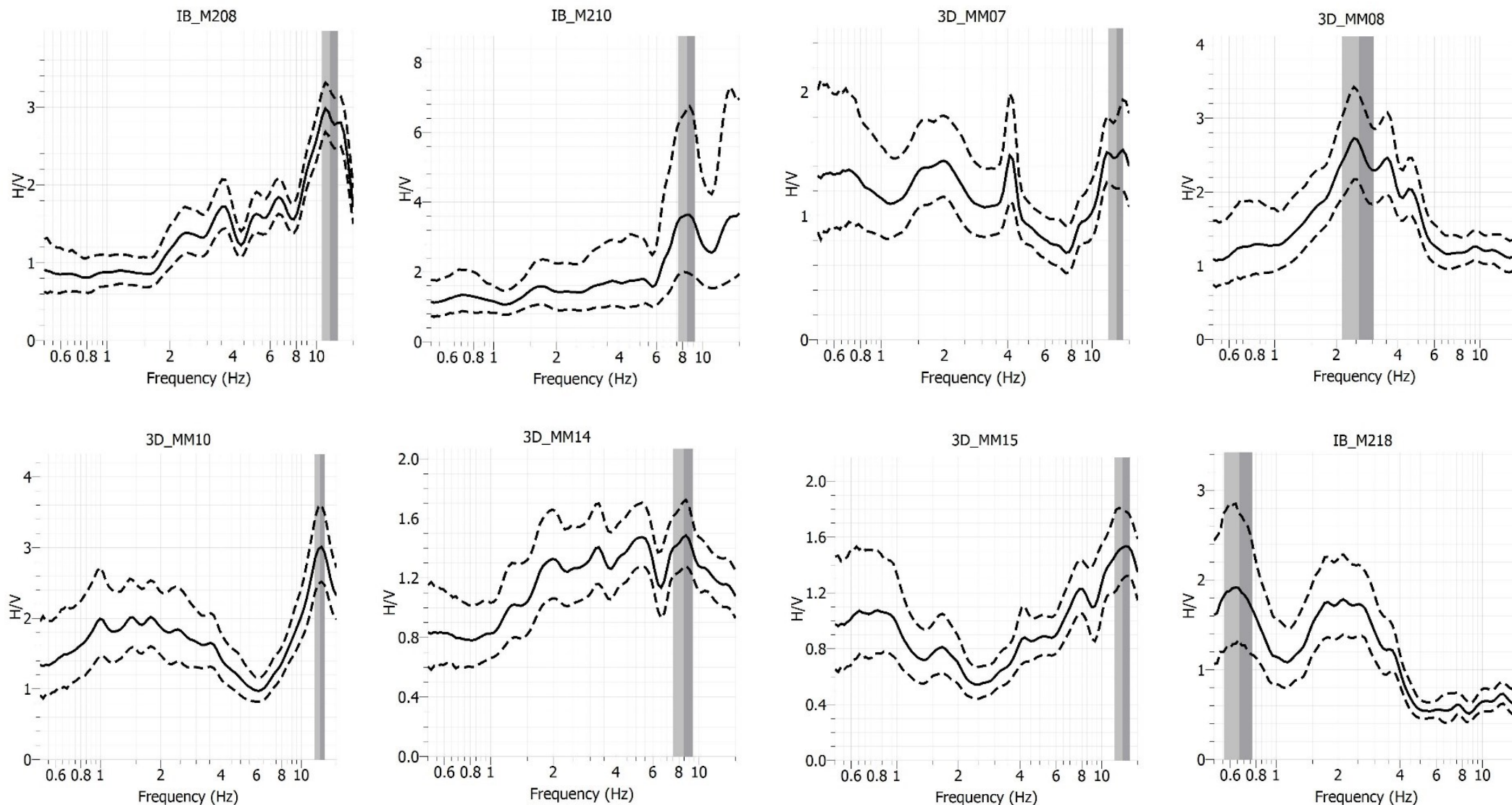
The M012 and M013 stations are placed in an area that coincides with a range of abnormal GPS speeds within the Rif (Fadil et al., 2006; Tahayt et al., 2008). This can be modeled by a small plot of basal traction in this area (Perouse et al., 2010) supposed to represent delamination and backtracking of the lithospheric mantle (eg, Seber et al., 1996; Faccenna et al., 2004). We associate this impulse with such a subcrustal structure. A detailed interpretation of this presumed mantle conversion is beyond the scope of this article and the methodology.



**Figure 1. 24 :** *H/V spectral ratios for the sites network stations of the Rif (ALHU, M012, M013, NKM, TAF, M004 and M001) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The coloured curves represent the number of the time windows used for each site.*



**Figure 1. 25 :** H/V spectral ratios for the sites network stations of Atlas and Messeta of morocco (IFR, M017, M202, M215, M015, M018, M206 and AVE) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The couloured curves represent the number of the time windows used for each site.



**Figure 1. 26 :** *H/V spectral ratios for the sites network stations Anti-Atlas of morocco (M208, M210, MM07, MM08, MM10, MM14, MM15 and M018) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The coloured curves represent the number of the time windows used for each site.*

### **Acknowledgments:**

In this study, we are grateful to the Scientific Institute of Rabat, Morocco, for the important assistance and the data supplying with geophysical instruments and offering all the facilities during the work. We are also greatly indebted to Jaume Almera Institute, CSIC, Barcelona, Institut für Geophysik, Münster University, Bristol University and the Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) for their essential support especially the installation of the stations

### **3 Conclusion:**

The realization and interpretation of a noise measurement with 23 broadband stations distributed in all morocco and the interpretation of the H/V curves clearly identified 3 different main structural domains.

From a geological point of view, the deepest areas are characterized by low fundamental frequencies like the case of the middle and high Atlas. Moreover, on Rif and Anti Atlas the crust is very thin which shows the frequencies moderately high.

The results obtained in this study show a good agreement with the geological setting of Morocco and with our observation for four years of data acquisition, and the correlation between these fundamental frequencies and the geology of the field is quite concordant. The high frequencies: the weak thickness of the quaternary layers, absence of the soft and the base are surmounted directly by the Moghrebian sandstone, a condition generally realized by moving away from the crest line.

The low frequencies: important Thickness of the quaternary layers, characterized by a layer of soltanian and that reaches in some places a thickness of 10m or more. This condition and favored by the approximation of the ridgeline.

The results of the crustal variations beneath the Moroccan country still sparse, and future studies will have to test the assumption of lateral homogeneity emerging from our data and to apply H / V method on each geological area to evaluate micro zoning of each part of Morocco.

## Liste des tableaux :

<b>Tableau 1. 1</b> : Le réseau sismologique de l'institut scientifique ce compose de six stations équipées de capteurs à trois composantes : Averroès, Ifrane, Tiouine, Taforalt, Rabat-Institutet Aouin et Torkoz.....	23
<b>Tableau 1. 2</b> : liste de station Broadband temporaires de l'université de Munster .....	26
<b>Tableau 1. 3</b> : liste de station Broadband temporaires de l'université de Bristol.....	26
<b>Tableau 1. 4</b> : Station Broadband temporaires de l'ICTJA de CSIC .....	27
<b>Tableau 1. 5</b> : liste de station Broadband temporaires de l'université d'Oregon.....	28
<b>Tableau 1. 6</b> : Spécifications des sismomètres (broadband) 3C et des numériseurs haute résolution 24 bits utilisés fréquemment dans le réseau de l'Institut Scientifique de Rabat.....	34
<b>Tableau 1. 7</b> : Liste des évènements et les explosions sélectionnés pour cette étude et le calcul du moment magnitude et durée du signal avec les ML et Mc correspondants, la couleur rouge représente les explosions et le bleu représente les séismes. ....	46
<b>Tableau 1. 8</b> : Table1: network stations (ALHU, AVE, IFR, NKM, TAF, M004 and M001, ALHU, AVE, IFR, NKM, TAF, M004, M001, M215, M218, MM07, MM08, MM10, MM14, MM15 and M012) distributed in the all Morrocan area. (the Rif with green color) (Atlas and Meseta with blue color) ( Anti Atlas with black color).....	63

## Liste des figures :

- Figure 1. 1** : Les principales failles détectées dans le cadre géologique du Maroc et de la jonction d'Iberia. (A) le champ de vitesse combiné GPS (B) Localisation du magmatisme cénozoïque à quaternaire (triangle rouge). (C) Sismicité de la zone orogénique Alboran au Maroc et à Gibraltar (GAZ). (D) Modèle de transpression/transension illustrant l'évolution des principales failles détectées. (Khattach et al. 2013) ..... 19
- Figure 1. 2** : La carte de sismicité du Maroc et de ses environs de 1901 à 2010 à partir de magnitude  $M=3,5$  (Cherkaoui et EL Hassani 2012). ..... 20
- Figure 1. 3** : Carte de déploiement de station sismique permanente de l'institut scientifique ..... 22
- Figure 1. 4** : Observatoire Averroès (AVE) bâtiments principale ..... 24
- Figure 1. 5** : Observatoire d'Ifrane ..... 24
- Figure 1. 6** : Le nouveau bâtiment de la Station de Recherches Présahariennes d'Aouinet Torkoz ..... 25
- Figure 1. 7** : Déploiement du réseau temporaire de l'institut scientifique ..... 29
- Figure 1. 8** : Sismomètre vertical et son circuit équivalent du générateur électromagnétique ..... 30
- Figure 1. 9** : Schémas fonctionnels des sismomètres à retour (large bande). Idéalement, dans cette configuration, la suspension mécanique et le capteur de déplacement ne détectent pas l'amplitude complète du mouvement du sol, qui n'est présent que dans le chemin de retour ..... 31
- Figure 1. 10** : Sismomètre Guralp ..... 31
- Figure 1. 11** : Sismomètre STS-2 portable à large bande 3C intégré. Côté gauche, STS-2 installé physiquement sur une surface plane. Côté droit, une vue de la partie interne, où certaines cartes électroniques et un boîtier cylindrique ..... 32
- Figure 1. 12** : schéma fonctionnel et graphe du Sismomètre STS2 ..... 33
- Figure 1. 13** : L'installation typique proposer pour l'installation d'une station Broadband de type Nanometrics Trillium 120PA ..... 33
- Figure 1. 14** : Classification des différents types de sources sismiques ..... 37
- Figure 1. 15** : Foyer d'un évènement sismique et d'une explosion ..... 39
- Figure 1. 16 (A)** : Carte de Géométrie et localisation des profils sismiques grand angle acquis par les expériences de réflexion sismique (projet RIFSIS). (B) la Carte de l'expérience SIMA, dans cette expérience, le transect étudié a une longueur de 700 km, il part près de Merzouga, au nord du craton saharien, et se termine à la pointe de l'arc de Gibraltar. .... 45
- Figure 1. 17** : (a) - Distribution amplitude-fréquence des séismes. Les lignes continues représentent les courbes moyennes, tandis que les lignes pointillées définissent les intervalles de déviation standard autour des courbes moyennes. (b) - Distribution amplitude-fréquence des explosions. .... 47
- Figure 1. 18** : (a) - Ratios  $MW / ML$ , les explosions sont présentées par les cercles rouges et les séismes à carrés bleus, aux stations sismiques pour la totalité des événements étudiés. (b) - Relation entre la durée et la magnitude de la coda. (c) - Spectres moyens amplitude-fréquence de tous les événements étudiés dans ce travail.. 48

- Figure 1. 19** : Les résultats du mécanisme au foyer des Séismes de quelques séismes étudié dans ce travail, Les compressions sont indiquées par des cercles et les dilatations sont présentées par des triangles..... 50
- Figure 1. 20** : Les Mécanismes au foyer des explosions étudiés et obtenus par la méthode d'inversion tenseur de moments. Les compressions sont indiquées par des cercles. Les plans nodaux présentés par les lignes continues sont juste estimés par le logiciel Seisan. .... 50
- Figure 1. 21** : Seismicity map of Morocco for the period between 1901 and 2010 (Cherkaoui et al, 2012)..... 60
- Figure 1. 22** : (A) Tectonic units in Morocco (left); (B) The main geological formations in the study area (right). D. Khattach et al 2013..... 61
- Figure 1. 23** : Distribution of 23 temporary and permanent broadband stations in Moroccan country; the colour scale displays relative hypsometry. Two permanent stations of the Scientific Institute were installed in the Averroes and Ifrane observatories (pink). Sixteen ICJTA temporary stations were located in different regions within the project Topo-Iberia and cover the north and centre of the country (red). The IFG installed the other five stations in the south as part of Morocco Array project (blue). .... 64
- Figure 1. 24** : H/V spectral ratios for the sites network stations of the Rif (ALHU, M012, M013, NKM, TAF, M004 and M001) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The coloured curves represent the number of the time windows used for each site. .... 68
- Figure 1. 25** : H/V spectral ratios for the sites network stations of Atlas and Messeta of morocco (IFR, M017, M202, M215, M015, M018, M206 and AVE) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The coloured curves represent the number of the time windows used for each site. .... 69
- Figure 1. 26** : H/V spectral ratios for the sites network stations Anti-Atlas of morocco (M208, M210, MM07, MM08, MM10, MM14, MM15 and M018) in the investigated area. The mean curves are represented as continuous lines, while the dashed lines define the one-standard deviation intervals around the mean curves. The coloured curves represent the number of the time windows used for each site. .... 70

---


## PARTIE 2 :


---


Observation en sciences de l'atmosphère :

-Caractérisation de certains polluants Atmosphériques

---

 **Chapitre 1** : La pollution atmosphérique, les différents polluants, méthodes et réseaux de mesure.

 **Chapitre 2** : Caractérisation des polluants atmosphériques dans la région centre du Loiret à Orléans.

 **Chapitre 3** : Station de recherche atmosphérique Atlas Mohammed V à Michlifen.

## Introduction Générale :

La pollution atmosphérique est l'un des problèmes majeurs de l'environnement, c'est le premier sujet de préoccupation environnementale à l'échelle mondiale. Définie par la présence des gaz polluants et des particules fines dans l'atmosphère, qui peuvent provoquer des effets nocifs sur l'environnement et la santé humaine (Arquès, 1998). Après la fin du XVIIIème siècle, la combustion des charbon a causés beaucoup de problèmes surtout dans les grandes villes (Hadfield, et al., 1999), d'où la nécessité de développer des système de mesure et de contrôle de la qualité de l'air. Depuis lors, le problème de la pollution atmosphérique a continué de croître. Les polluants libérés dans l'air peuvent affecter notre environnement naturel, comme les pluies acides, Formées à partir du d'oxyde de soufre et dioxyde d'azote liés aux activités humaines et rejetés dans l'atmosphère. Elle modifie la quantité de produits chimiques présents dans les sols et l'eau douce, affectant les chaînes alimentaires. La pollution de l'air peut avoir un impact négatif sur la santé humaine allant de la simple irritation (Llop, et al., 2008) à des allergies comme l'asthme (Peden, 1996) ou encore déclencher des maladies graves aux conséquences létales (Pascal, 2009).

L'étude de la pollution atmosphérique vise à bien en comprendre ses particularités dans le but de limiter au mieux ses effets (Dimo, et al., 2010), pour contrôler et réduire les émissions dans l'air provenant du transport, de l'industrie et de l'agriculture. A titre d'exemple, les oxydes d'azote et l'ozone qui ont actuellement des niveaux dépassent les seuils d'alerte environnementaux dans les grandes villes. L'ozone, qui avait des niveaux moyens de fond compris entre 10 et 15 ppb au début du siècle, atteint maintenant 30 à 40 ppb, en de nombreux endroits dans le monde (Percy, et al., 2004).

Ces études concernent uniquement les plus basses couches de l'atmosphère, jusqu'à une altitude de quelques kilomètres au-dessus de la surface, ce que l'on nomme la couche limite. Qui correspond à la partie de la troposphère impactée par la surface terrestre et au sein de laquelle les polluants peuvent se disperser et se mélanger.

Afin de trouver des solutions à ces problématiques environnementales, des mesures en continu pour les différents types de pollution ont été effectués à l'échelle nationale et internationale. Pour vérifier les niveaux des différents polluants par rapport aux standards de qualité environnementale exigés. Au Maroc le suivi de la pollution atmosphérique a été entamé en 1997, et aujourd'hui le réseau de surveillance de la qualité de l'air est composé de 29 stations fixes dont l'objectif est de mesurer, prévoir et informer le public, les autorités locales et les décideurs sur la qualité de l'air. Ces stations sont réparties principalement dans les grandes villes comme Casablanca avec 13 stations, Marrakech (3 stations) El Jadida (2 stations). Avec ces stations de mesures, il est possible d'effectuer un suivi continu et précis des teneurs des polluants réglementés sur des lieux stratégiques. En revanche, les mesures effectuées par ces stations ne répondent pas aux applications qui s'intéressent à l'étude qualitative de l'atmosphère et nécessitent encore un développement pour les autres grandes villes et aussi et distribution sur tout le territoire Marocain et une mobilité géographique. Et en parallèle des laboratoires et des observatoires dédiés à la recherche scientifique dans le domaine de pollution atmosphérique.


Dans cette partie de thèse, et pour un premier temps, nous introduisons aux lecteurs la problématique de la pollution atmosphérique avec des méthodes et réglementations liées à sa mesure. Nous continuons cette étude bibliographique par une présentation des différents types de polluants gazeux ainsi que leurs caractéristiques, avec des investigations sur les réglementations à l'échelle internationale.

Dans un second temps, le deuxième chapitre est consacré aux études effectués lors de mes séjours de recherche au laboratoire ICARE au CNRS d'Orléans, plus précisément sur le supersite voltaire avec une présentation du parc instrumental et les études effectués sur le gaz polluants HONO et aussi les études effectués sur le moniteur des ions ambiants (AIM), la méthodologie. Afin de développer notre connaissance sur la caractérisation des polluants atmosphériques et d'apprendre les méthodes de traitement et d'interprétations données atmosphérique.

Enfin, dans la dernière partie, nous présentons les principaux travaux de mesure et d'analyse de pollution réalisés à la station de recherche atmosphérique Atlas

Mohammed V à Ifrane, les différentes instrumentations et les résultats de mesure effectués pour la première fois dans une zone rurale. Cette observatoire est dédié à la recherche scientifique et c'est le premier observatoire de ce type dans l'Afrique du Nord pour la qualification de pollution atmosphérique.

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre l'Université Mohammed V de Rabat et le CNRS d'Orléans en France. Il fait partie du projet européen de recherche et d'innovation Horizon 2020, RISE / Marie Curie, MARSU 'MARine atmospheric Science Unraveled'

 **Chapitre 1** : La pollution atmosphérique, les différents polluants, méthodes et réseaux de mesures.

*Nous présenterons dans ce chapitre une description de la pollution atmosphérique, les polluants gazeux ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous présentons les différentes méthodes pouvant être utilisées pour la mesure normalisée de ces polluants dans le cadre de leur suivi réglementaire.*

## 1. Pollution Atmosphérique :

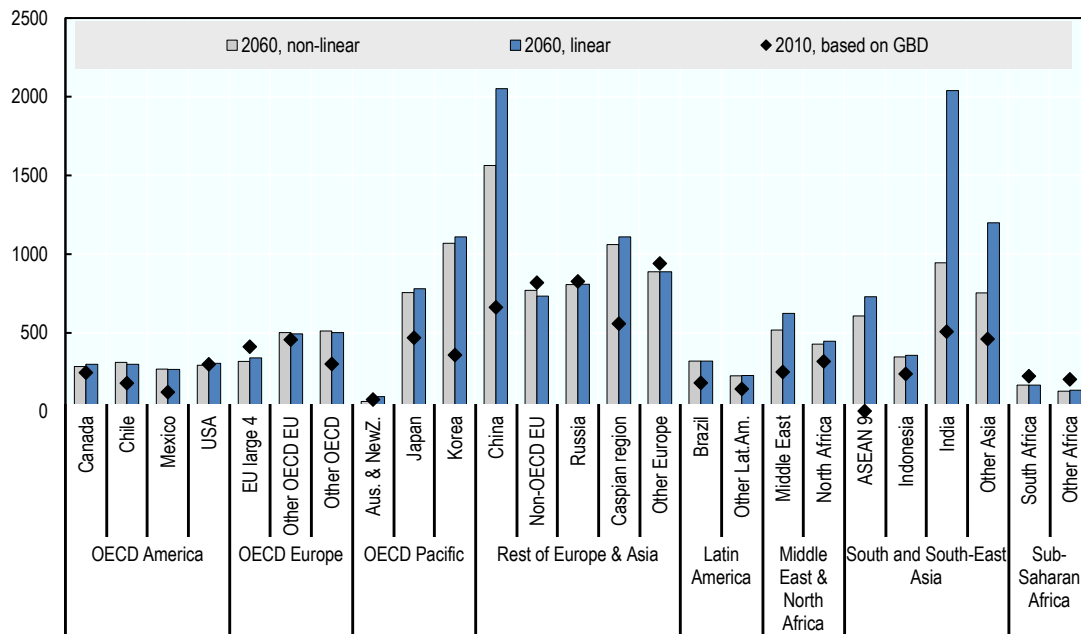
Depuis plusieurs décennies, les différents problèmes liés à la qualité de l'air préoccupent les chercheurs spécialisés dans la chimie environnementale. Ils ont mis en évidence les dégradations environnementales dues aux pollutions atmosphériques. Cette pollution atmosphérique a différentes origines qui peuvent être naturelles comme les feux de forêt, éruption volcanique,..., ou bien d'origine anthropiques, c'est-à-dire liées à l'activité humaine (Mayer, 1999). Pour ce dernier cas, la pollution de l'air est le résultat direct du développement industriels lors des dernières décennies, comme par exemple l'émission associées aux processus de combustion dégagé par les véhicules automobiles, les zones industrielles, et la production d'énergie utilisant le charbon.

Plusieurs études ont montré un lien directs entre la dégradation de l'environnement et de la santé humaine, et la présence de ces polluants dans l'atmosphère (Monk, et al., 2015 ; Anderson, 2009 ; Kulkarni, et al., 2008 ; FNORS, Septembre 2008). Ainsi, la pollution de l'air pourrait causer entre 6 et 9 millions de décès prématurés et coûter 1 % du PIB entre 2010 et 2060, selon le nouveau rapport de l'OECD en 2016. En exemple, la figure 2-1 présente l'évolution prévisionnelle des décès prématurés liés à l'excès d'ozone entre 2010 et 2060 (OECD, 2016).

Les plus fortes hausses des taux de mortalité par pollution atmosphérique sont prévues en Inde, en Chine, en Corée et dans des pays d'Asie centrale comme l'Ouzbékistan, où l'augmentation de la population et des villes congestionnées signifie que davantage de personnes sont exposées aux émissions des centrales électriques et à l'échappement du trafic. Les taux de mortalité prématurée devraient être jusqu'à trois fois plus élevés en 2060 qu'en 2010 en Chine et jusqu'à quatre fois plus élevés en Inde.

L'accumulation des polluants atmosphérique dans l'air peut aussi entraîner des effets régionaux comme les phénomènes de pluies acides qui ont un impact très négatif sur la végétation. Elles tuent de nombreuses espèces, perturbant l'agriculture, et le développement végétal en général. Et aussi c'est facteur du réchauffement climatique (Arquès, 1998). Afin de bien comprendre la problématique de la pollution atmosphérique et leur effet, nous avons focalisé dans ce chapitre sur la description de

ces polluants principaux suivants leurs types primaires ou secondaires, leurs sources, et la réglementation associée à l'échelle mondiale.



**Figure 2. 1 :** Décès prématurés dus à l'exposition aux particules fines et à l'ozone, Nombre de décès c'est le nombre par an et par million de personnes

### 1.1 Les sources des polluants atmosphériques :

Les sources de pollution atmosphérique peuvent être locales, régionales ou globale, on peut les classer en deux catégories principales :

-Les sources anthropiques, qui sont liées directement à l'activité humaine, qui n'ont pas de frontières et qui ont un impact sur l'environnement mondial. Elles se subdivisent en 3 catégories : secteur industriel comme l'incinération de combustibles fossiles pour produire de l'énergie (chaleur et électricité), les principaux processus industriels (comme l'industrie métallurgique ou l'industrie du ciment / construction), **secteur résidentiel** et le **secteur du transport**. Nous pouvons classer les sources de pollution chimique anthropique en deux grands groupes : les sources fixes et mobiles.

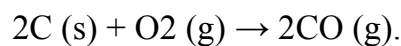
-Les sources biogéniques, qui sont associées aux émissions d'origines naturelles liées à la biosphère. Elles incluent les émissions des arbres, l'activité microbienne dans les sols ou l'eau, et l'agriculture qui est également la source de pollution majeure avec en particulier les engrais azotés ou encore l'élevage des animaux à l'origine de pollution

par le méthane (produit par leur système digestif), et par l'ammoniac (issu de la transformation de l'urée). Étant donné que 90% des émissions biogéniques sont sous forme de sulfure de diméthyle et qu'une proportion encore plus élevée des émissions humaines est sous forme de SO<sub>2</sub>, nous avons une démarcation claire entre les types de sources. Enfin, on intègre également dans les sources biogéniques les phénomènes naturels comme les nuages de cendres associées aux éruptions volcaniques (Arqués, 1998).

### 1.1.1 Les polluants primaires :

Les polluants atmosphériques primaires sont des polluants qui sont directement ajoutés à l'atmosphère à partir d'une source d'énergie ou d'un processus utilisé. Ce sont des particules monoxyde de carbone provenant des processus de combustion et présent dans les gaz d'échappement des voitures, le dioxyde de soufre provenant de l'industrie (Mayer, 1999)..., des oxydes d'azote et des hydrocarbures.

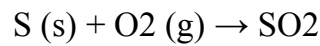
**Le monoxyde de carbone (CO) :** Le monoxyde de carbone est l'une des principales sources de polluants atmosphériques, il résulte de la combustion incomplète des combustibles fossiles (charbons, l'essence, diesel ...), de la combustion des déchets agricoles (biomasse) et du chauffage résidentiel. La réaction chimique est définie par l'équation ;



Ce gaz est toxique (pour les êtres vivants) et peut causer des asphyxies mortelles à hautes concentrations. Il est considéré comme l'un des composés principaux dans la problématique de la qualité de l'air intérieur. On trouve ce gaz en abondance dans les villes et aux abords des autoroutes à cause des véhicules à moteurs à combustion. Cela en fait un des traceurs de la pollution atmosphérique de type trafic.

### **Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) :**

Les oxydes de soufre généralement proviennent principalement de la combustion incomplète de combustibles fossiles, du charbon ou de la combustion de pétrole, de volcans, des usines et des industries de production d'électricité, des raffineries et des moteurs diesel. La réaction chimique est représentée par l'équation ci-dessous:



Ce gaz, est considéré comme un gaz toxique pour tous les êtres vivants, qui conduit à la création des particules (aérosols sulfurique) qui empêche les rayons solaires d'atteindre la terre, ce qui conduit au refroidissant de la planète (Pascal, 2009). Plusieurs pays ont commencé depuis les années 80, la surveillance des principales installations industrielles afin de mise en œuvre de disposition de réduction de ce constituant toxique à la source, ce qui a permis une baisse drastique des émissions du SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Un exemple des efforts pour la réduction des émissions SO<sub>2</sub>, la figure 2-2 montre les évolutions des moyennes annuelles de SO<sub>2</sub> en France avec les différentes sources d'émissions. Nous remarquons d'une part que les concentrations ambiantes sont en baisse constante depuis les années 1990 et d'autre part que les émissions moyennes en SO<sub>2</sub> provenant de l'industrie sont toujours plus élevées par rapport aux autres sources. Donc ce gaz peut ainsi être considéré comme traceur potentiel des émissions d'origine industrielle

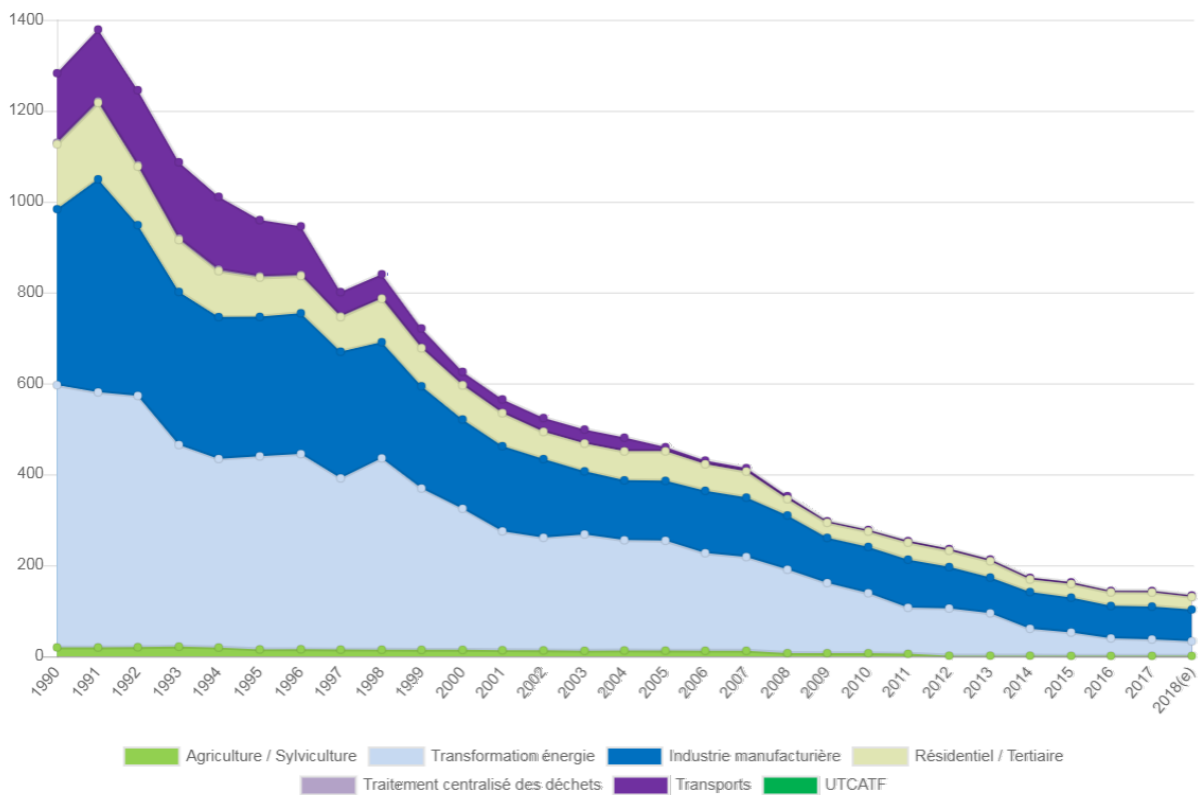


Figure 2. 2 : Evolution des émissions de SO<sub>2</sub> de 1990 à 2017 pour la France métropolitaine (en kt) CITEPA -Rapport Secten (2019)

Par contre, le Maroc demeure parmi les foyers d'émission du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) les plus importants dans le monde. Ainsi l'OMS 'Organisation Mondiale de la Santé' a classé le Maroc parmi les pays où la pollution de l'air est supérieure à ses recommandations, il est parmi les 25 pays sources d'émissions de SO<sub>2</sub>. Les concentrations sont très élevées et en 2018, par exemple la centrale de Jorf Lasfar a généré 113.000 tonnes de SO<sub>2</sub>. Avec une augmentation marquante par rapport à l'année 2017 où la production de cette centrale était de 69.000T de SO<sub>2</sub>. Aussi la centrale thermique de Mohammedia a émis 73.000 tonnes de SO<sub>2</sub>. Une quantité qui a baissé par rapport aux 2017 avec 126.000 tonne. Et finalement la centrale de Safi a émis 30.000T de SO<sub>2</sub>.

**Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) :** Les oxydes d'azote se produisent généralement lors de la combustion automobile de carburant (diesel, essence, gaz naturel et charbon), et les centrales thermiques (Arquès, 1998). Ce sont des gaz fortement toxiques qui résultent de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène à température élevée, cette réaction chimique est représentée par l'équation suivante ; 
$$\text{N}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2\text{NO} (\text{g})$$

De plus, le NO produit peut réagir avec l'oxygène de l'air pour se transformer en NO<sub>2</sub>. Les NO<sub>x</sub> pourraient être considérées comme un traceur de la pollution urbaine et aussi pour les foyers de combustion comme les centrales de combustion urbaines et les trafics routiers.

**Les composés organiques volatiles (COV) :** Les composés organiques volatils constituent une famille très large de produits (benzène, l'acétone, le perchloroéthylène, etc.). Il s'agit des composés organiques provenant de sources anthropiques et biogènes, autres que le méthane, capables de produire des oxydants photochimiques par réaction avec des oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire. On peut dire aussi, que les tout composés organiques, contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogène, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques, Ils proviennent principalement des transports et des procédés industriels, l'évaporation de produits raffinés, les peintures...

L'existence d'un excès de concentration de composés organiques volatiles et sous l'effet du rayonnement solaire conduits à la production de l'ozone dans la troposphère, qui est un polluant secondaire, ayant un effet indirect sur la santé humaine (Le Cloirec, 2004). Les COVs sont considérés aussi comme des traceurs des différents types de pollutions tant urbaines qu'industrielles (Liu, et al., 2012).

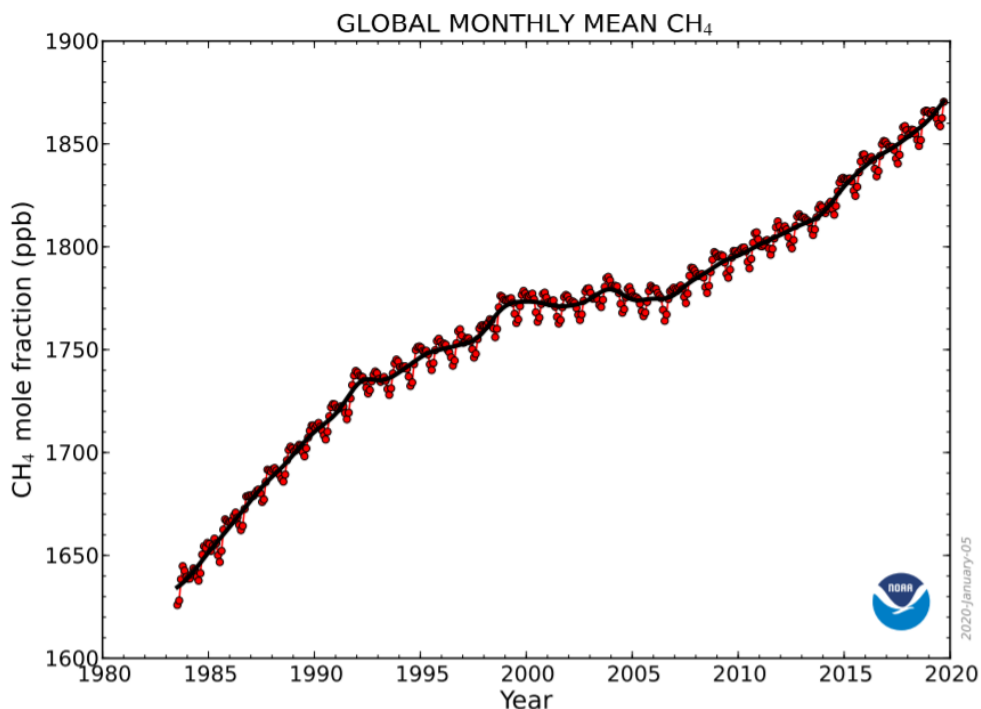
**Les particules en suspension :** Ces particules sont formées à partir des matières organiques et inorganiques, se sont d'une manière générale les fines particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Dans la directive 1999/30/CE ils sont définies comme « les particules passant dans un orifice d'entrée calibré avec un rendement de séparation de 50% pour un diamètre aérodynamique de 10  $\mu\text{m}$  (cas des PM10) ou de 2,5  $\mu\text{m}$  (cas des PM2.5) ». Elles proviennent de sources anthropiques comme la poussière de route, la combustion de carburant dans les zones agricoles, la combustion incomplète des véhicules à moteur (diesel et essence), l'amiante des industries et les particules métalliques. Aussi à partir des sources naturelles comme les éruptions volcaniques, la végétation (pollens...), les incendies de forêts... ou de sources anthropiques comme les émissions industrielles, la combustion des fossiles combustibles.

- PM10 particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10  $\mu\text{m}$  ;
- PM2.5 dont le diamètre est inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ , appelées « particules fines » ;
- PM1 dont le diamètre est inférieur à 1,0  $\mu\text{m}$ , appelées « particules très fines » ;
- PM0,1 dont le diamètre est inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ , appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules.

Les particules PM10 et PM2.5 sont les plus ciblées dans les mesures de la qualité de l'air. Ils ont des effets dangereux sur la santé humaine, l'augmentation des concentrations en particules dans l'air est corrélée avec l'augmentation des maladies cardiovasculaires, des allergies, des cancers du poumon, ce qui conduit à une diminution de l'espérance de vie (Pascal, 2009).

Au Maroc et dans les grandes villes comme Casablanca, des niveaux de pollution sont trois fois supérieurs à ceux recommandés par l'Organisation mondiale de la santé avec un taux de concentration de PM10 de  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM2.5, alors que les normes internationales sont respectivement de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Marrakech arrive à la deuxième place ( $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), suivie de Tanger ( $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Meknès ( $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Fès ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Salé ( $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et Safi ( $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Le Méthane :** Ce gaz a un rôle très important dans le réchauffement climatique, il présente un niveau de concentration et d'émission bien inférieur par rapport au CO<sub>2</sub>. Ce gaz est un traceur de certaines pollutions anthropiques. On peut le trouver à l'état naturel produit par des organismes vivants. Il constitue l'essentiel du gaz naturel qui est exploité comme combustible fossile. Avec le développement industriel, la concentration de méthane n'a cessé d'augmenter dans l'atmosphère. Elle est passée de 700 ppbv au début du 19ème siècle à 1870 ppbv aujourd'hui en raison de l'augmentation des activités humaines liées à l'industrialisation et à l'urbanisation (2.3).



**Figure 2. 3 :** L'abondance mensuelle du CH<sub>4</sub> atmosphérique à l'échelle mondiale, <https://www.esrl.noaa.gov/>

### 1.1.2 Les polluants secondaires

Ces polluants sont formés à la suite des réactions chimiques des constituants émis par des sources primaires ou encore qui ne proviennent pas d'une source directement polluante. Ces réactions sont très complexes au niveau de l'atmosphère et leur présence est difficile à réguler car leur existence ne provient pas directement des activités anthropiques.

**L'Ozone :** L'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>) est un gaz incolore qui est une composante majeure du smog atmosphérique. La production d'Ozone dans zone urbaine à partir des réactions chimiques entre les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV) sous des conditions climatiques particulières, comme l'augmentation de l'irradiation solaire. Les polluants primaires peuvent être transportés sur de longues distances par le vent, générant de l'ozone, ce qui signifie que les zones rurales peuvent connaître des niveaux d'ozone élevés aussi. Ce qui explique les concentrations élevées enregistrées au cours des dernières années et dans les zones rurales proches des agglomérations.

Comme pour tous les polluants secondaires, il est difficile de limiter la production d'ozone à partir de la mise en œuvre de limitations des émissions. Bien que la concentration globale des autres polluants dans l'atmosphère tende à baisser, celle de l'ozone reste intacte ou parfois subit de légères augmentations. Les concentrations élevées de ce polluant secondaire dans la troposphère sont pertinentes pour la santé humaine et l'environnement à plusieurs égards (Cooper et al., 2014; Monks et al., 2015; Schultz et al., 2015). Ils ont un impact sur le système respiratoire humain et nuisent à la croissance de la végétation. De plus, l'ozone est un gaz à effet de serre et joue un rôle clé dans les processus de photo-oxydation dans la troposphère.

## 1. 2. Réglementation

Les polluants atmosphériques ont des effets dangereux conduisant à la dégradation de la qualité de l'air et provoquant des effets sur santé humaine, la surveillance de la qualité de l'air est devenue une nécessité. A l'échelle internationale, l'Union Européenne a commencé la disposition des directives pour la réglementation et la protection de la

qualité de l'air en 1980 par la loi 80/779/EEC ciblé en premier temps le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> et les particules PM<sub>10</sub>. Le NO<sub>x</sub> et l'ozone en 1982 et 1992 respectivement par les deux directives 82/884/EEC et 85/283/EEC. Il a fallu attendre Mai 2008 que la directive 2008/50/CE concernait toute une liste des principaux polluants atmosphériques.

Au Maroc, La législation relative à la protection de l'air a commencée en 2003 avec la promulgation de la loi n° 13-03 relative à la lutte contre la pollution de l'air, qui interdit le déversement dans l'air d'éléments polluants qui dépasse les limites autorisées et cette loi vise tous les rejets dans l'air provenant des différentes sources fixes et mobiles, à l'exception des activités militaires ou les agents ionisant (régis par une loi spécifique).

En outre, deux autres lois promulguées en 2003 prévoient d'importants principes sur la protection de l'air. La première c'est la loi n° 11-03 relative à la protection de l'environnement introduit le principe du pollueur-payeur, parmi les recommandations de cette loi est de développer des réseaux de surveillances et de contrôle de la qualité de l'air à l'intérieur des villes, dans les zones industrielles, y compris aussi les obligations de contrôle et d'établissement des rapports par les pollueurs, et à la mise en place d'instruments économiques et financiers pour aider au financement des mesures de protection. Et la deuxième c'est la loi n° 12-03 relative aux études d'impact sur l'environnement veille à ce que les nouveaux projets soient conformes aux législations sur les émissions dans l'air.

Ces trois lois regroupent en générale les critères nécessaires pour que le Maroc rentre dans les normes internationales de protection de l'air. Les normes relatives à la qualité de l'air et l'établissement d'un réseau de contrôle de l'air ont été signées en 2009 (décret n° 2-09-286). Les valeurs limites des émissions des polluants dans l'air ont été adoptés en 2010 (décret n° 2-09-631). Il faut noter que ces valeurs limites des émissions sont toujours en instance d'adoption sectorielle.

## **2. Méthodes de mesure :**

Les éléments les plus intéressants à définir pour les mesures des gaz polluants sont : l'emplacement, l'altitude de la station, le type de station (trafic, industrie ou de fond), la zone de la station (urbain, suburbain ou rural..). En Europe la Directive 2008/5/CE a

préconisé des méthodes spécifiques de mesure pour chaque polluant atmosphérique, ces méthodes doivent aussi suivre les normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

L'objectif principal des normalisations des méthodes de mesure pour chaque constituant est de promouvoir l'accès aux niveaux de concentration des gaz avec une grande précision et pour les différents sites de mesures (Houdret, et al., 2008). Le tableau 2-1 présente les différentes méthodes de mesure spécifiques à chaque polluant.

**Tableau 2.1 : Les différentes méthodes normalisées pour les gaz réglementés**

Gaz	Méthode de mesure
NOX	chimiluminescence
CO	rayonnement infrarouge non dispersif
O3	photométrie UV
SO2	fluorescence UV
Benzène	prélèvement actif et chromatographie

Des analyseurs automatiques d'air ont été développés spécifiquement pour effectuer des mesures selon les méthodes normalisées. Ils peuvent être utilisés dans des stations de mesures de la qualité de l'air pour assurer le suivi au quotidien de la pollution atmosphérique (Sivacoumar, et al., 2001).

En générale les différentes méthodes présentées dans le tableau 2.1 assure des mesures avec une grande précision avec un temps de réponse relativement court (Toupance, et al., 2004). L'inconvénient de ces méthodes c'est la nécessité d'étalonnage régulière afin de vérifier la stabilité et la fiabilité des mesures.

### **3. Réseaux et stations de mesure :**

#### **3.1 Réseaux de mesures :**

Les réseaux de surveillance de la pollution atmosphérique sont répartis dans plusieurs pays, pour assurer la surveillance de l'atmosphère mondiale d'un côté, ces stations sont installées généralement dans des zones rurales. Et d'une autre côté, le contrôle de la qualité de l'air dans zones urbaines, est effectué par la mise en place de plusieurs réseaux de mesures à l'intérieur des villes. Chaque station contient plusieurs analyseurs physico-chimiques d'air, basés sur les méthodes de mesures normalisées listées précédemment (tableau 2-1).

### 3. 1.1 Réseaux GAW :

Parmi les plus grands réseaux mondiaux pour la surveillance de la qualité de l'air, il y a le réseau GAW «Global Atmospheric Watch» (figure 2.1), dont l'activité est l'observation de la composition chimique de l'atmosphère à grande échelle et à haute altitude. Le système GAW de l'WMO «World Meteorological Organization» a été créé en 1989. Cette organisation a mené un nombre important d'activités de recherche et de surveillance des gaz polluants atmosphériques. L'objectif principal du réseau GAW est de fournir des données et des informations sur la composition chimique et les caractéristiques physiques de l'atmosphère et leurs tendances. Afin d'améliorer la compréhension du comportement de l'atmosphère et de ses interactions avec les océans et la biosphère. Les données collectées par les stations de surveillance sont très intéressantes pour mieux comprendre la relation entre la composition de l'atmosphère en évolution et les changements climatiques mondial et régional.



**Figure 2. 4 :** Réseau de stations de mesure du programme GAW, <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/measurements.html>

Dans le même contexte de surveillance de l'atmosphère mondiale, le réseau ICOS est le système intégré d'observation du carbone. C'est une infrastructure de recherche internationale dédiée à la mesure, l'analyse et la compréhension des flux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, au-dessus de l'océan et des écosystèmes. Les mesures

atmosphériques sont coordonnées dans ICOS, via le laboratoire de science d'environnement LSCE :

Parmi les principales objectives de réseau ICOS est la compréhension des processus biogéochimiques du cycle du Carbone, aussi la détection d'un éventuel affaiblissement (ou renforcement) du puits de carbone, en raison du changement climatiques extrêmes tels que les sécheresses, et pour assurer la surveillance des tendances à long terme des émissions anthropiques des gaz conduisant au réchauffement climatique. Le réseau ICOS est composé de plusieurs analyseurs des gaz à affect de serre dans plus de 30 stations atmosphériques distribué sur plusieurs sites en Europe et une seul station en Afrique du Nord (Figure 2.5).



*Figure 2. 5 : Réseau de mesure atmosphérique ICOS, <http://icos-atc.lsce.ipsl.fr/stations>*

### 3. 2. Stations de mesure de la pollution

Comme on a cité auparavant les stations de mesure peuvent être installées dans des zones urbaines ou des zones rurales. Les zones urbaines sont définies comme des unités bâties et avec une somme de population supérieure à 2000 habitants, on distingue quatre

types de stations installées dans ces zones (station urbaine, station périurbaine, station industrielle et station trafic). Les zones rurales sont les communes qui ne font pas partie de la zone urbaine (ADEME, 2002). Aussi pour ces zones, on trouve trois types de stations (station rurale régionale, station rurale nationale, station d'observation spécifique). Cette classification est correspond aux problèmes de pollution atmosphérique rencontrés en fonction de la zone géographique où elles sont implantées. Au Maroc, on compte 29 stations fixes, réparties sur 15 villes et 7 régions. La majorité de ces stations se concentre autour de la ville de Casablanca avec 17 stations. Par contre pour les zones rurales, il existe une seule station dans les moyennes Atlas, qui est dédié à la recherche scientifique. Ce qui reflète que le domaine de la surveillance de la qualité de l'air est en cours de développement et nécessite l'implantation d'un réseau plus dense et dans les différentes régions du pays, de même pour le réseau de station qui seront dédié à recherches scientifiques.

Pour le suivi et le contrôle de ces stations de mesures, il est nécessaire d'avoir toute une équipe de personnel qualifié et formé dans le domaine (des techniciens, informaticiens, et des chercheurs scientifique...) afin d'assurer le bon fonctionnement du matériel, son étalonnage, la récupération, le traitement et l'interprétation des données collectées. Outre le coût en ressources humaines, le budget de construction et d'équipement d'une seule station dépasse plusieurs dizaines de milliers d'euros. Ce qui limite le nombre de stations de mesure implanté, car cela nécessite des efforts concertés de tous les acteurs économiques, et une réelle volonté de l'Etat pour le suivi et le contrôle de la qualité de l'air au Maroc.

#### **4. Conclusion**

Les réseaux des stations de mesures et de l'observation atmosphérique permettent d'étudier l'évolution des paramètres atmosphériques d'intérêts climatiques essentiels tels que les concentrations des gaz polluants, les gaz à effet de serre et les propriétés microphysiques, chimiques et optiques des particules. Ces mesures sont basées sur des

techniques d'échantillonnage qui nécessitent souvent des équipements complexes, lourds, et coûteux.

Les recherches menées par ces réseaux ont notamment pour objectif de documenter l'évolution de la composition de la troposphère avec un suivi sur le long terme de l'évolution des paramètres de pollution liés au changement climatique.

Ainsi, l'objectif de ce travail est le développement d'un site d'observation atmosphérique au Maroc, équipé d'un système permettant l'identification de différents types de pollutions atmosphériques ainsi que la caractérisation des différents constituants existants dans l'air. Il s'agira donc dans un premier observatoire dédié à la recherche atmosphérique dans l'Afrique du Nord, dans le but de développer un réseau d'observatoire de recherche atmosphérique au Maroc. Permettant de collecter les données issues afin d'obtenir une qualification de la pollution atmosphérique au niveau de l'Afrique du Nord.

La contribution de l'observatoire de recherche atmosphérique marocain au programme de surveillance de l'atmosphère mondiale GAW «Global Atmospheric Watch», inclura l'observation de la composition chimique de l'atmosphère à grande échelle et à haute altitude et ainsi documentera la variabilité atmosphérique du Sud du Bassin Méditerranéen et l'Afrique du Nord et augmentera la qualité de données transmises à l'ensemble de la communauté scientifique internationale.

## **Chapitre 2 : Stage de Recherche et** Caractérisation des polluants atmosphérique dans la région centre du Loiret à Orléans.

*Ce chapitre est dédié à la présentation du laboratoire ICARE dans lequel j'ai effectué mon stage de recherche, les différents départements et aussi que l'étude de caractérisation de polluants atmosphérique dans la région du Loiret sur le supersite d'Orléans*

## 1. Introduction:

Depuis que l'homme a développé sa capacité à modifier son environnement, il a plus ou moins modifié la nature, la pollution étant le produit de son désir "d'améliorer" sa qualité de vie.

La pollution atmosphérique a été définie comme l'accumulation dans l'air de substances à des concentrations entraînant des dommages réversibles ou permanents aux êtres vivants (Caselli, 1995). Il y a quelques décennies à peine, on pensait que cette pollution n'était produite que par les sociétés industrialisées. Toutefois, au début des années 70, elle est devenue plus pertinente dans les grands centres urbains des pays en développement. Parmi les causes de cette forme d'impact sur l'environnement figurent l'utilisation de carburants impurs, le parc de véhicules, le manque d'entretien, l'intensité énergétique des processus industriels et le manque de réglementation efficace sur la qualité de l'air, entre autres.

Les polluants atmosphériques pris en compte dans les normes internationales de la qualité de l'air sont : les particules en suspension (PS), le plomb (Pb), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les hydrocarbures et les oxydants photochimiques ; les 6 premiers sont émis directement par la combustion, les processus industriels, l'érosion et les incendies. Les oxydants photochimiques, y compris l'ozone (O<sub>3</sub>), sont d'origine secondaire ; ils se produisent dans l'atmosphère à la suite de réactions photochimiques entre des polluants primaires, principalement des oxydes d'azote et des hydrocarbures (Bravo, 1987 ; Quadri de la Torre et Sánchez-Cataño, 1994).

Les particules en suspension PM recouvrent une large gamme de solides et de liquides, divisés en particules subtiles pouvant se disperser dans l'air, les particules inférieures à 10 µm constituent la fraction respirable (PM10) qui, par leurs tailles, peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires (Bravo, 1987 ; Rivero-Serrano et al, 1993).

Dans ce contexte, et dans le cadre du Projet MARSU «MARine atmospheric Science Unravalled» <http://marsu.era-orleans.org>, Mon stage de recherche a été effectué au sein

du département ICARE (Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement) au laboratoire de recherche du CNRS Orléans (Centre National de la Recherche Scientifique). Ce laboratoire de recherche est divisé en 6 équipes indépendantes dont l'équipe de Réactivité Atmosphérique (RA) dans laquelle j'ai été intégré afin d'effectuer ce stage de recherche sur deux périodes : la première du 30 Septembre 2016 au 15 Juin 2017 et la deuxième du 01 Novembre 2017 au 15 Février 2018.

Afin de pouvoir trouver des solutions pour réduire cette pollution atmosphérique qui détruit notre planète il est important d'avoir une très bonne connaissance des composés présents dans l'atmosphère et de l'ensemble des réactions qui s'y déroulent. C'est pour cela qu'aujourd'hui des départements de recherche comme ICARE sont aussi intéressants, actuels et indispensables.

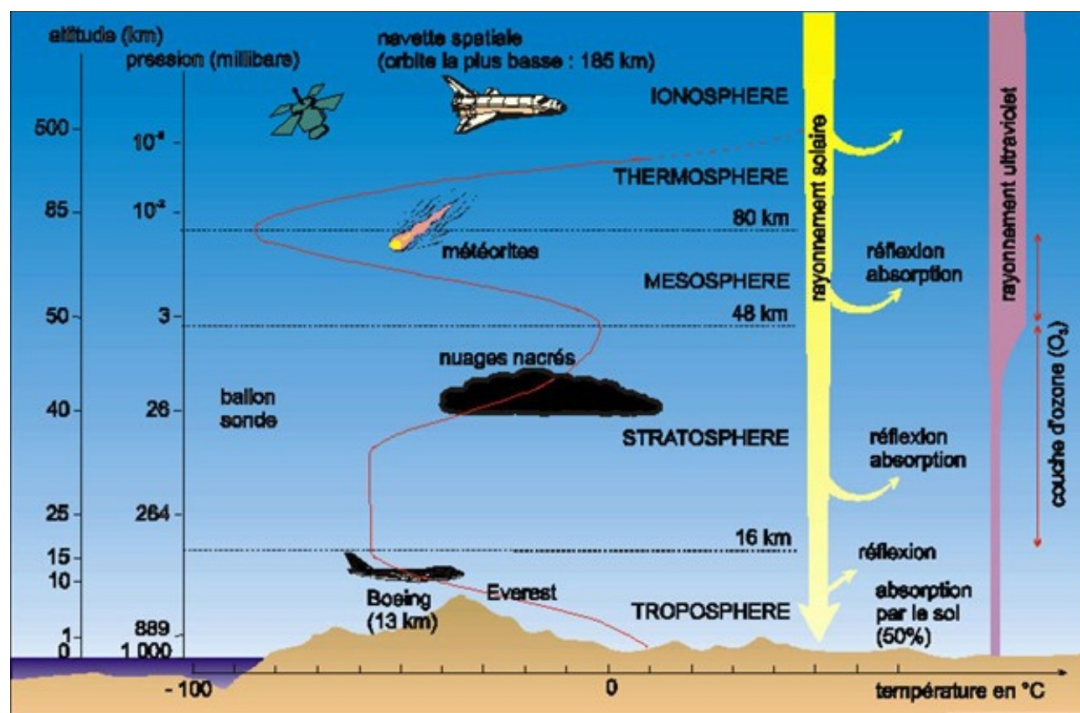
Ce deuxième chapitre va exposer le bilan du stage de recherche que j'ai effectué au centre national de recherche scientifique au CNRS d'Orléans. Dans laquelle je vais présenter, la plateforme Supersite Voltaire. Je poursuivrais en exposant la partie instrumentale, A travers le chapitre suivant je rentrerais dans le vif du sujet en présentant les mesures faites sur le Supersite-Voltaire tel que l'acide nitreux (HONO) mesuré par le LOPAP, les mesures obtenues par AIM (l'Ambiant Ion Monitor), avec les concentrations des différents constituants collectées sur cette plateforme et sur lesquels j'ai essentiellement travaillé durant cette période, on utilise les différents instruments de mesures existants sur le Supersite Voltaire.

## **2. Mise en situation contexte :**

Les différents constituants concernés dans ce travail sont présents dans l'atmosphère et plus particulièrement dans la troposphère (couche comprise entre surface terrestre et la tropopause 8 à 18 km d'altitude avant la stratosphère) (figure 2.14).

Les polluants principaux connus et identifiés sont les particules fines (poussières, fines, particules en suspension...), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), la famille des  $\text{NO}_x$  ou oxydes d'azotes, le monoxyde de carbone  $\text{CO}$ , les métaux lourds, les Composés Organiques Volatils (COV) et semi volatils (COSV), les gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ , etc.).

Ces composés seront principalement sous forme gazeuse même si parfois on peut rencontrer certains composés en phase condensée ou particulaire.



**Figure 2. 6** : les différentes couches, avec l'altitude depuis la surface terrestre jusqu'au l'Ionosphère.

La majorité des réactions chimiques ayant lieu dans la troposphère font intervenir des espèces radicalaires et des oxydants. Ceux-ci sont produits par photolyse du rayonnement solaire des polluants secondaires comme  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{HCHO}$  le formaldéhyde ou bien l'acide nitreux  $\text{HONO}$ .

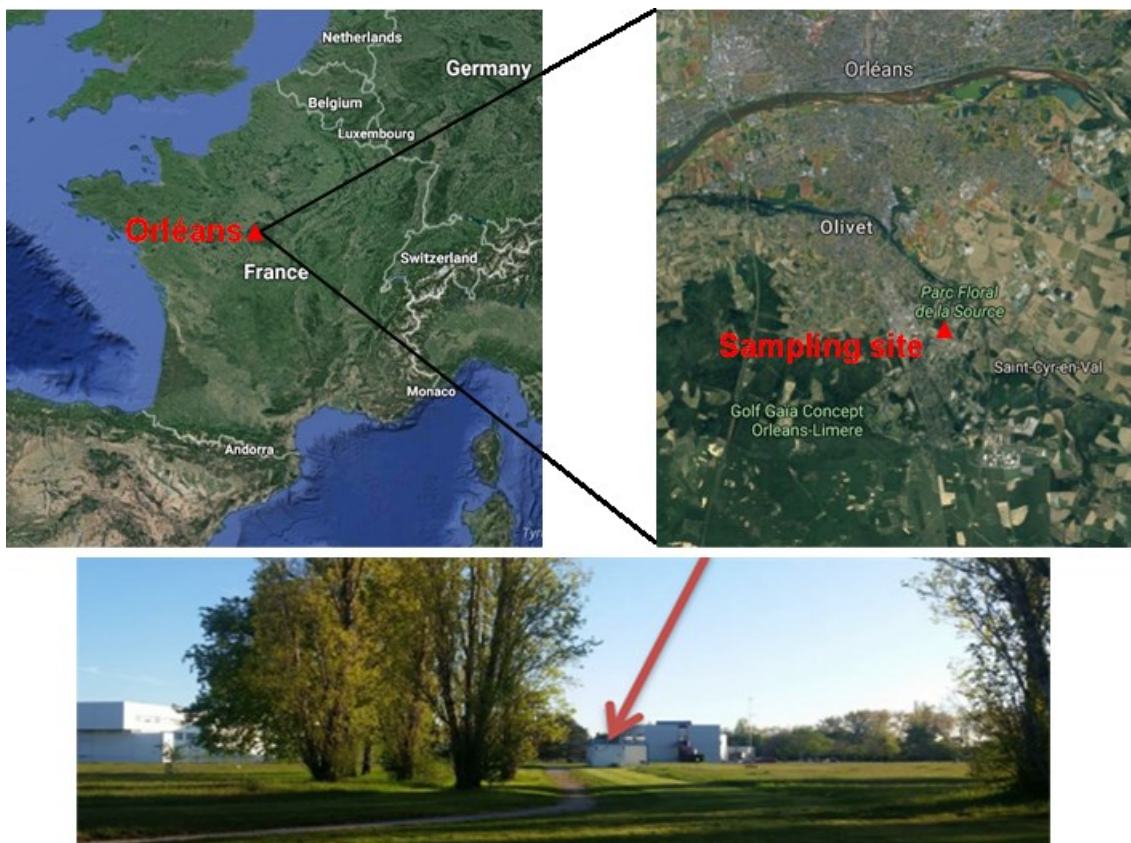
Le rayonnement solaire est une lumière émettant principalement du proche ultraviolet à l'infrarouge. Cependant, ce rayonnement est fortement absorbé par les composés de l'atmosphère comme l' $\text{O}_3$  et l' $\text{O}_2$ . Le spectre lumineux émis est alors modifié par ces composés et arrive à la surface terrestre avec un spectre ayant une longueur d'onde minimale de 290 nm. Ce rayonnement crée et perpétue les réactions photochimiques dans la troposphère, car en effet, toutes les molécules absorbent la lumière dans ce domaine de longueur d'onde est ainsi éventuellement capable de se photolyser.

**Qu'est-ce qu'une photolyse ?** : - On appelle photolyse toute réaction chimique dans laquelle un composé chimique est décomposé par la lumière. Le processus direct est défini comme l'interaction d'un photon inter-réagissant avec une molécule cible.

### 3. Supersite Voltaire :

#### 3.1 Description :

Ce site est destiné à la surveillance de la qualité de l'air et la caractérisation des polluants atmosphériques. Le projet est piloté par Abdelwahid Mellouki pour la partie chimique, et Nathalie Huret pour la partie météorologique. La station est implantée sur le campus du CNRS entre le LPC2E et le laboratoire ICARE (Figure 2.7).



**Figure 2. 7 :** La situation géographique du supersite Voltaire à Orléans la source.

L'installation de la station du SUPER SITE VOLTAIRE a commencé en 2012 par le laboratoire LPC2E avec comme responsable S. Chevrier. L'ensemble des capteurs ont été déployés à partir de 2013. L'acquisition et le stockage des données des différents instruments météorologiques sont effectués grâce à des ordinateurs local présent

dans le container du SUPER SITE sous la responsabilité du laboratoire LPC2E. L'organisme Lig'Air pilote les instruments chimiques. Les données chimiques font partie du réseau de surveillance de la qualité de l'air.

La partie recherche et analyse constitue des deux instruments : LOPAP (Analyseur HONO), et AIM (Ambient Ion Monitor), sont piloté par le Groupe RA sous la direction du professeur Abdelwahid Mellouki. Et qui font partie de mon stage de recherche.

Trois phases de développement du SUPER SITE ont été prévues. La première concernait le déploiement instrumental en juin 2013, autrement dit le montage et l'installation des différents capteurs. La seconde phase s'est déroulée principalement entre 2013 et 2014, le but étant d'ajouter de nouveaux capteurs afin d'améliorer la station et valider les mesures météorologiques.

Enfin, la dernière phase consiste à installer des instruments destinés à la recherche scientifique non seulement la surveillance de la qualité de l'air, comme le LOPAP et l'installation récente d'un nouvel instrument AIM qui détecte les gaz et particules soluble dans l'eau qui présente dans l'air.

### **3.2 Instrumentation :**

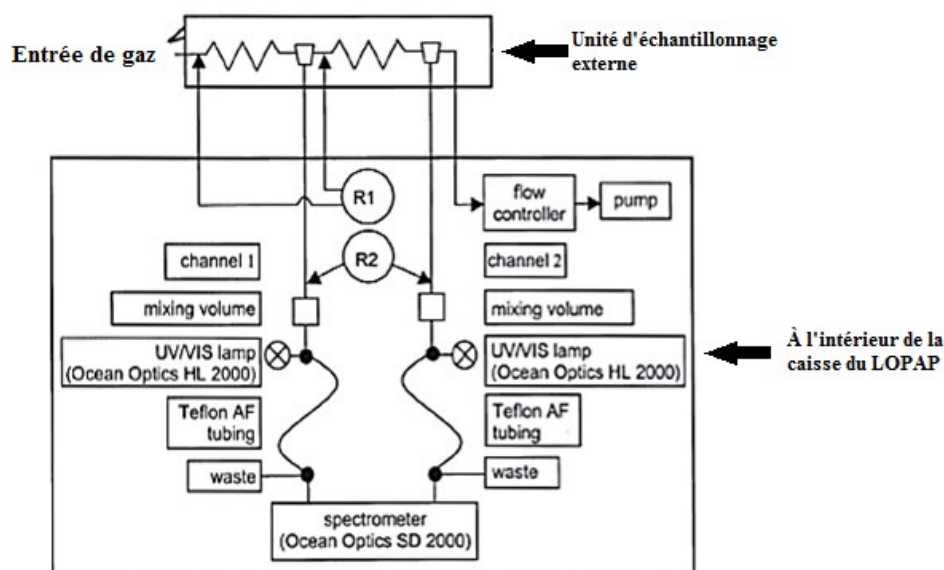
Le Supersite Voltaire assure des mesures en continu des différents constituants atmosphérique existe dans l'air, notamment les gaz polluants comme O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> et particules PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub> dans la région centre val de la Loire. Pour ceci le site est équipé d'un parc instrumental très développé, contenant des moniteurs pour la surveillance de la qualité de l'air à Orléans contrôlés par le LigAir (une association française, qui assure la surveillance de la qualité de l'air en région Centre-Val de Loire), et d'autres instruments de recherche scientifique contrôlés par le laboratoire ICARE. Parmi ces instruments, on peut citer :

- Aethalometre AE33, Analyseur Black Carbone
- Moniteur de particule PM<sub>10</sub> BAM 1020
- O342E, Analyseur d'Ozone Serie-e
- AC32M, analyseur des oxydes d'Azote, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>X</sub>

- AF22E, analyseur de dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> serie-e
- Station météorologique
- LOPAP
- Ambient Ion Monitor AIM

Les deux derniers instruments de mesure (LOPAP/AIM) sont plutôt dédiés à la recherche scientifique et sur lequel j'ai effectué mes travaux de mesures, ont utilisant aussi les différents paramètres mesurés pour l'interprétation des résultats.

### 3.2.1 LOPAP :



*Figure 2. 8 : Dispositif expérimental (LOPAP)*

Le radical OH est un moteur de la chimie troposphérique. Il est issu de plusieurs voies de formation : la photolyse de l'ozone, la photolyse du formaldéhyde, la photolyse de l'acide nitreux. Si les mécanismes de formation cités sont bien compris, l'implication de l'acide nitreux dans certains processus de la photochimie oxydante reste encore à quantifier. En effet, ce composé est responsable de l'augmentation des radicaux OH pendant le début de la journée suite à sa photolyse rapide, ses processus de production/destruction sont toujours mal compris/cernés. La connaissance de ces différents processus qui font varier le bilan de l'acide nitreux atmosphérique passe par la mesure de ce composé et de ses précurseurs potentiels.

Afin de quantifier la concentration de ce polluant, un appareil de mesure a été élaboré : le LOPAP (Heland et al. 2001; Kleffmann et al. 2003). Celui-ci comprend deux voies :

la première relative à la mesure de l'acide nitreux, la deuxième à celle de l'acide nitrique. Le principe de mesure est celui adopté par [Huang et al. \(2002\)](#), basé sur le piégeage des composés gazeux, sur un support liquide, dans un tube à écoulement en forme de serpentin. Le contact et l'échange air/liquide se fait à l'intérieur de ce tube. La solution de nitrite obtenue sur la première voie est obtenue grâce à une solution de sulfanilamide/N-(1-naphtyl) éthylènediamine en milieu acide. Les ions nitrates obtenus sur la deuxième voie sont réduits en nitrite. La différence entre les signaux résultant du stripping dans chaque bobine fournit un signal HONO sans interférence ([Heland et al., 2001](#)). L'analyse est effectuée par un spectrophotomètre UV-Visible à 550 nm, en utilisant une longueur de trajet optique de 5 mètres.

L'air a été échantillonné à un débit de 1 L min<sup>-1</sup>, et le débit de la solution de stripping était de 0,17 ml/min. Les étalonnages ont été effectués toutes les semaines. Les écarts relatifs du signal d'étalonnage étaient respectivement de 3 et 9% pour les canaux 1 et 2 (figure 1.8). La limite de quantification de l'instrument LOPAP utilisé dans cette étude est de 1,5 (pptv) (prise comme 10% de toutes les mesures nulles effectuées en échantillonnant du N<sub>2</sub> pur) avec une résolution temporelle de 9 min.

### 3.2.2 Ambient Ion Monitor 'AIM' :



*Figure 2. 9 : AIM (droite) et le chromatographe des ions (gauche), photo de l'intérieur des systèmes*

Le moniteur URG-9000D des ions ambiants (AIM) (figure 2.9) offre une mesure directe résolue en temps des particules et des gaz présents dans les PM de taille  $2,5\mu\text{m}$  ou  $10\mu\text{m}$ . L'AIM sépare et analyse chaque ion individuellement en incorporant la méthode d'analyse éprouvée de la chromatographie ionique. L'entrée du cyclone est un filtre de  $2,5\mu\text{m}$  à un débit de  $3\text{ L / min}$ . La limite de détection de l'AIM est de  $0,1\mu\text{g}$  par mètre cube, comme la limite de détection dépend de l'ion mesuré, la limite de détection peut être aussi basse que  $0,05\mu\text{g}$  par mètre cube.

L'AIM aspire l'air à travers un cyclone de filtrage de  $\text{PM}_{2.5}$  pour éliminer les plus grosses particules du flux d'air. Le moniteur incorpore alors plusieurs composants pour réaliser des mesures directes continues. L'échantillon est aspiré à travers une diffusion liquide 'Denuder' où les gaz acides interférant et basiques sont éliminés.

Afin d'atteindre des rendements de collecte élevés, le flux d'air chargé de particules pénètre ensuite dans la chambre de super-saturation d'aérosol pour améliorer la croissance des particules. Un séparateur de particules inertielles recueille ces particules agrandies, et il les stocke ensuite dans un collecteur d'échantillons d'aérosol, jusqu'à ce que les particules puissent être injecté dans le chromatographe ionique. L'échantillonneur peut collecter et analyser jusqu'à 10 jours sans surveillance ; cette période peut être prolongée, si nécessaire, en utilisant des réservoirs de solution plus grands. Les données sont automatiquement analysées toutes les heures (avec une analyse optionnelle de 15 ou 30 minutes en fonction de la configuration). L'échantillonneur AIM rapporte les résultats finaux en microgrammes par mètre cube, avec une limite de détection de  $0,1\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ou moins).

L'AIM peut être utilisé en tant qu'appareil autonome ou en rack, et se compose de plusieurs configurations différentes pour des besoins d'échantillonnage spécifiques. Le système de surveillance des ions ambiants est configuré avec un chromatographe ionique (CI) (figure 2.9) pour fournir des mesures directes de nitrate, de sulfate, de nitrite, de phosphate et de chlorure d'anion présents dans les  $\text{PM}_{10}$ , ainsi que du chlorure d'hydrogène en phase gazeuse. , L'acide nitreux et le dioxyde de soufre. Avec l'ajout d'un deuxième IC, le moniteur d'ions ambiants fournira également des mesures directes

résolues en temps de l'ammonium, du sodium, du calcium, du potassium et du magnésium, ainsi que de l'ammoniac en phase gazeuse.

## **4. Résultats de mesure sur le Supersite Voltaire :**

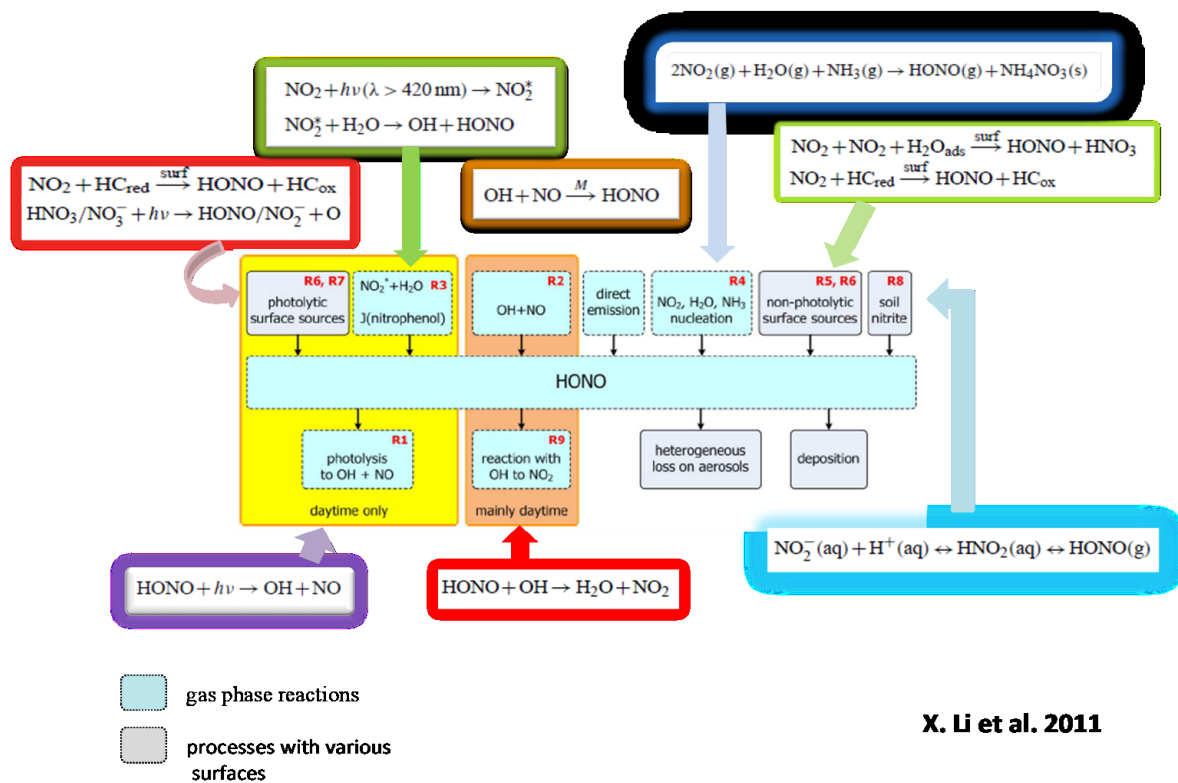
### **4. 1 HONO :**

#### **4.1.1 Source d' HONO :**

L'identification et l'évaluation des différentes sources de HONO sont devenues cruciales pour la reconnaissance de la chimie actuelle du HONO (VandenBoer et al., 2014a). Le HONO ambiant provient non seulement de l'émission primaire, mais aussi de la formation secondaire. La source HONO prédominante varie selon les lieux et les périodes. Dans les villes, une forte proportion de HONO est émise par les gaz d'échappement des véhicules, en particulier pendant les heures de pointe. Par contre dans les zones rurales ou les forêts, les nitrites et les bactéries du sol constituent une source d'émission importante (Su et al., 2011; Oswald et al., 2013).

Dans la plupart des cas, les réactions chimiques des oxydes d'azote et/ou d'autres composés contenant de l'azote produisent plus de HONO. Parmi eux, le processus hétérogène de  $\text{NO}_2$  sur les surfaces disponibles qui est considéré comme la source de formation dominante (R5) (figure 2.10).

Des études en laboratoire et sur le terrain ont montré qu'une quantité importante d'HONO dans l'air ambiant est convertie à partir de  $\text{NO}_2$  sur des surfaces mouillées telles que les aérosols atmosphériques (poussières minérales, suie, sulfates, produits organiques, etc.), au sol, sur les plantes, en mer et dans la neige, avec des mécanismes différents. et taux de conversion (Zhou et al., 2001; Herrmann et al., 2010; Khalizov et al., 2010; Bedjanian et El Zein, 2012; Zha et al., 2014). En outre, d'autres réactions homogènes et hétérogènes et la photolyse de surface impliquant  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{HNO}_3$  contribuent également à l'HONO ambiant dans certaines conditions spécifiques (Li et al., 2012; Liu et al., 2014) (figure 2.10).



**Figure 2. 10 :** Diagramme du budget et de source du HONO dans la troposphère. Li et al.2011

Les boîtes en bleu clair se réfèrent aux réactions en phase gazeuse, tandis que les boîtes grises se réfèrent à des processus avec différentes surfaces impliquées. Les réactions dans le cadre jaune nécessitent un rayonnement solaire et ne se produisent donc que pendant la journée. Lorsqu'il existe une quantité significative de radicaux OH et de NO, les réactions dans le cadre orange clair se produiront également la nuit.

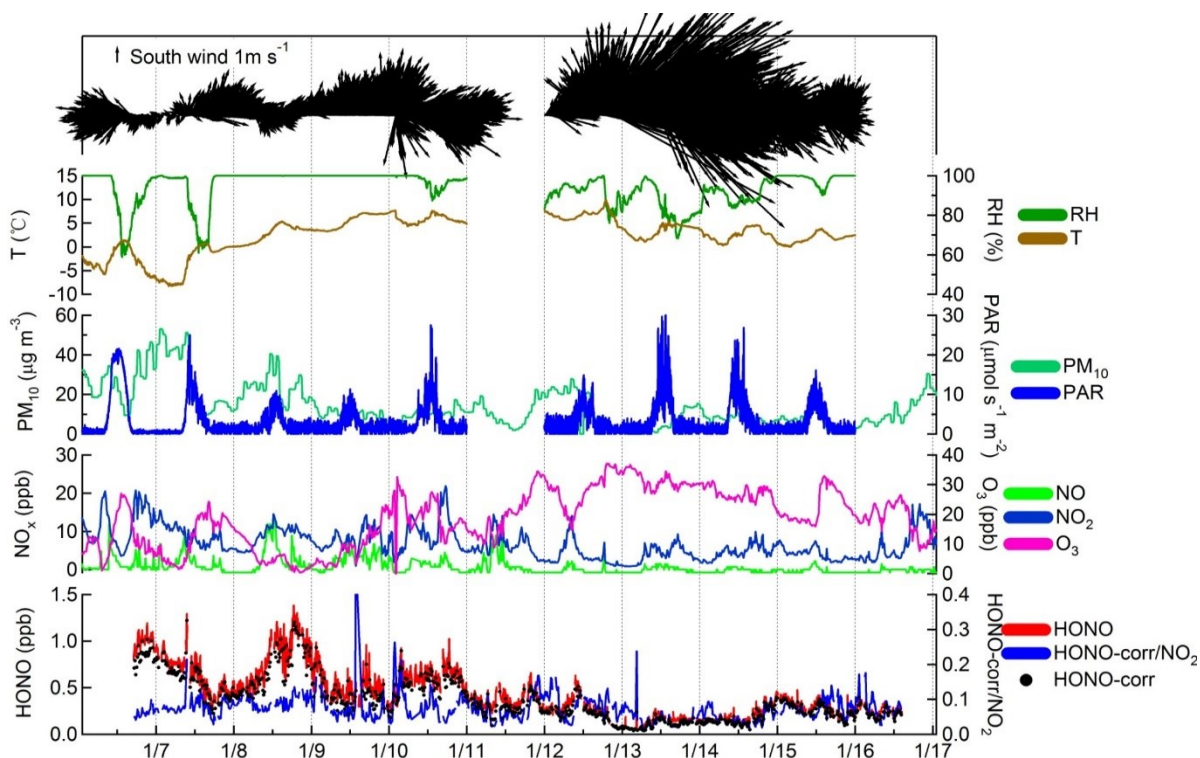
### 4.1.2 Variation d'HONO

Les concentrations moyennes de HONO, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, et leurs rapports, mesurés sur le Supersite d'Orléans, sont énumérés dans le tableau 2.3. Pendant la période de mesure, les valeurs moyennes des rapports de HONO, NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> étaient respectivement de 0,56, 2.9, 8.4 et 14 ppbv. La concentration moyenne des particules PM<sub>10</sub> atteignait 20,2 µg m<sup>-3</sup>. Le rapport molaires ou en masse moyen de HONO / NO<sub>2</sub>, étai 0,068.

**Tableau 2. 2 :** Les moyennes des gaz HONO, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, et paramètres météorologiques mesurées sur le Supersite Voltaire

	All-time	Day-time (8:00~16:00)	Night-time (16:00~8:00)
HONO (ppb)	<b>0.564±0.377</b>	<b>0.526±0.342</b>	<b>0.582±0.392</b>
NO (ppb)	2.9±8.3	4.1±8.3	5.8±11.1
NO <sub>2</sub> (ppb)	8.4±5.6	7.6±4.0	8.8±6.2
O <sub>3</sub> (ppb)	14±9	16±8	13±10
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	20.2±16	17.6±12.4	21.7±17.9
T (°C)	2.8±3.8	4.5±3.8	1.9±3.4
RH (%)	94.7±9.0	90.1±11.9	97.0±6.0
HONO/NO <sub>2</sub>	<b>0.068±0.045</b>	<b>0.064±0.043</b>	<b>0.069±0.045</b>

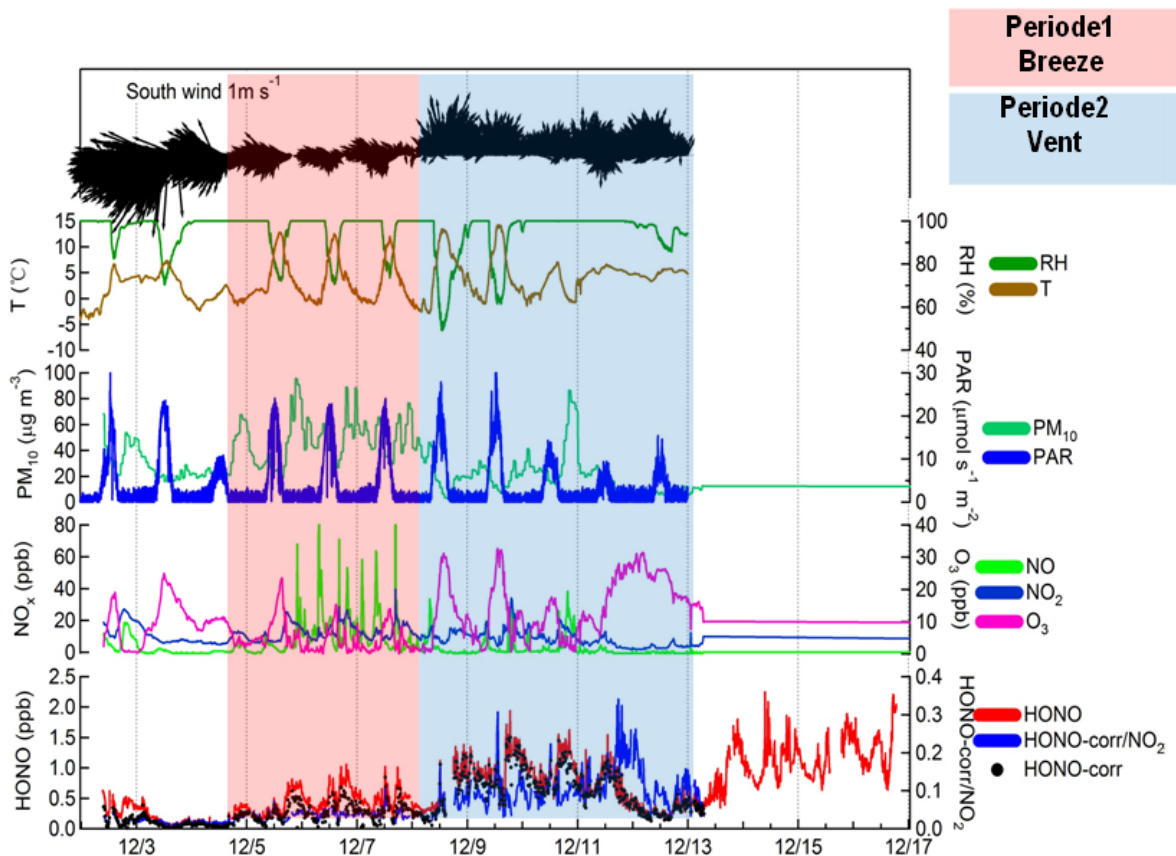
Les variations temporelles des concentrations d'aérosols et de gaz à l'état de trace et les paramètres météorologiques à Orléans la Source sont illustrées dans la figure 2.11. La concentration horaire maximale de HONO était de 1.45 ppbv, ce qui s'est produite à 18 : h 30 (heure locale) le 08 Janvier, les concentrations simultanées de NO, NO<sub>2</sub> et de PM<sub>10</sub> étant respectivement de 13.2 ppbv, 25.45 ppbv et 50.2 µg /m<sup>3</sup>, respectivement.



**Figure 2. 11 :** Variation chronologique des concentrations de NO, NO<sub>2</sub>, HONO, O<sub>3</sub>, et PM<sub>10</sub>, et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative pendant les périodes d'échantillonnage.

Deux épisodes caractérisés par des vitesses de vent totalement différentes ont été mesurés et illustrés dans la figure 2.12, les concentrations moyennes ont été calculées. La première période, entre le 04 et 08 Décembre, lorsque la vitesse de vent était basse, au cours de cette période, des concentrations basses de HONO (0.404 ppb) et O<sub>3</sub> (4 ppb) ont été observées et des hautes concentrations des PM<sub>10</sub> (49.4 ppb) et NO (13 ppb). Par contre pour la période où la vitesse de vent est forte entre le 08 et 12 Décembre, nous avons remarqué une forte concentration de HONO (0.65 ppb) et O<sub>3</sub> (15 ppb) et une faible concentration des PM<sub>10</sub> (19.5 ppb) et NO (2.3 ppb) (Tableau 2.3).

Pour la première période, de très faibles concentrations de HONO, associées à des concentrations élevées de NO<sub>x</sub> et de PM<sub>10</sub>. Cela est associé à des conditions météorologiques spéciales caractérisées par une faible vitesse de vent, un rayonnement solaire intense (indiqué par une bonne visibilité) et à des concentrations relativement élevées d'oxydants atmosphériques, qui accélèrent l'oxydation



**Figure 2. 12 :** Variation chronologique des concentrations de NO, NO<sub>2</sub>, HONO, O<sub>3</sub>, et PM<sub>10</sub>, et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative pour deux période de vent..

**Tableau 2.3** : Les Paramètres mesurées pendant les deux périodes de vent

Period	1	2	Period	1	2
Type of air mass	Local	Transported	Type of air mass	Local	Transported
Start	04/12/2019 18:00	08/12/2019 07:00	PAR_Den( $\mu\text{mol/s/m}^2$ )	4.3	3.8
End	08/12/2019 06:59	12/12/2019 23:59	WS(m/S)	0.5	0.9
HONO (ppb)	0.404	0.653	WD	92.8	172.4
NO(ppb)	11.2	2.3	BP(mbar)	1027.7	1028.2
NO <sub>2</sub> (ppb)	13	8.7	HONO/NO <sub>2</sub>	0.034	0.091
O <sub>3</sub> (ppb)	4	15	HONO-corr(ppb)	0.249	0.583
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g/m}^3$ )	49.4	19.5	HONO-corr/HONO	0.529	0.774
T(°C)	2.9	4.6	HONO-corr/NO <sub>2</sub>	0.02	0.083
RH(%)	95.6	93.3	HONO-corr/PM <sub>10</sub>	0.005	0.038

Pour séparer le HONO secondaire [HONO]corr, issu des procédés chimiques, des émissions directes provenant principalement des voitures, nous avons utilisé un taux d'émission [HONO] / [NO<sub>x</sub>] de 0,8% pour une flotte moyenne en France, nous avons pris la plus grande valeur. Presque la moitié de l'HONO dans la masse d'air locale a été produite à partir du véhicule. Les concentrations de HONO et la valeur de HONOcorr/NO<sub>2</sub> dans la masse d'air transportée étaient supérieures à la masse d'air locale. Donc la deuxième formation est la principale source de HONO.

#### 4.1.3 Conversion du NO<sub>2</sub> en HONO sur la surface des aérosols :

Le rendement de conversion du NO<sub>2</sub> en HONO sur la surface des aérosols serait favorisé par une humidité relative élevée, presque sans corrélation avec T, et serait plus faible dans des conditions de concentration de PM<sub>10</sub> plus élevées. Ces aérosols moyen en surface n'étaient pas seulement la source de production d'acide nitreux, mais aussi un moyen important de perte de HONO pendant la nuit (voir figures 2.13) :

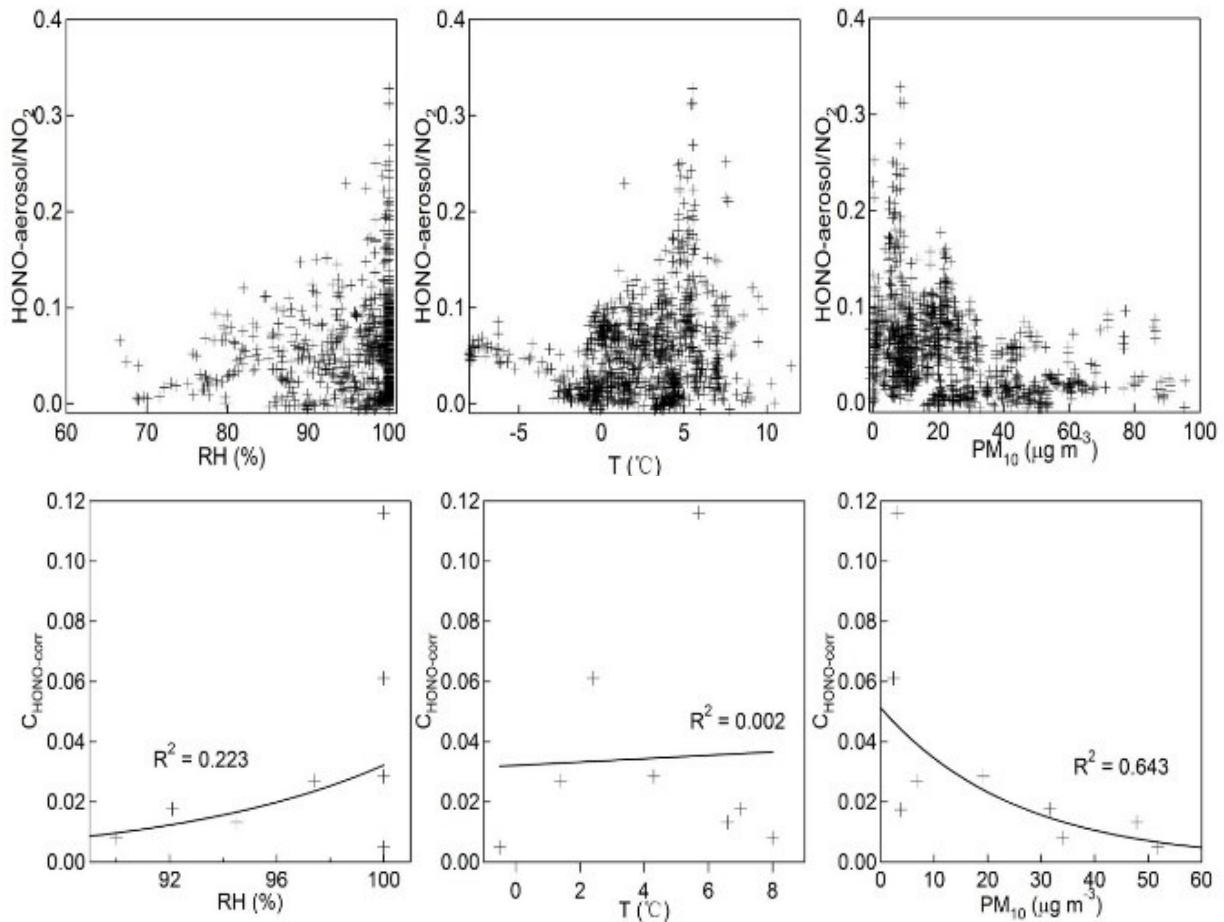
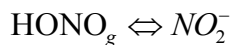


Figure 2.13 : Facteurs influés sur la concentration de HONO

Pendant la période de de forte concentration de HONO, le taux de formation de HONO serait également plus élevé dans des conditions caractérisées par une HR plus élevée, et d'une faible concentration PM<sub>10</sub>.

Relation d'équilibre entre HONO gazeux et NO<sub>2</sub> particulaire peut être un facteur important pour influencer la concentration d'HONO :



La concentration de HONO<sub>corr</sub> a été calculé ont utilisons la forme suivante :

$$C_{HONO-corr} = \frac{HONO_{corr\_t2} - HONO_{corr\_t1}}{NO_2 * (t_2 - t_1)}$$

Pour calculer HONO aérosols on utilise les formes suivantes :

**HONO-corr = HONO-obs. - NO<sub>x</sub>\*0.008**, avec un taux d'émission de 8% (Kurtenbach et al., 2001), et on a aussi :

**HONO-emission = NO<sub>x</sub>\*0.008**, source primaire du véhicule (Kurtenbach et al., 2001).

$$\text{HONO-ground} = C \cdot \text{NO}_2 \cdot V_{\text{NO}_2} / V_{\text{HONO}}$$

$C = 0.03$ ,  $V_{\text{NO}_2}$  (Deposition rate) = 0.1 cm/s,  $V_{\text{HONO}} = 0.5$  cm/s

formation hétérogène à la surface du sol (Stutz et al., 2002; Seinfeld and Pandis, 1998)

Donc on peut déduire l'HONO formé hétérogènement à la surface de l'aérosol.

$$\text{HONO-aerosol} = \text{HONO}_{\text{obs.}} - \text{HONO}_{\text{emission}} - \text{HONO}_{\text{ground}}$$

#### 4.1.4 La variation journalière :

La concentration de HONO mesurée sur le supersite voltaire ne présente aucune variation journalière évidente, peut-être à cause d'une faible photolyse au cours de la journée. Deux pics sont apparus à environ 10 heures (0,735 ppb) et À partir de la fin de l'après-midi, les concentrations d'HONO ont commencé à augmenter et ont atteint un petit pic (valeur moyenne maximale de 0,834 ppbv) vers 18:00 heures (figure 2.14). Bien que la structure diurne de  $\text{NO}_2$  soit semblable à celle de HONO, l'apparition d'un pic de concentration et d'une vallée est survenue à 9:00 et à 17:00, une heure avant celle de HONO.

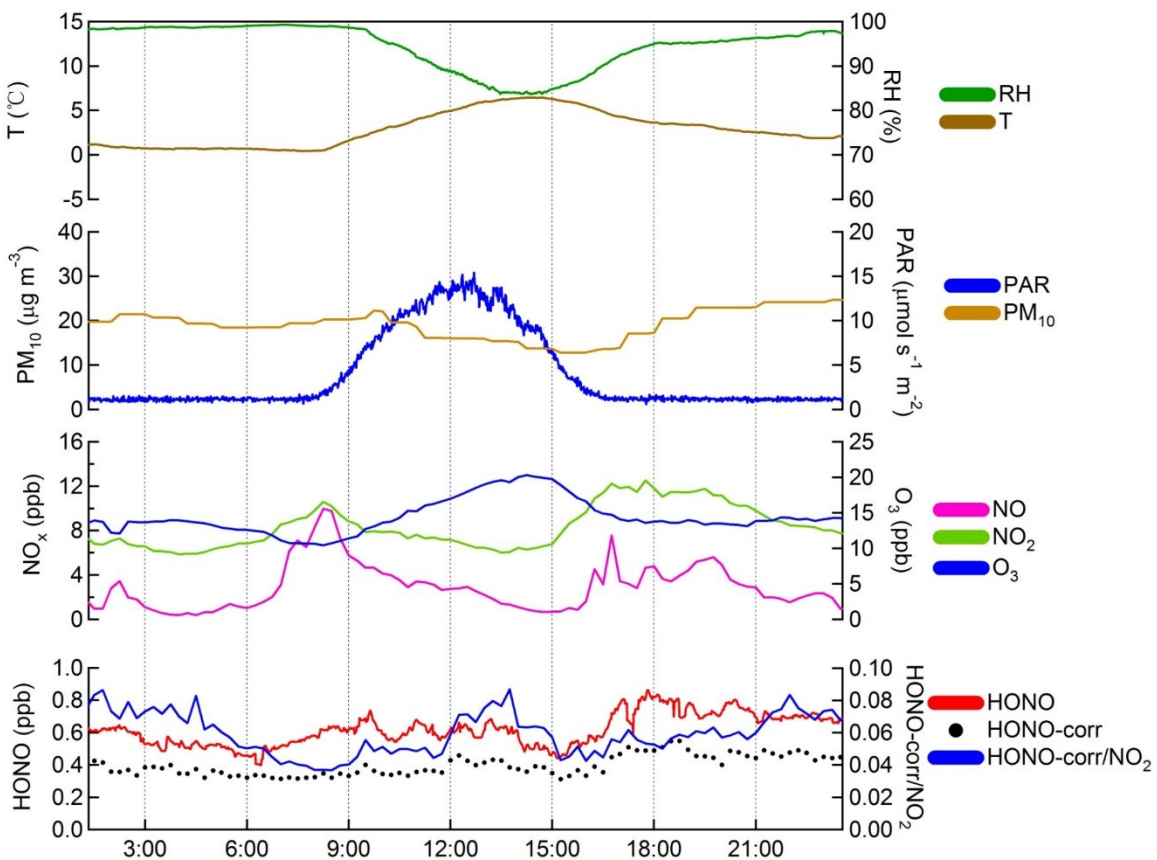


Figure 2. 14 : Variation journalière des concentrations de NO, NO<sub>2</sub>, HONO, O<sub>3</sub>, et PM<sub>10</sub>, et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative

## 4.2 Ambient Ion Monitor AIM :

### 4.2.1 Software :

Le software d'AIM Chromeleon permet un contrôle sans faille de l'AIM avec ce logiciel puissant. Les données AIM et IC sont stockées dans une même base de données et peuvent être exportées à l'aide de modèles de rapport personnalisables. Les mises à jour du firmware sont facilement téléchargeables via Chromeleon. Nous pouvons contrôler complètement l'AIM à partir d'un panneau d'accueil convivial (Figure 2.15). Depuis ce panneau d'accueil, les utilisateurs peuvent rapidement vérifier si l'AIM fonctionne correctement.

Les conditions pré-mesure vérifient automatiquement les méthodes de l'instrument pour s'assurer qu'elles sont correctement configurées avant l'utilisation. Une fois les données traitées, le logiciel recalcule automatiquement les données en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

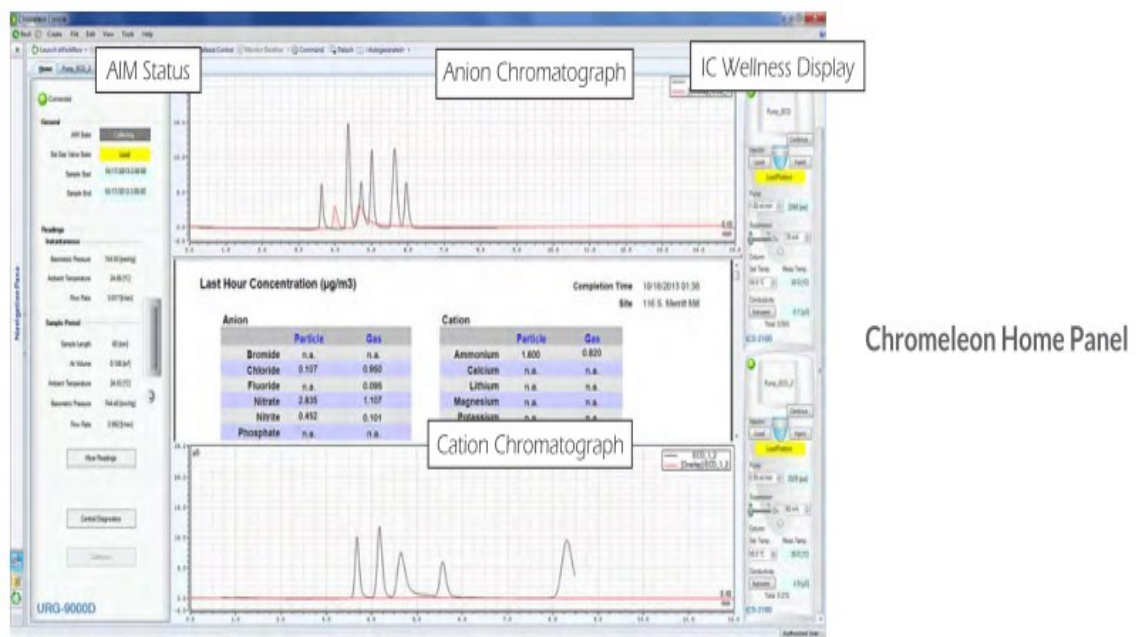


Figure 2. 15 : Panneau d'accueil du Software Chromeleon

### 4.2.2 Calibration :

Les moniteurs d'ions ambiants nécessitent un étalonnage périodique. L'AIM est étalonné en deux parties, l'étalonnage de l'échantillonneur AIM et l'étalonnage du chromatographe ionique. Après le calibrage initial, le système nécessite un calibrage

tous les trois mois. L'échantillonneur doit pouvoir fonctionner pendant environ 30 minutes avant de commencer les procédures d'étalonnage. Cela permettra au système de se stabiliser aux conditions de fonctionnement.

L'étalonnage de l'AIM nécessite la solution d'étalonnage anionique, aussi tout l'équipement et les matériaux nécessaires pour préparer les solutions d'étalonnage anionique et cationique, et les instructions pour la préparation de ces solutions. Cette préparation des solutions d'étalonnage prendra environ une heure, et une fois les solutions d'étalonnage préparées, l'étalonnage des CI prendra environ 3 heures.

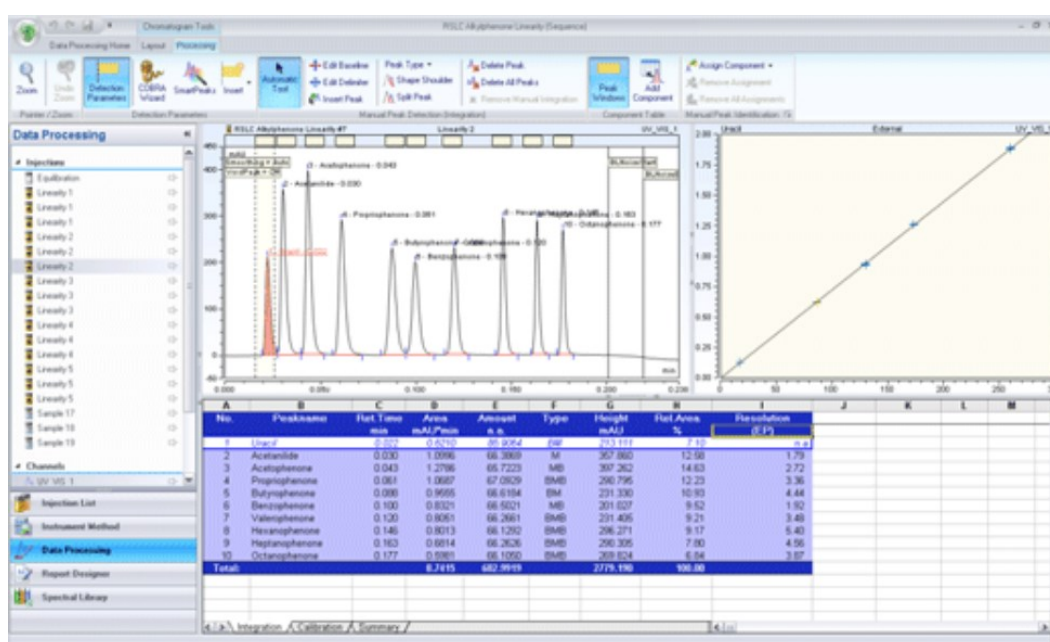


Figure 2. 16 : Courbe d'étalonnage de l'AIM

La figure 2.16 ci-dessus montre l'exemple d'une courbe d'étalonnage à 5 points créée dans le logiciel IC Chromleon. Les points de données peuvent être validés par :

- Affichage des chromatogrammes IC pour s'assurer qu'ils semblent raisonnables
- Affichage des valeurs de température, de pression et de volume signalés pour s'assurer qu'ils semblent raisonnables
- Effectuer un étalonnage en 5 points une fois par 3 mois avec les normes traçables
- Vérification du débit une fois par semaine pour s'assurer qu'il se situe à moins de 5% du point de consigne
- Calibrer les capteurs de température et de pression une fois par 3 mois.

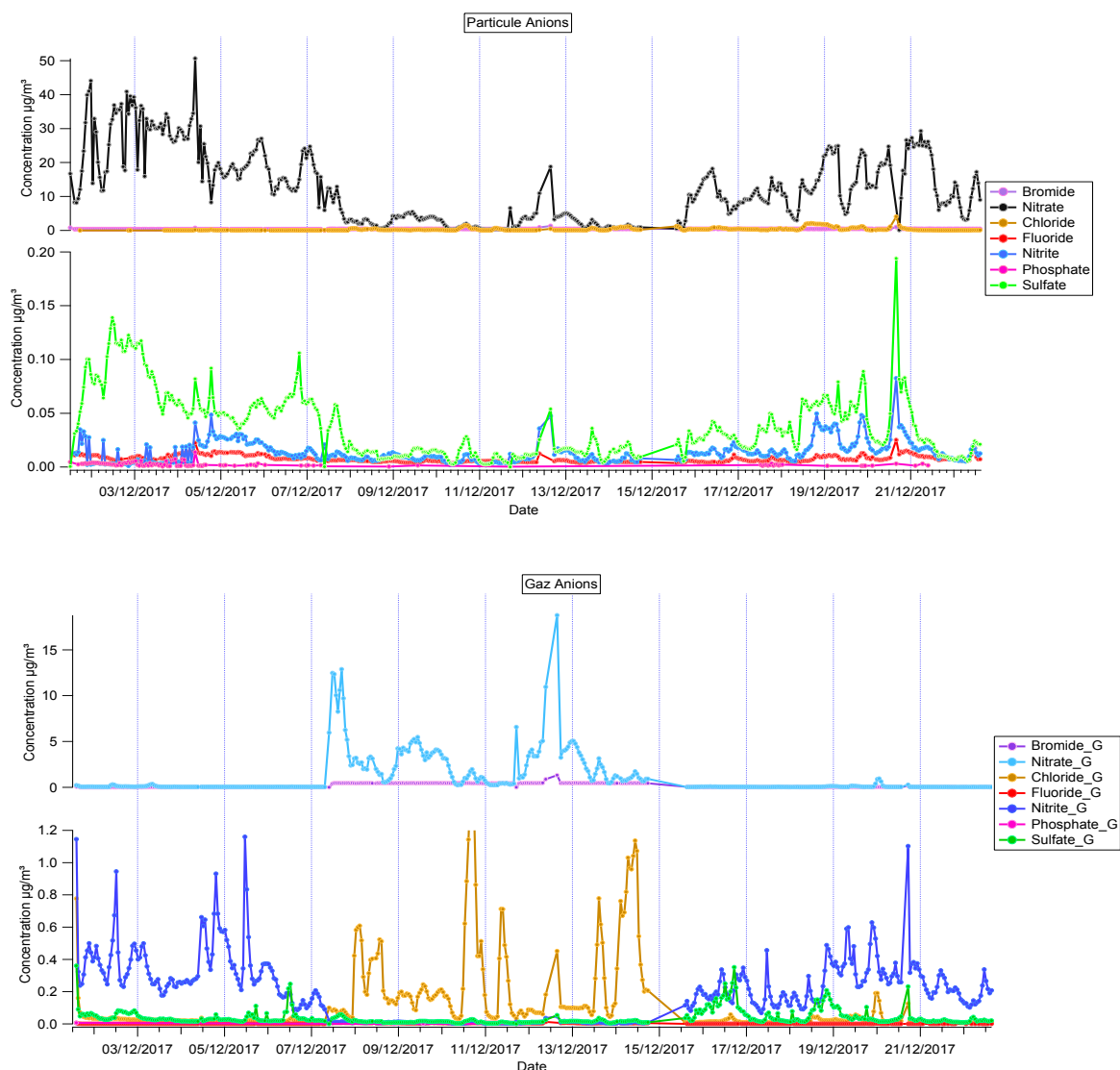
### 4.2.3 Quelques résultats de l'AIM :

Dans ce travail, nous présentons les résultats de la caractérisation et de l'optimisation approfondies du système de chromatographie ionique par moniteur d'ions ambiant (AIM-IC), un instrument mis au point par URG Corp et Dionex Inc. Les mesures ont été effectuées sur le Supersite Voltaire au CNRS d'Orléans. Le tube de prélèvement de l'air ambiant a été fixé à 3 mètres du sol, avec un débit de 3 L/min. Le Supersite était équipé de cet analyseur en ligne AIM (Ambiant ion Monitor) pour le contrôle des concentrations des aérosols et des gaz et aussi pour caractériser les composés organiques volatils qui peuvent être détectés sur ce site. Afin de mesurer simultanément et chaque heure, la composition chimique hydrosoluble de fines particules atmosphériques (PM<sub>10</sub>) et les gaz précurseurs associés.

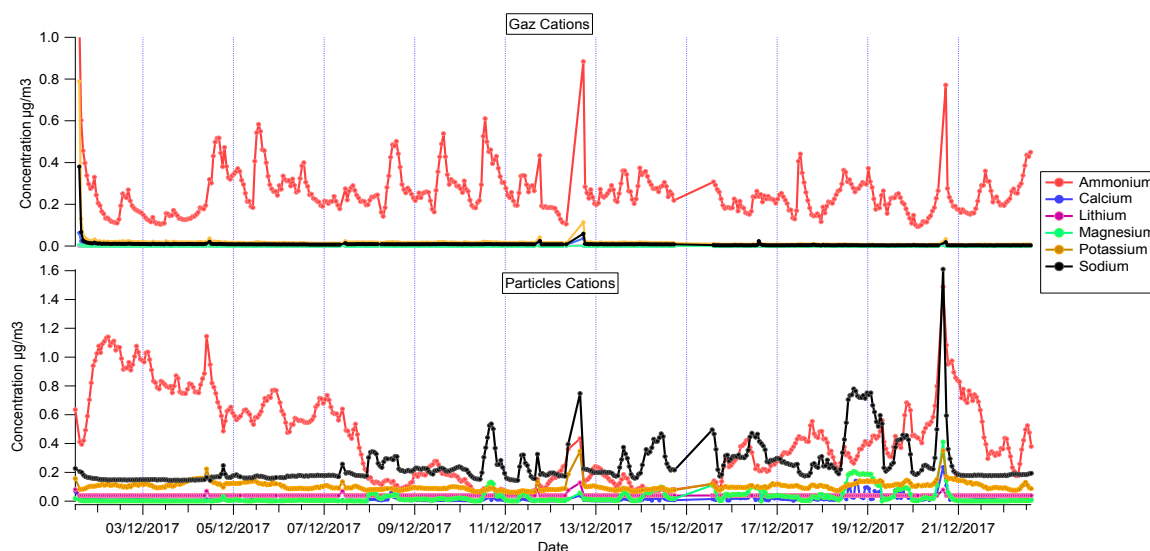
L'ensemble d'échantillonnage de l'AIM-IC comprend un ensemble de sélection granulométrique à inertie, un dénudeur humide à plaques parallèles (PPWD) pour la collecte des gaz solubles dans l'eau et une chambre de super-saturation des particules (PSSC) pour la collecte des particules en parallèle. L'interprétation des résultats recueillis pourrait se faire par comparaison avec ceux recueillis par certains instruments de mesure des gaz (HONO, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>) et avec les données météorologiques enregistrées en continu sur le Supersite. Toutes les mesures sont effectuées aux conditions ambiantes.

Les concentrations peuvent refléter le degré de pollution de l'air et la contribution de diverses sources de pollution à la pollution de l'air (Qin Yu et al., 2004). Afin d'analyser le degré de contamination des deux processus et la source de chaque ion, la figure 2.29 indique les concentrations de divers PM<sub>10</sub> solubles dans l'eau (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> et autres) et les gaz précurseurs associés (NH<sub>3(g)</sub>, SO<sub>2(g)</sub>, HNO<sub>3(g)</sub>, HONO<sub>(g)</sub>, HCl<sub>(g)</sub>, etc.) avec une résolution temporelle d'une heure et des limites de détection basses (nmol m<sup>-3</sup>) pendant le mois de Décembre du 2017. Ces résultats sont détectés pour la première fois au super site Voltaire, après quelques mois de formation et des tests de calibration sur ce nouvel instrument de mesure, afin d'obtenir la bonne méthode de détection.

À partir de cette période de mesure, nous avons remarqué que les concentrations sont peu biaisées par rapport à ce qui a été attendu. Donc, la nécessité de refaire les calibrations avec des faibles concentrations adaptées à ce qui était mesuré. Nous avons remarqué aussi que l'efficacité de collecte de l'AIM dépend fortement de la méthode d'étalonnage, puisque nous avons observé l'existence de quelque nouveau pic sur le spectre, et qui peuvent définir certains composés organiques, tels que l'acétate et le formate (Figure 2.17);



**Figure 2. 17 :** Les concentrations des anions gaz et particules mesurées sur Supersite Voltaire au cours du mois de septembre 2017, Les valeurs sont pris pour une heure réparties comme suit : 20 minutes de prélèvement, 20 minutes pour l'analyse de particules et 20 minutes pour l'analyse de gaz.



**Figure 2. 18 :** Les concentrations des cations gaz et particules mesurées sur Supersite Voltaire durant le mois de septembre 2017

La figure 2.18 illustre les résultats typiques de l'AIM après l'étalonnage des deux systèmes d'IC pour la détection des faibles concentrations, Nous avons utilisé les méthodes de filtrage avec les seuils de  $PM_{10}$  pour mesurer la composition chimique des particules et pour la comparer avec les concentrations  $PM_{10}$  mesurés sur le site. Les données de l'AIM sont collectées en continue pendant neuf mois, c-à-d au cours de trois saisons.

D'après ces résultats nous constatons que les principaux ions détectés en saison sèche et humide sont  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  et  $NO_3^-$ . La concentration de  $SO_4^{2-}$  en saison humide était de  $1,57 \pm 0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et la concentration en saison sèche  $1,65 \pm 0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentration en  $NO_3^-$  était la plus élevée pendant la saison humide. Elle était de  $4,12 \pm 2,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et la concentration en  $NO_3^-$  pendant la saison sèche était de  $1,86 \pm 1,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations de  $NH_4^+$  pendant les saisons sèche et humide étaient respectivement de  $1,72 \pm 0,8$  et de  $2,11 \pm 1,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La raison de la concentration élevée de  $NO_3^-$  pendant les saisons sèche et humide était due à la contribution des émissions du trafic et la température élevée en été, et qui a provoqué la volatilisation des nitrates. Pendant la saison humide, les ions  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  et  $NH_4^+$  représentent 71% des  $PM_{10}$ , qui sont les composants principaux des  $PM_{10}$ .

En saison sèche,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  représentent 67% des  $PM_{10}$ , Indiquant que la production d'aérosols secondaires a eu lieu plus d'une fois pendant la saison humide, ce qui signifie le processus de conversion des ions secondaires pour la saison humide.

Pendant la saison humide, le pourcentage des ions solubles dans l'eau dans les  $PM_{10}$  est légèrement supérieur à celui de la saison sèche. La valeur moyenne de la saison humide est de  $10,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et la saison sèche de  $7,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentration du magnésium est de  $0,044 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pendant l'été, cependant, la concentrations de magnésium a augmenté de manière spectaculaire pour atteindre  $0,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pendant la saison humide. Le calcium étant un composé originaire du sol, les concentrations de Ca sur les sites de fond étaient faibles  $0,25 \pm 0,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour toutes les saisons.

Afin de mieux évaluer les performances des mesures obtenues par l'AIM-IC, Les concentrations des particules  $PM_{10}$  ont été comparées aux mesures effectuées par le l'analyseur des  $PM_{10}$  installé sur le supersite Voltaire et contrôlé par Lig'Air Orléans la source pendant 15 jours de mesure (Les résultats d'intercomparaisons sont présentés à la figure 2.19). D'autres mesure de corrélation on était programmée pendant les compagnes de mesures avec le LOPAP pour les concentrations d' HONO, et l'AMS pour les mesures de particules (ammonium, sulfate et nitrate), et aussi d'utiliser l'AIM dans la chambre HELIOS afin d'avoir une meilleure évaluation des mesures et des résultats obtenue.

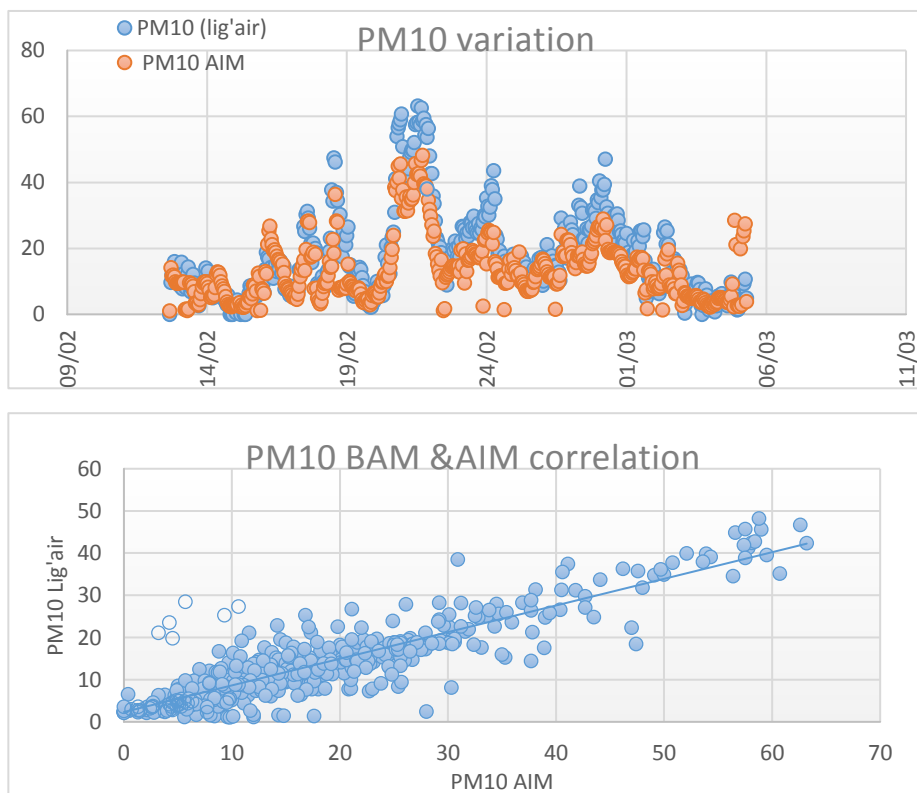


Figure 2. 19 : Corrélation entre AIM et  $PM_{10}$  obtenu par le Lig'Air. <https://www.ligair.fr/station-de-mesure/orleans-la-source-cnrs>

## 5. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le supersite voltaire dans lequel J'ai été principalement impliqué dans les mesures atmosphériques d'une série de polluants. Où j'ai mené un grand nombre d'études en utilisant ce site en effectuant une surveillance quotidienne d'un certain nombre de polluants. J'ai acquis de nouvelles compétences analytiques, d'autre part, les méthodes de traitement de données et l'exploitation des résultats. Cette expertise a été utilisée pour faire fonctionner les instruments de la nouvelle station de recherche atmosphérique ATLAS Mohammed (<https://atlas5.org/>), installé à Ifrane depuis Juillet 2017.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la mise en œuvre des résultats obtenus lors de cette période de stage, notamment les résultats du gaz HONO collectés par le LOPAP, on peut dire que la variation des concentrations de HONO sont indistincte dans cette zone suburbaine à Orléans en France, peut-être suggère une perte faible ou source forte pendant la journée et forte perte à la nuit.

Nous avons constaté que la formation hétérogène sur la surface des aérosols est la principale source d'HONO. L'Aérosol n'est pas seulement la source, mais aussi un moyen important de perte d'HONO pendant la nuit. Le NO<sub>2</sub> particulaire d'AIM (Ambient Ion Monitor) et le HONO gazeux de LOPAP peuvent être utilisés pour étudier la partition de HONO entre la phase gazeuse et la phase particule. Et finalement on peut dire que les données de la concentration en surface de l'aérosol sont nécessaires, pour calculer la vitesse de réaction de la formation de HONO sur l'aérosol dans cette zone.

Nous avons présenté aussi quelque les résultats de l'AIM- IC, qui est un instrument robuste permettant de mesurer simultanément des traces de gaz solubles dans l'eau et les constituants du PM10. Pendant les étalonnages hors ligne, la réponse des deux systèmes à circuit intégré s'est avérée linéaire pour toutes les espèces de gaz et de particules sauf pour l'ammoniac/ammonium dans les plages de concentration qui sont représentatives des conditions ambiantes.

Une nouvelle méthode de traitement adaptée au AIM-IC a été mise au point pour obtenir une bonne résolution des pics afin de séparer les pics de composés organiques détectés.

D'après les concentrations détectées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des composantes collectée au long de cette période à l'aide de l'ambient ion moniteur et le moniteur de particules  $\text{PM}_{10}$  plusieurs choses peuvent être mises en évidence : l'une d'entre elles est la corrélation entre les concentrations d'ammonium et de nitrate, ce qui est évident, la présence de nitrate d'ammonium dans l'air en tant que réservoir principal des deux ions. Lorsque le vent vient du nord (Paris) nous pouvons également voir une forte concentration de divers ions (chlorure, sulfate, ammonium, acétate, nitrate). De même, nous pouvons rapporter ce qui précède à une concentration plus élevée de matière particulaire que l'on peut voir à partir des graphes donnés par le moniteur de particules  $\text{PM}_{10}$ , c'est la cause des concentrations plus élevées des ions mentionnés précédemment.

La surveillance et l'analyse continue de l'air par l'AIM-IC est nécessaire pour limiter davantage l'impact des sources anthropiques et non-anthropiques locales sur la qualité de l'air local.

## **Chapitre 3 :** Station de recherche atmosphérique Atlas Mohammed V.

*Ce dernier chapitre constitue l'un des objectifs de mon stage de recherche, avec l'installation dans le moyen Atlas du Maroc d'une nouvelle station de recherche Atmosphérique 'Atlas Mohammed V', c'est la première station de ce genre dans l'Afrique du Nord, dédiée à la recherche Atmosphérique.*

## 1. Introduction :

Le changement climatique affectera considérablement l'environnement de l'Afrique et le bassin Méditerranéen au XXIème Siècle. Savoir anticiper ces changements par une politique de prévention et d'adaptation est essentiel, mais les choix doivent être pris à partir de connaissances scientifiques solides. Les modèles de prévision climatiques nécessitent d'être validés à partir d'observations. L'Afrique ne dispose à l'heure actuelle que de très peu d'observations fiables de la composition atmosphérique et de son évolution. Le présent projet propose d'engager sur le long-terme, dans le cadre d'une initiative internationale et du programme «Global Atmospheric Watch» de l'Organisation Mondiale de la Météorologie, une activité d'observation de la composition chimique de l'atmosphère à grande échelle, représentative de l'évolution en Afrique. Les observations des propriétés optique et physique de l'aérosol et de certains gaz permettront de comprendre les sources avec une vision régionale voire globale.

Dans ce dernier chapitre, on présente la station Atlas Mohammed V et les études effectués dans cette station installée dans les moyens Atlas du Maroc, afin de découvrir les concentrations des polluants qui affectent la qualité de l'air et les concentrations des gaz à effet de serre. Le chapitre inclut, dans une analyse comparative, les concentrations des gaz à effet de serre à l'échelle internationale. Afin de découvrir les caractéristiques de la politique de contrôle de la qualité de l'air du Maroc face aux futurs problèmes environnementaux. Enfin, la section des conclusions résume les résultats de recherche les plus remarquables et expose les concentrations des principaux facteurs qui influent sur la qualité de l'air et le réchauffement climatique.

La station de recherche atmosphérique Atlas Mohammed V a été développée et mise en situation depuis Juillet 2017 dans le cadre du projet Européen (H2020, RISE/Marie Curie) MARSU « MARine atmospheric Science Unravelled: Analytical and mass spectrometric techniques development and application » ( <http://marsu.era-orleans.org/>). Cette nouvelle station de recherche est opérée en collaborations entre les partenaires du projet : Université Mohammed 5 (Rabat), Centre National de la Recherche Scientifique

(Orléans-France), TROPOS-Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Leipzig-Allemagne) et Fudan University (Shanghai-Chine)), LSCE/CEA (Saclay, France).

La qualité de l'infrastructure ainsi que la particularité de sa localisation font de la station Atlas Mohammed V (<https://atlas5.org/>) un outil exceptionnel de recherche, de coopération scientifique et de rayonnement international. Ainsi, le nombre d'instruments du parc instrumental sur le site de Michlifen passera de 5 en 2017 à une dizaine pendant la campagne de mesure en 2019, avec un nombre accru de réseaux d'observation soutenus, de bases de données alimentées et de collaborations nationales et internationales. En plus du site actuel à Michlifen, deux autres sites instrumentés seront installés, au Nord-Est du Maroc (Tafoughalt) et au Sud du Maroc du côté d'Assa ou à Dakhla. Cet Observatoire pourra, à court terme, intégrer le réseau international GAW et ainsi documentera la variabilité atmosphérique du Sud du bassin Méditerranéen/Afrique du Nord.

La qualité des mesures effectuées à l'Observatoire de Michlifen permettra au site de devenir un site attractif pour l'ensemble de la communauté scientifique marocaine et internationale et permettra aussi d'organiser des campagnes de mesure à l'échelle internationale, tel que la 'campagne Atlas 2019' entre le 15 Septembre et le 15 Octobre, et des colloques internationaux qui seront organisés au Maroc dans la thématique de la recherche atmosphérique tel que 'COMPOLA 2020'. D'autre part, l'installation de cet observatoire permettra un transfert de savoir-faire vers des équipes scientifiques Marocaines pour faciliter leur intégration dans un contexte international surtout que cette thématique n'a été abordée que récemment au Maroc. L'expérience d'activités d'observation similaires dans d'autres régions du monde, montre l'importance de disposer ce type d'observatoire de haute qualité pour développer des collaborations internationales de haut niveau.

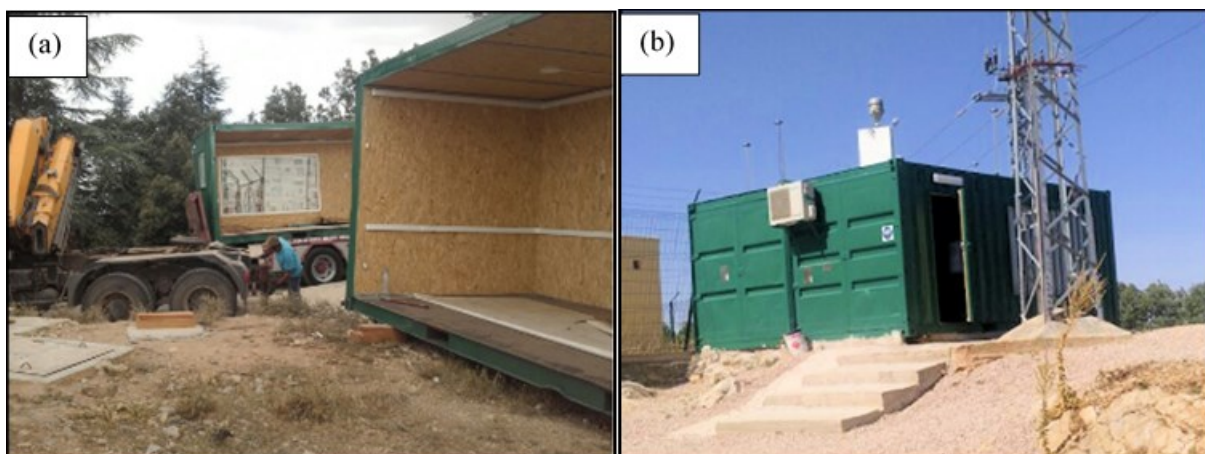
La motivation principale de la labellisation de l'observatoire de Michlifen en tant que site national instrumenté réside dans l'intérêt de l'inscrire comme le seul site instrumenté en Afrique du Nord dans une stratégie nationale. Ce site contribue aussi à des programmes de recherches innovants et interdisciplinaires sur l'environnement et le climat sur la base d'un réseau de collaborations internationales.

## 2. Description et instrumentation :

### 2.1 Description :

L'infrastructure actuelle est constituée de la station des recherches atmosphériques située à Michlifen (2100 m d'altitude). A court terme, deux autres sites seront associés à cette station (le premier à Tafoughalt au Nord-Est dédié aux échanges zones côtières-Méditerranée-Afrique et le second situé à Assa au Sud du Maroc dédié aux études des poussières atmosphériques).

Le site de Michlifen abrite actuellement une station de type container climatisé (figure 2.32) d'environ 30 m<sup>2</sup> où sont installés les équipements scientifiques tels que ceux qui tournent en permanent : un analyseur d'ozone (O<sub>3</sub>), un analyseur des oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>), un analyseur des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O), un collecteur de brouillard et une station météo ainsi que des moyens informatiques d'acquisition des données. Plus d'autres instruments qui sont installés en période temporaire comme collecteur de particules (PM<sub>2.5</sub>-PM<sub>10</sub>, Degitel) et le collecteur de particules suivant leurs tailles (LOAC). Ces équipements ont été fournis par le CNRS (Orléans, France), le laboratoire LSCE/CEA (Saclay, France), TROPOS (Leipzig, Allemagne) et l'Université de Fudan (Shanghai, Chine). Au future, D'autres instruments y seront également déployés par différents partenaires.



**Figure 2. 20** : La station Atlas Mohammed V (a) pendant l'installation et (b) après la mise en route.

Les futurs développements du site actuel sont de faire une transformation en une installation pérenne avec plus d'espace (500 m<sup>2</sup>) pour pouvoir héberger divers

instruments de mesure et d'analyse et accueillir des campagnes de mesures internationales et le personnel impliqués. Typiquement, l'observatoire doit disposer de bâtiments dédiés avec différentes salles pour les équipements scientifiques : un mât de mesure (30 à 60 m<sup>2</sup>), commodités, salle de réunion, zones de stockages, ateliers et équipements auxiliaires (station de filtrage d'eau, refroidisseurs, alimentation électrique (3x25A avec 230/400 VAC), groupe électrogène). De plus, le site doit contenir un parking, une chambre, une cuisine, un accès routier facile, des zones de stockages de containers scientifiques avec possibilité de connexions aux réseaux locaux d'eau, d'électricité et télécom pour la conduite de campagne avec des laboratoires/observatoires mobiles. Une terrasse scientifique d'une centaine de m<sup>2</sup> sur le toit est nécessaire pour le déploiement de tête d'observation au-dessus des laboratoires. Les bâtiments doivent être pensés en tenant compte des caractéristiques des instruments prévus, et de l'espace doit être réservé pour l'accueil d'autres instruments.

## **2.2. Protocoles de mesure :**

Les mesures réalisées ainsi que le type des instruments mis en œuvre suivent les recommandations internationales. La qualité des mesures est assurée par des intercomparaisons et des étalonnages réguliers. Des comparaisons directes pour les instruments peu volumineux se font lors des campagnes de mesure rassemblant les instruments sur le même site et fonctionnent simultanément, ou à partir d'instruments mobiles se déplaçant de site en site. La comparaison avec les mesures spatiales permet également de détecter des fonctionnements atypiques, de même que des comparaisons d'algorithmes et la mise en commun des paramètres comme les informations spectroscopiques.

La station Michlifén a comme ambition de devenir à court terme une station régionale du réseau GAW 'Global Atmospheric Watch'. Les protocoles de mesures sur le site vont suivre également les recommandations garantissant la qualité des observations. Ces protocoles sont indiqués sur le lien suivant :

<https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/qassurance.html>. Qui regroupe les éléments de mesures nécessaires à l'affiliation d'une station de mesure au réseau GAW de l'organisation mondiale de la météorologie (OMM). Bien que les conditions sont déjà

réunies pour une telle labellisation (mesures d'au moins 3 des 6 variables GAW, programme scientifique pertinent supporté par au moins une tutelle, mesures d'autres paramètres atmosphériques significatifs pour l'étude du climat, et disponibilité d'une infrastructure et des campagnes de mesures intensives sur le site.

### 2.3 Instrumentation :

Un nombre assez important de mesures sont effectuées en routine sur l'observatoire de recherche atmosphérique: elles documentent les espèces **chimiques gazeuses** (ozone, oxydes et dioxydes d'azote, CO<sub>2</sub>, et CH<sub>4</sub>), les **particules d'aérosols** (propriétés microphysiques de concentration en nombre, en masse et granulométrie ; propriétés chimiques, les espèces organiques et inorganiques ; propriétés optiques) et les **nuages** dans leur contexte météorologique (rayonnement, vent, température, pression, humidité, profils de vent) et hydrologique (mesures des taux de précipitations, analyse du brouillard, etc..).

Le parc instrumental de la station de recherche atmosphérique Atlas UM5 est divisé en deux catégories Particules et gaz.

Les instruments utilisés pour la détection des particules sont (figure 2.21) :

- **DIGITEL (DHA-80) (a)** : Échantillonneur d'aérosol à grand volume : pour le prélèvement et la collecte de poussières et de particules d'aérosol sur site, c'est un système entièrement automatique pour l'échantillonnage et les particules d'aérosols pour une évaluation et une analyse ultérieures (détermination gravimétrique et analytique). Le débit standard varie entre 100 à 1 000 litres par minute (6 à 60 m<sup>3</sup> / h). Le DIGITEL DHA-80 dispose des supports de 15 filtres. Ils sont automatiquement changés à la position à l'heure prédéfinie. L'analyse chimique des filtres collectés est effectuée au laboratoire TROPOS (Leipzig-Allemagne).
- **LOAC (b)** (Compteur optique léger d'aérosols): basé sur des mesures de diffusion qui permettent une identification typologique des particules (gouttelettes, carbonates, sels et poussières minérales) en plus du nombre de tailles séparé dans une large plage de diamètre allant de 0,2 à 50 µm.

➤ **Collecteur de brouillard (c):** pour la collecte des échantillons de brouillard, l'analyse de la composition chimique sera effectuée par l'Université de Fudan (Shanghai) et TROPOS (Leipzig-Allemagne).

Pour la partie gaz les instruments sont :

La surveillance des gaz NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> est effectuée à l'aide de deux moniteurs :

➤ **Analyseur d'ozone (g):** par photométrie UV O342e, Environnement SA. Il s'agit d'un analyseur d'Ozone par photométrie UV, utilise une technologie unique de photométrie UV avec une LED (brevetée) : l'O342e est le premier analyseur d'ozone certifié sur le marché n'utilisant pas de lampe à mercure comme source d'excitation. Il Fournit les meilleurs résultats de mesure d'O<sub>3</sub> avec précision, répétabilité et stabilité dans une gamme allant de 0,2 ppb à 10 ppm.

➤ **Analyseur d'oxyde d'azote (h):** AC32M par chimiluminescence, Environnement SA. Il s'agit d'un analyseur d'Oxyde d'Azote par chimiluminescence, l'analyseur AS32m de dioxyde d'azote par décalage de phase induit par cavité optique, il fonctionne comme un spectromètre d'absorption optique. il utilise une diode émettrice de lumière bleue (LeD) comme source lumineuse, une cellule de mesure incorporant deux miroirs à forte réactivité centrée à 450 nm et un détecteur photo tube à vide

➤ **Analyseur dioxyde de soufre SO<sub>2</sub> :** AC32MF utilise le principe de la fluorescence UV (norme NF EN 14212) avec une limite de détection très faible, inférieure à 0.4 ppb. Qui permet la Surveillance en continu de la qualité de l'air (air ambiant ou air intérieur) avec une performance excellentes métrologiques pour des mesures de SO<sub>2</sub> dans la gamme 0-20 ppm qui peuvent être programmables par l'utilisateur avec un débit d'échantillonnage de 20l/h

➤ **PICARRO (f) :** Il fournit une mesure précise et simultanée du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du méthane (CH<sub>4</sub>) et de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) à une grande sensibilité (ppb) avec une dérive négligeable pour la science de l'atmosphère. Il répond aux exigences de performance de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Système intégré d'observation du carbone (ICOS) pour

la surveillance atmosphérique du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub>. Le système est exploité par LSCE (CEA / CNRS-France) et les données transmises au réseau ICOS,



**Figure 2. 21 :** parc instrumental de la station Atlas UM5, (a) c'est le Digital PM10, (b) LOAC pour le calcul de la distribution de particule par taille, (c) capteur de brouillard, (d) station météo, (f) Picarro Analyseur des gaz à effet de serre, et (g) (h) les deux moniteurs O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>

➤ **Station météo (d) :** La Surveillance des données météorologiques se fait par un ensemble de capteurs qui enregistrent et fournissent les mesures des

variations climatique de base, les paramètres mesurés sont listé dans le tableau 2.4. Cette station métrologique est fixée à une hauteur de 5m du sol.

**Tableau 2. 4 : Liste des paramètres météorologiques à l'observatoire Atlas AM5**

METEO	
Vitesse du vent	Girouette Aercus
Direction du vent	Girouette Aercus
Humidité Relative	Aercus WeatherRanger
Température	Aercus WeatherRanger
Pression	Aercus WeatherRanger
Radiation	Aercus WeatherRanger
Taux de précipitation	Aercus WeatherRanger

### 3. Fonctionnement :

Pour effectuer de mesure sur la qualité de l'air d'une station de mesure atmosphérique, le recueil des données passe par plusieurs étapes ; les polluants prélevés par les têtes de prélèvements situés sur le toit de la station, ils sont ensuite dirigés vers les appareils de mesure, qui élaborent, traitent et transmettent des données. Un étalonnage régulier de ces instruments garantit les résultats de mesures. Les informations sont enregistrées et transmises vers le disque dur du PC de la station. Les données sont alors traitées et validées afin de vérifier l'exactitude. Les résultats sont alors diffusés aux instances concernées et au public grâce au site web de la station <https://atlas5.org>,

Le bon fonctionnement de la station est assuré par la qualité du parc instrumental formé des différents analyseurs de haute qualité. Le service informatique de la station de mesure et contrôle l'ensemble des données du parc instrumental de la station Atlas AM5. Ce service garantit le fonctionnement du site web de la station.

## 4. Résultats et discussions :

Depuis l'installation en Juillet 2017, plusieurs paramètres atmosphériques ont été enregistré en continu, qui ont pour objectif de documenter l'évolution de la composition de la troposphère, en améliorant nos connaissances sur les variations temporelles des propriétés des gaz, des aérosols et des nuages sur le moyen et long terme, ainsi que les processus de liaison entre ces différents paramètres.

Parmi les constituants mesurés sur le site Michlifen en continu, l'ozone, NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>, et SO<sub>2</sub>, puisqu'ils sont parmi les six principaux polluants dans les normes internationales, ils pourraient avoir des effets nocifs graves sur la santé humaine et l'environnement quand leurs concentrations sont élevées (Lee et al., 1996; Kampa et Castanas, 2008). De plus, les réactions photochimiques entre NO<sub>x</sub> et O<sub>3</sub> jouent un rôle clé dans la modification de la capacité d'oxydo-réduction atmosphérique et dans le transfert de l'azote atmosphérique aux écosystèmes aquatiques qui affectent de nombreux processus biogéochimiques.

Comme le montre la figure 2.22 des concentrations NO<sub>x</sub> et O<sub>3</sub> avec les paramètres météorologiques pour le début de l'année 2019, les concentrations moyennes en O<sub>3</sub> sont presque stables. Outre les effets des changements météorologiques, tels que la température, l'humidité, la radiation solaire, la direction et vitesse du vent. La variation saisonnière des concentrations NO<sub>x</sub> et de l'O<sub>3</sub> pourrait également expliquer les variations dans la série chronologique, tenant compte du fait que l'ozone pourrait avoir un maximum pendant printemps et en été, et NO<sub>x</sub> en Hiver et Automne.

Les paramètres météorologiques quotidiens moyens [température (T), rayonnement solaire (SR), humidité relative (RH) et vitesse du vent (WS)] ont un impact sur les concentrations de NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>. La figure 2.23 montre la variation des concentrations pendant 15 jours de mesure, on peut bien voir que, les jours caractérisés par un vent faible et des températures basses, les concentrations de NO<sub>2</sub> augmentent et que celles de l'ozone diminuent, alors si on les compare à la période

de fortes la vitesse du vent et la température élevée, la concentration en ozone augmente et celle de NO<sub>2</sub> diminue.

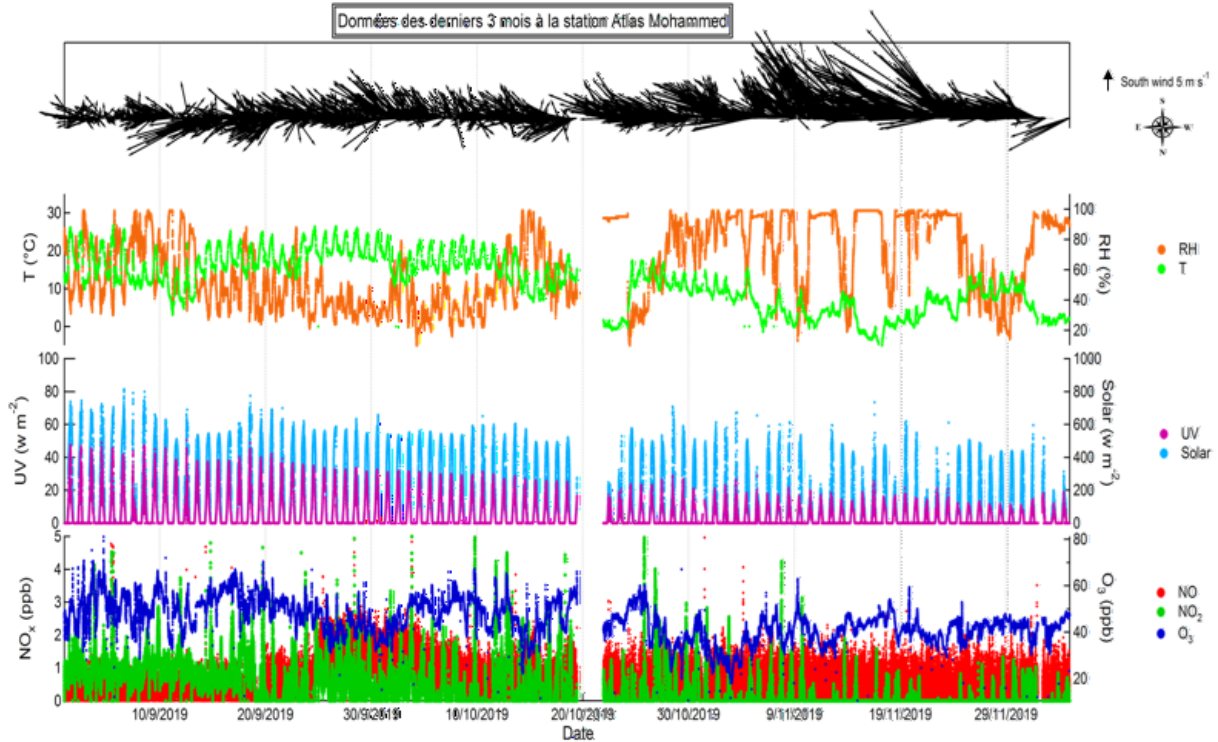


Figure 2. 22 : Variation des paramètres de gaz O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> et météorologiques dans la station d'atlas AM5 au cours des premiers mois de 2019.

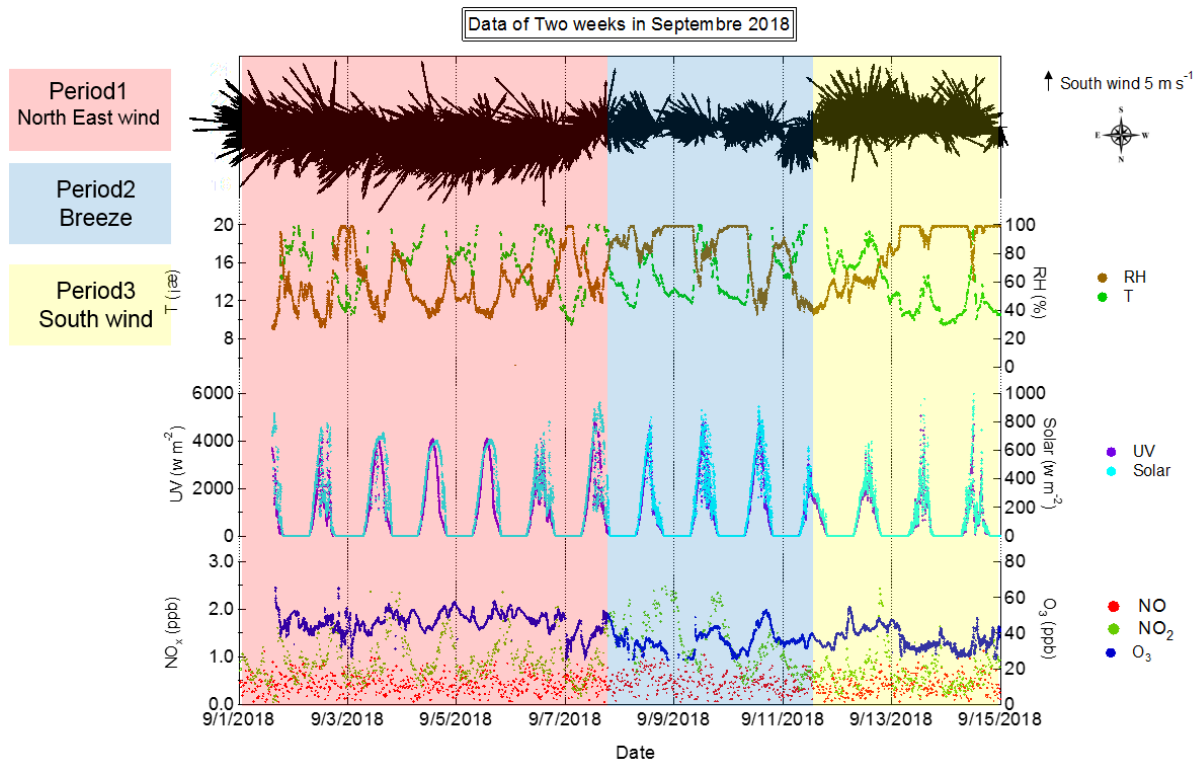


Figure 2. 23 : Variation des paramètres de gaz O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> et météorologiques dans la station d'atlas AM5 au cours de deux semaines de mesure en Septembre 2019.

Nous avons étudié les formes saisonnières de ces données. Une étude statistique nous a permis de montrer variation saisonnière des concentrations des polluants NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> durant une période de deux ans (Tableau 2.5). Les concentrations d'Ozone collectés pendant l'été et le printemps sont les plus élevés  $48,22 \pm 3,01$  et  $50,65 \pm 1,36$  respectivement, par rapport à celle d'Hiver et d'Automne  $44,80 \pm 0,67$  et  $42,58 \pm 0,84$  respectivement. Les concentrations en NO et NO<sub>2</sub> observées dans ce site de type rural sont faibles par rapport aux autres concentrations dans les zones urbaines et suburbaines comme Casablanca par exemple, puisque les sources de trafic sont moins importantes dans ces zones, c'est pourquoi les concentrations en NO sont relativement basses durant toute l'année.

Pour ce type d'étude nous nous intéressons aux différentes allures de présence des polluants en fonction de périodes journalières, hebdomadaires, et saisonnières. La présence de formes répétables enrichit nos informations sur les pollutions au sens où elles peuvent être utilisées pour identifier la principale source de la pollution rencontrée sur ce site. Ces informations peuvent également être utilisées comme variables additionnelles dans les modèles de prédiction qui seront développés par la suite.

En étudiant la variation journalière des données des gaz NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> issues des analyseurs de la station Atlas Mohammed V, pendant les différentes saisons (figures 2.24 - 2.25), nous observons pour la concentration en O<sub>3</sub> pendant l'été, qu'elle montre une variation journalière marquante, elle est très stable durant la nuit, avec une diminution en début de journée et une augmentation dans l'après-midi. Ce qui est corrélée avec horaires de forts ensoleillements à cause d'une augmentation dans la température, ce qui signifie alors qu'il y a une forte production d'ozone par photolyse de la molécule d'oxygène. Les concentrations de NO<sub>2</sub> montrent également une variation journalière durant la période hivernale et pendant l'automne, Les concentrations de NO<sub>2</sub> sont maximales vers 18h le soir, ce qui correspond aux horaires de diminution dans la température.

Si nous faisons une comparaison entre les allures journalières des concentrations en polluants en période hivernale à leurs allures en période estivale, il est aussi possible d'identifier une forte différence (voir figure 2.24 et 2.25). Dans un premier temps, les

concentrations en dioxydes d'azotes NO<sub>2</sub> est beaucoup plus fortes en saison hivernale tandis que les concentrations en O<sub>3</sub> sont sensiblement plus fortes en saison estivale.

Trois éléments pouvant expliquer ces différences :

- D'une part, les phénomènes de dilution sont beaucoup plus importants en période estivale (hauteur de la couche de mélange plus importante) et donc si on considère les sources à l'origine des concentrations d'intensité comparables cela aura pour conséquence des concentrations ambiantes plus faibles.
- D'autre part, en période hivernale, il peut y avoir une augmentation de l'intensité des sources à l'origine des concentrations en NO et NO<sub>2</sub> comme par exemple les phénomènes de combustion domestiques liées au chauffage dans des deux villes pas très loin de la station comme Ifrane et la ville d'Azrou, plus les maïs des nomades qui sont installés dans les environs.
- De plus, l'activité photochimique est plus intense entraînant une production des polluants secondaires tels que l'O<sub>3</sub> plus importante en particulier en milieu d'après-midi.

Dans ce site rural nous pouvons donc corrélérer la présence d'une forte concentration simultanée en NO et NO<sub>2</sub> à une source de combustion à cause de l'absence d'une source trafic ainsi qu'une forte concentration d'O<sub>3</sub> à une source photochimique.

**Tableau 2. 5 :** La variation saisonnière des concentrations des gaz O<sub>3</sub> NO et NO<sub>2</sub> depuis l'installation de la station Atlas AM5 en Juillet 2017.

Hiver				Automne			
C	O3 (ppb)	NO(ppb)	NO2(ppb)	C	O3 (ppb)	NO(ppb)	NO2(ppb)
ave	44.80	0.43	0.66	ave	42.58	0.70	0.28
std	0.67	0.06	0.21	std	0.84	0.06	0.28
min	33.00	0.31	0.41	min	38.86	0.53	0.00
max	46.13	1.85	1.43	max	44.61	0.85	1.16

Printemps				Eté			
C	O3 (ppb)	NO(ppb)	NO2(ppb)	C	O3 (ppb)	NO(ppb)	NO2(ppb)
ave	50.65	0.44	0.63	ave	48.22	0.57	1.16
std	1.36	0.04	0.17	std	3.01	0.45	0.38
min	43.97	0.30	0.40	min	40.15	0.32	0.43
max	47.27	0.43	0.65	max	45.66	0.39	0.46

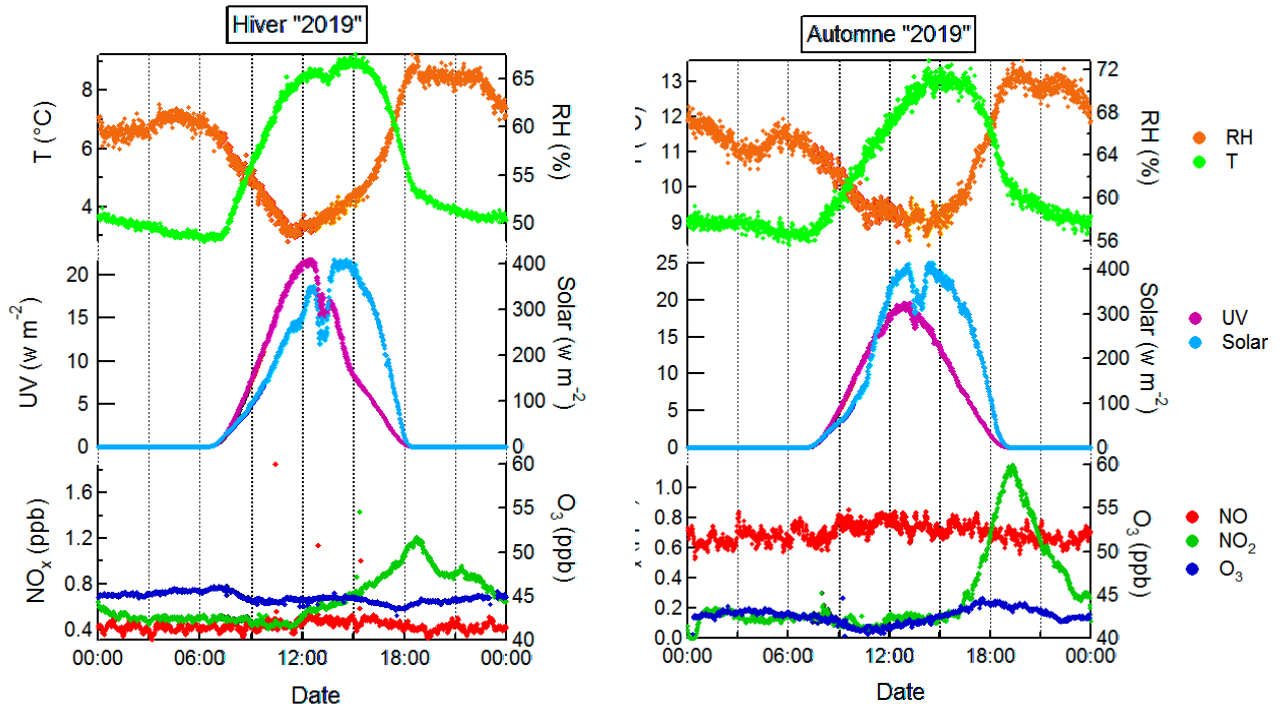


Figure 2. 24 : Variation journalière pendant l'Hiver et l'Automne, des gaz O<sub>3</sub>, NO et NO<sub>2</sub>.

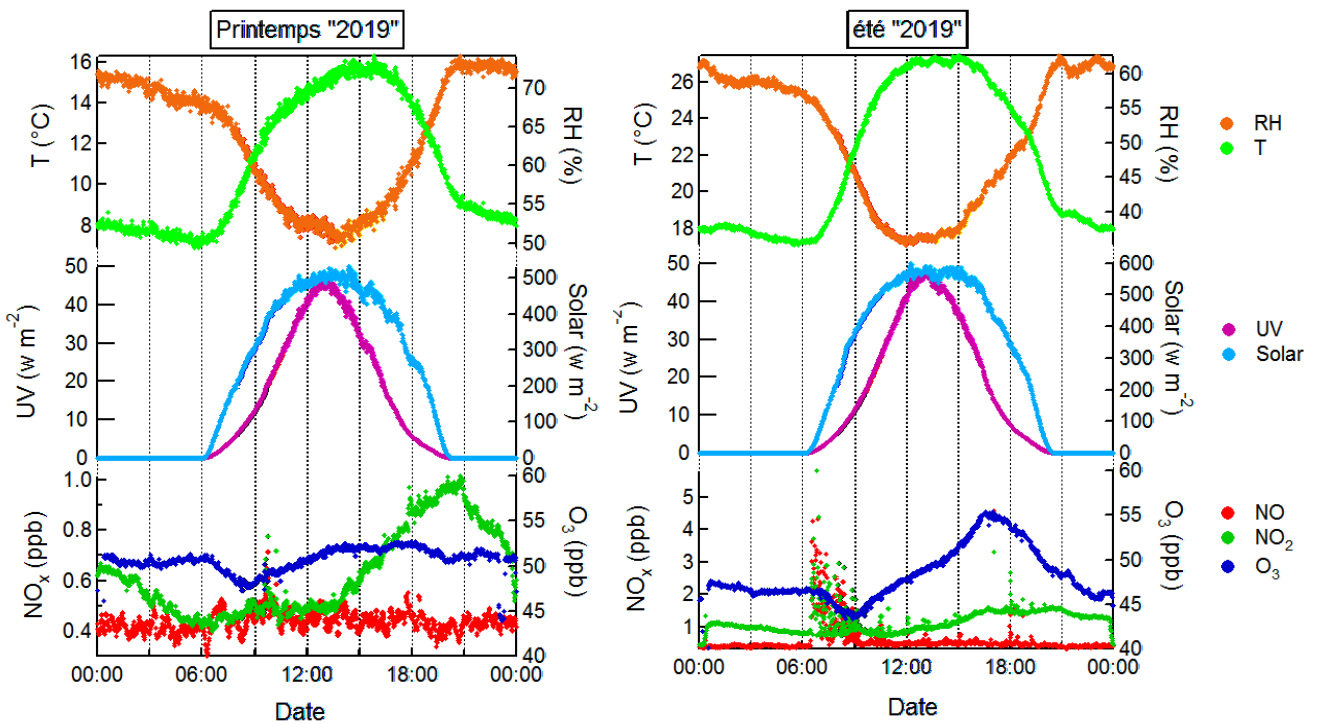


Figure 2. 25 : Variation journalière pendant le Printemps et l'Eté, des gaz O<sub>3</sub>, NO et NO<sub>2</sub>.

Afin de caractériser les influences météorologiques potentielles sur les variations temporelles des différentes espèces et des gaz détectés sur le site de Michlifen, nous avons effectuait des études préliminaires sur les masses d'air qui arrivent au site Michlifen sur cinq ans entre 2012 et 2016 avant de procéder l'installation. Pour avoir une idée sur la répartition des masses d'air qui arrivent à la station en fonction de leurs directions et leurs origines.

Dans cette étude, nous avons utilisé le logiciel Hysplit ([Draxler et Hess, 1997](#); [Draxler et al., 2012a, 2012b](#)) Pour obtenir des résultats de bonne qualité avec une résolution temporelle, nous avons regroupé les trajectoires rétrogrades sur les cinq années tous les trois jours avec une résolution temporelle de six heures. La figure 2.26 montre les trajectoires des masses d'air dans les couches inférieures de 100 m d'altitude, pour chaque saison pendant cinq ans.

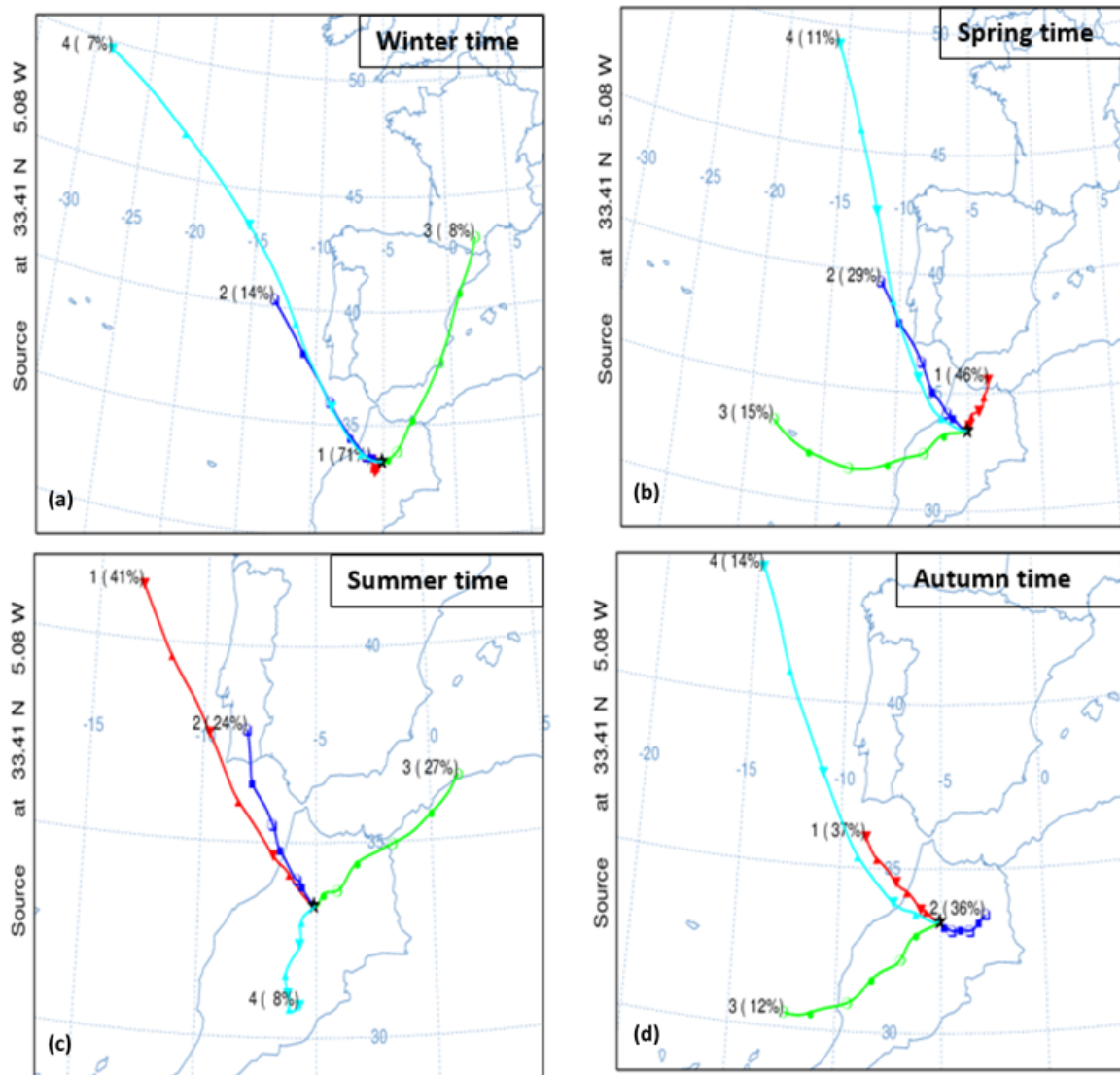
Pour les trajectoires de l'hiver et à 100 mètres d'altitude (figure 2.26 a F), 21% de masses d'air sont des courants marins polaires, venant du nord-ouest, 7% à des vitesses rapides (NWfast) et 14% modérées (NWmod), mais le maximum des masses d'air correspond aux flux locaux avec des faibles vitesses, et qui représentent plus de 70% du total de trajectoires. En cette saison, aucun écoulement venant du Sud ou de l'Est n'a été identifié.

Au printemps, la division optimale de la trajectoire a été obtenue en regroupant des trajectoires de 3 jours arrivant à 100m (figure 2.26 b). Nous avons constaté que les masses d'air lentes venant du nord-(NEslow) sont dominantes avec (46%) de la masse d'air totale, suivies par celle du nord-ouest (NWslow) avec (29%), le reste est caractérisé par une masse d'air océanique et se situant entre le nord-ouest (NW, 11%) et Ouest avec (15%). Également pour cette saison, aucune masse d'air du Sud ou de l'Est n'a été identifiée.

En été, les trajectoires de la masse d'air ont différentes sources, là où la plus grande variance est observée (Figure 2.26 c). La masse d'air s'étend au cours de l'été pour inclure une grande partie du nord-ouest rapide (41%) et du NW (21%) provenant de

l'Atlantique ; les autres trajectoires provenant du sud (8%) et du Est-Nord-Est ENE (27%).

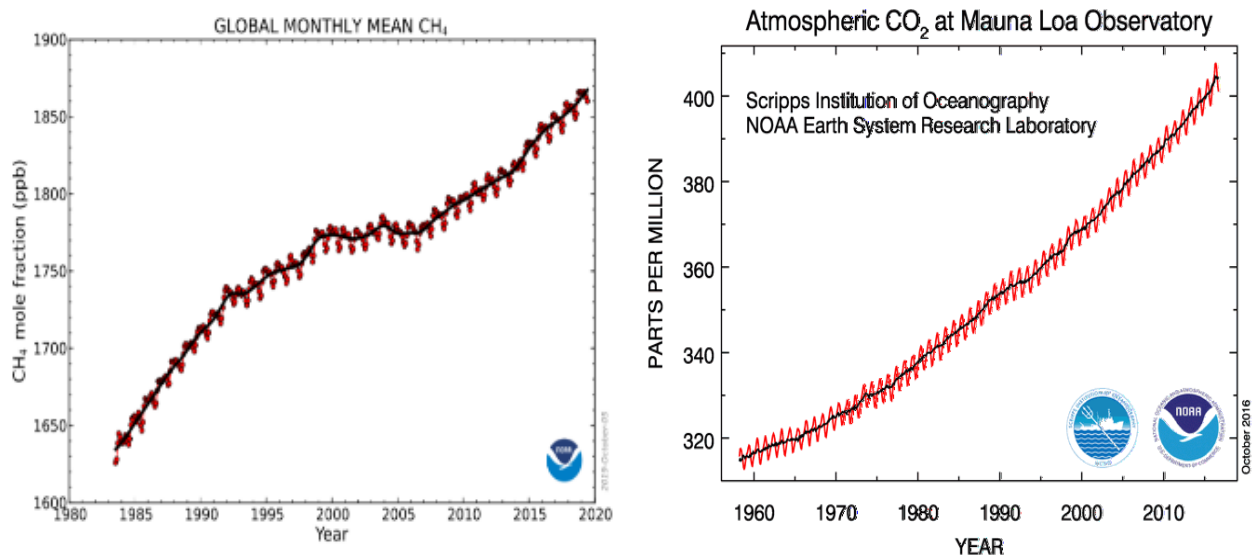
Les distributions de trajectoires en automne diffèrent également de celles des autres saisons, les débits lents du nord-ouest sont dominants (37%), et (14%) les abords modérés du nord-ouest (NWmod), la contribution provenant de l'Est est environ 33%. Les débits du SW sont les moins contributifs (12%) (figure 2.26 d).



**Figure 2. 26 :** Trajectoires des masses d'air arrivant au site d'Ifrane au cours des différentes saisons pendant 5 ans, les trajectoires se sont regroupées et calculées en moyenne tous les 3 jours à 100m.

Les concentrations en gaz à effet de serre tel que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le méthane ( $\text{CH}_4$ ) ont augmenté de manière exponentielle dans l'atmosphère et dépassent de loin les valeurs préindustrielles. Ce phénomène est lié aux activités humaines. Ses besoins en énergie ont conduit l'homme à brûler de grandes quantités de carbone fossile. De plus, l'exploitation des espaces forestiers et la pratique d'une agriculture intensive, ont également altéré les écosystèmes continentaux et côtiers.

La concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique est passée d'une valeur préindustrielle d'environ 280 ppm à 379 ppm en 2005 et à 405 ppm en 2017 (figure 2.27). La concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique n'a augmenté que de 20 ppm au cours des 8 000 années précédant l'industrialisation ; les changements multi-décennaux à l'échelle du centenaire étaient inférieurs à 10 ppm et probablement dus principalement à des processus naturels. Cependant, depuis 1750, la concentration de  $\text{CO}_2$  a augmenté de près de 100 ppm. Le taux de croissance annuel du  $\text{CO}_2$  a été plus important au cours des dix dernières années (moyenne 1995-1995: 1,9 ppm/an) qu'il ne l'a été depuis le début des mesures atmosphériques directes en continu (moyenne 1960-2005: 1,4 ppm/an).

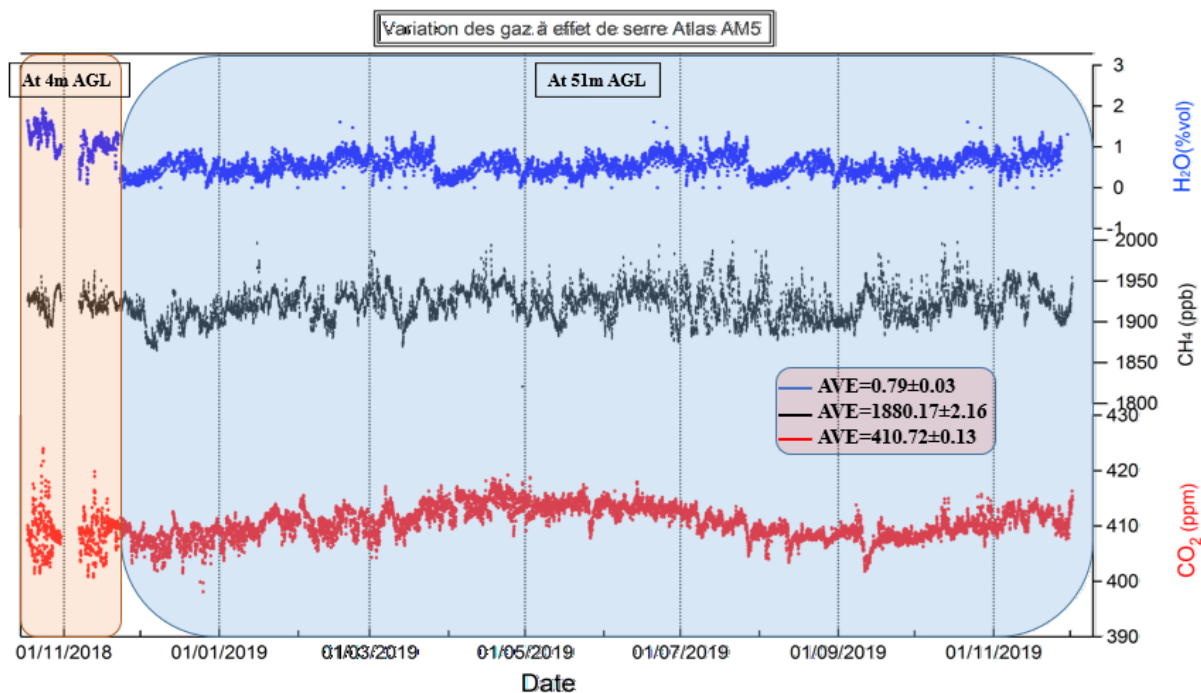


**Figure 2. 27 :** Concentrations moyennes mensuelles du  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  relevées à l'observatoire de Mauna Loa – Hawaii [NOAA](http://noaa.gov) -

En outre, les concentrations du  $\text{CH}_4$  ont augmenté régulièrement au cours des 200 dernières années, malgré une baisse entre 1983 et 2006 (Figure 2.27), ils ont encore augmenté en 2007. Au cours de cette période, les concentrations de méthane dans l'atmosphère ont plus que doublé. Comme pour le  $\text{CO}_2$ , l'activité humaine augmente la

concentration de  $\text{CH}_4$  plus rapidement que les puits naturels ne peuvent la compenser. Les tendances futures sont particulièrement difficiles à anticiper, en partie à cause d'une compréhension incomplète des rétroactions climatiques liées aux émissions de  $\text{CH}_4$ .

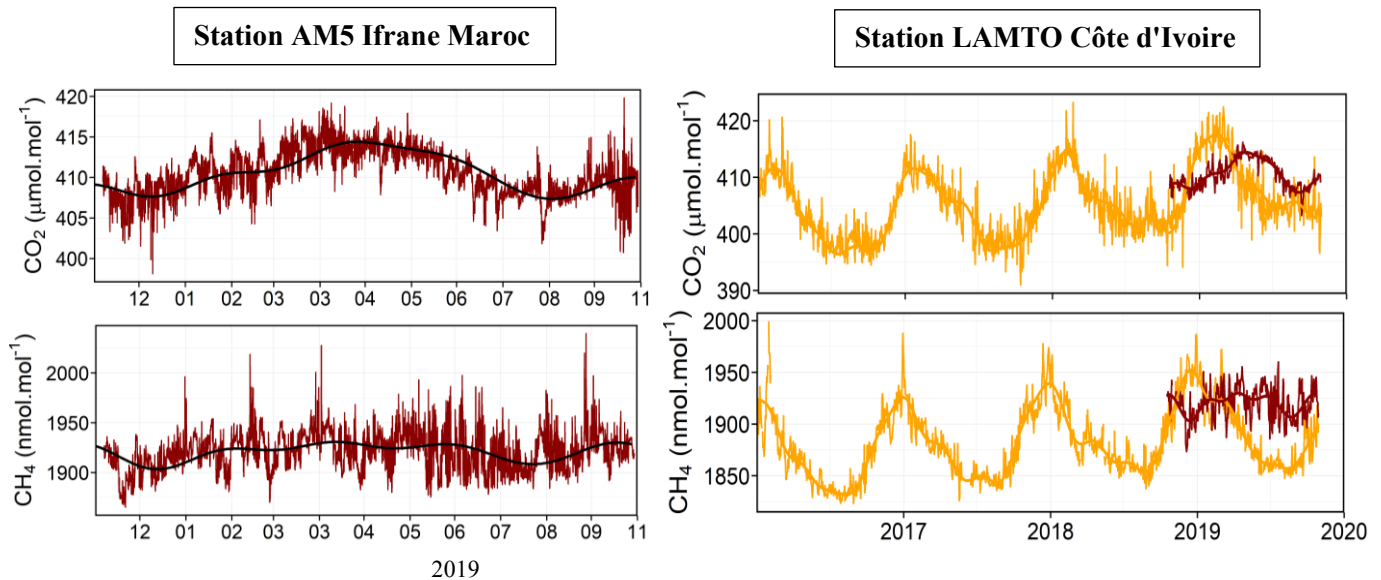
Sur Le site Michlifén nous avons déjà dépassé la barre de 400 ppm, détecté sur l'ensemble des réseaux de mesure internationaux. Depuis l'intégration en Octobre 2018 de notre station dans le réseau international ICOS, les mesures de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$  ont été effectuées en continue par l'analyseur PICARRO (Figure 2.28). Nous avons détecté une valeur moyenne du  $\text{CO}_2$  de  $410.72 \pm 0.13$  (ppm), ce qui est en corrélation avec les mesures à l'échelle internationale ce qui reflète la qualité et la fiabilité des données collectées. Pour le méthane la valeur moyenne marquée pour presque un an de mesure est  $1880.17 \pm 2.16$  (ppb).



**Figure 2. 28 :** les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ) et la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dans l'air.

Ainsi que le réseau d'observation des gaz à effet de serre ICOS, nous a permis de comparer les niveaux de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  mesurés par le même système PICARRO dans différentes stations de même type que le nôtre. Prenant par exemple la station Géophysique de LAMTO dans la Côte d'Ivoire, ce site présente les mêmes moyennes annuelles de concentrations  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ , mais avec un fort cycle saisonnier avec un

maximum pendant la saison hivernale en raison de la combustion de biomasse en Afrique de l'Ouest



**Figure 2. 29 :** Intercomparaisons des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre entre la station AM5 et la station LAMTO à la côte d'Ivoire.

## 5. Conclusion :

L'objectif de cette partie de thèse était le développement de la première station de recherche atmosphérique au Maroc et en Afrique du Nord, pour l'identification de différents types de pollutions atmosphériques.

La station Atlas Mohammed V a été installée et fonctionne de manière continue depuis juillet 2017. Les différents paramètres mesurés à la station Atlas UM5 permettent de :

- Identifier les événements de pollution
- Repérer les pics de haut niveau
- Récupérer la nature et les sources des particules
- Identifier et quantifier la concentration de la serre.
- Surveiller l'augmentation des gaz à effet de serre et d'étudier la composition chimique du brouillard

Un historique de deux ans de données des concentrations des polluants mesurés par les analyseurs des gaz polluants a été étudié sur le site de Michlifen. Cet historique a permis de définir les formes journalières, et saisonnières de concentrations en polluants réglementés (NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>). Egalement pour les gaz à effet de serre mesuré en continu depuis Octobre 2018 par l'analyseur PICARRO, afin de suivre la tendance des gaz CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> à l'échelle mondiale. La présence de ces données en continues enrichit nos informations sur les concentrations des pollutions au sens où elles peuvent être utilisées pour identifier la principale source de la pollution rencontrée sur ce site. Ces informations peuvent également être dans les études de modélisation qui seront développés par la suite.

Des mesures massives sont conduites en continu en Septembre et Octobre 2019 pendant la Campagne Atlas 2019, par un ensemble de partenaires, notamment l'Université Mohammed 5 (Rabat), Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès-Maroc), CNESTEN (Rabat-Maroc), Centre National de la Recherche Scientifique et Université d'Orléans (ICARE, LPC2E, Orléans-France), IRCELYON (Lyon-France), LSCE/CEA (Saclay-France), TROPOS-Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (Leibzig-Allemagne), Max Plank Institute, l'Université de Mainz (Mainz-Allemagne) et Fudan University (Shanghai-Chine)).

Cette campagne d'étude est dans l'objectif de transférer le savoir-faire vers des équipes scientifiques Nationales, il s'agit de la première étude complète au Maroc sur l'environnement atmosphérique ; une quantité de données et information assez importante qui sera fournir aux administrations Marocaines, réseaux d'observation internationaux, et pour la recherche scientifique aux laboratoires partenaires et pour la validation des satellites.

Ce qui permettra de de participer à l'effort national pour positionner le Maroc comme pays leader dans les travaux sur les changements climatiques, qui sera réalisé par la constitution d'un centre de formation universitaire et continue au Maroc.

## Liste des Tableaux :

<i>Tableau 2. 1 : Les différentes méthodes normalisées pour les gaz réglementés.....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 2. 2 : Les moyennes des gaz HONO NO, NO2, O3, PM10, et paramètres météorologiques mesurées sur le Supersite Voltaire.....</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 2. 3 : Les Paramètres mesurées pendant les deux périodes de vent .....</i>	<i>107</i>
<i>Tableau 2. 4 : Liste des paramètres météorologiques à l'observatoire Atlas AM5.....</i>	<i>126</i>
<i>Tableau 2. 5 : La variation saisonnière des concentrations des gaz O3 NO et NO2 depuis l'installation de la station Atlas AM5 en Juillet 2017.....</i>	<i>130</i>

## Liste des figures :

<b>Figure 2. 1 :</b> Décès prématurés dus à l'exposition aux particules fines et à l'ozone, Nombre de décès c'est le nombre par an et par million de personnes .....	81
<b>Figure 2. 2 :</b> Evolution des émissions de SO <sub>2</sub> de 1990 à 2017 pour la France métropolitaine (en kt) CITEPA -Rapport Secten (2019) .....	83
<b>Figure 2. 3 :</b> L'abondance mensuelle du CH <sub>4</sub> atmosphérique à l'échelle mondiale, <a href="https://www.esrl.noaa.gov/">https://www.esrl.noaa.gov/</a> .....	86
<b>Figure 2. 4 :</b> Réseau de stations de mesure du programme GAW, <a href="http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/measurements.html">http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/measurements.html</a> .....	90
<b>Figure 2. 5 :</b> Réseau de mesure atmosphérique ICOS, <a href="http://icos-atc.lsce.ipsl.fr/stations">http://icos-atc.lsce.ipsl.fr/stations</a> .....	91
<b>Figure 2. 6 :</b> les différentes couches, avec l'altitude depuis la surface terrestre jusqu'au l'ionosphère. ....	97
<b>Figure 2. 7 :</b> La situation géographique du supersite Voltaire à Orléans la source.....	98
<b>Figure 2. 8 :</b> Dispositif expérimental (LOPAP).....	100
<b>Figure 2. 9 :</b> AIM (droite) et le chromatographe des ions (gauche), photo de l'intérieur des systèmes .....	101
<b>Figure 2. 10 :</b> Diagramme du budget et de source du HONO dans la troposphère. Li et al.2011 .....	104
<b>Figure 2. 11 :</b> Variation chronologique des concentrations de NO, NO <sub>2</sub> , HONO, O <sub>3</sub> , et PM <sub>10</sub> , et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative pendant les périodes d'échantillonnage.....	105
<b>Figure 2. 12 :</b> Variation chronologique des concentrations de NO, NO <sub>2</sub> , HONO, O <sub>3</sub> , et PM <sub>10</sub> , et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative pour deux période de vent.....	106
<b>Figure 2. 13 :</b> Facteurs influés sur la concentration de HONO .....	108
<b>Figure 2. 14 :</b> Variation journalière des concentrations de NO, NO <sub>2</sub> , HONO, O <sub>3</sub> , et PM <sub>10</sub> , et les paramètres météorologiques du vent, de la température et de l'humidité relative....	109
<b>Figure 2. 15 :</b> Panneau d'accueil du Software Chromeleon.....	110
<b>Figure 2. 16 :</b> Courbe d'étalonnage de l'AIM.....	111
<b>Figure 2. 17 :</b> Les concentrations des anions gaz et particules mesurées sur Supersite Voltaire au cours du mois de septembre 2017, Les valeurs sont pris pour une heure réparties comme suit : 20 minutes de prélèvement, 20 minutes pour l'analyse de particules et 20 minutes pour l'analyse de gaz.....	113
<b>Figure 2. 18 :</b> Les concentrations des cations gaz et particules mesurées sur Supersite Voltaire durant le mois de septembre 2017.....	114
<b>Figure 2. 19 :</b> Corrélation entre AIM et PM <sub>10</sub> obtenu par le Lig'Air. <a href="https://www.ligair.fr/station-de-mesure/orleans-la-source-cnrs">https://www.ligair.fr/station-de-mesure/orleans-la-source-cnrs</a> .....	115

<b>Figure 2. 20</b> : La station Atlas Mohammed V (a) pendant l'installation et (b) après la mise en route. .....	121
<b>Figure 2. 21</b> : parc instrumental de la station Atlas UM5, (a) c'est le Digital PM10, (b) LOAC pour le calcul de la distribution de particule par taille, (c) capteur de brouillard, (d) station météo, (f) Picarro Analyseur des gaz à effet de serre, et (g) (h) les deux moniteurs O3, NOx.....	125
<b>Figure 2. 22</b> : Variation des paramètres de gaz O3, NOx et métrologiques dans la station d'atlas AM5 au cours des premiers mois de 2019.....	128
<b>Figure 2. 23</b> : Variation des paramètres de gaz O3, NOx et métrologiques dans la station d'atlas AM5 au cours de deux semaines de mesure en Septembre 2019.....	128
<b>Figure 2. 24</b> : Variation journalière pendant l'Hiver et l' Automne, des gaz O3, NO et NO2.....	131
<b>Figure 2. 25</b> : Variation journalière pendant le Printemps et l'Eté, des gaz O3, NO et NO2.....	131
<b>Figure 2. 26</b> : Trajectoires des masses d'air arrivant au site d'Ifrane au cours des différentes saisons pendant 5 ans, les trajectoires se sont regroupées et calculées en moyenne tous les 3 jours à 100m. ....	133
<b>Figure 2. 27</b> : Concentrations moyennes mensuelles du CH4 /CO2 relevées à l'observatoire de Mauna Loa – Hawaii NOAA -.....	134
<b>Figure 2. 28</b> : les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO2), méthane (CH4) et la vapeur d'eau (H2O) dans l'air.....	135
<b>Figure 2. 29</b> : Intercomparaisons des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre entre la station AM5 et la station LAMTO à la côte d'Ivoire. ....	136

## Références :

- *Abd el-aal (Junary2017) New Relationship Between Fundamental Site Frequency and Thickness of Soft Sediments from Seismic Ambient Noise*
- *ADEME Classification et crières d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air. - Paris : ADEME Editions, 2002.*
- *Anderson H.R. Air pollution and mortality: A history ,Atmospheric Environment. - 2009. - Vol. 43. - p. 142.*
- *Arquès P. La Pollution de l'air. - [s.l.] : Edisud, 1998.*
- *Ayarza, P., R. Carbonell, A. Teixell, I. Palomeras, D. Martí, A. Kchikach, M. Hanafi, A. Levander, J. Gallart, M.L. Arboleya, J. Alcalde, M. Charroud and M. Amrhar (2014), Crustal thickness and velocity structure across the Moroccan Atlas from long offset wide-angle reflection seismic data: the SIMA experiment, *Geochem., Geophys., Geosystem.*, doi:10.1002/2013GC005164*
- *Balanyá JC, García-Dueñas V (1987) Les directions structurales dans le Domaine d'Alboran de parts et d'outre du Détroit de Gibraltar. C. R. Acad. Sci. Paris, 304, 929-933*
- *Bedjanian, Y., El Zein, A., 2012. Interaction of NO<sub>2</sub> with TiO<sub>2</sub> surface under UV irradiation: products study. *J. Phys. Chem. A* 116, 1758–1764.*
- *Berger J., Davis P. and Ekström G., JGR, 2004*
- *Berrahma, M., Delaloye, M., 1989. Données géochronologiques nouvelles sur le massif volcanique du Siroua (Anti-Atlas, Maroc). *Journal of African Earth Sciences* 9, 651–656.*
- *Berrahma, M., Delaloye, M., Faure-Muret, A., Rachdi, H., 1993. Premières données géochronologiques sur le volcanisme alcalin du Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc. *Journal of African Earth Sciences* 17, 333–341*
- *Bettina, P., Allmann, Peter, M. S. and Egill, H. [2008] "Spectral Discrimination between Quarry Blasts and Earthquakes in Southern California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 4, pp. 2073–2079, doi: 10.1785/0120070215.*
- *Bonnefoy-Claudet, S. (2004), Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site, Phd thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble.*
- *Bonnefoy-Claudet, S., C. Cornou, P.-Y. Bard, F. Cotton, P. Moczo, J. Kristek, and D. Fäh (2006a), H/V ratio : a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations, *Geophysical Journal International*, 167, 827–837.*
- *Bravo, H. 1987. La contaminación del Aire en México. Fundación Universo XXI (Ed). México, D. F., 296 pp.*

- Cara, F., G. Cultrera, R.M. Azzara, V. De Rubeis, G. Di Giulio, M.S. Giammarinaro, P. Tosi, P. Vallone, and A. Rovelli (2008) *Microtremor Measurements in the City of Palermo, Italy: Analysis of the Correlation between Local Geology and Damage*. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 98(3), 1354-1372.
- Caselli, M. 1995. *La Contaminación Atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales. Siglo Veintiuno (Ed.). 3a ed. México, D.F. 192 pp.*
- Caselli, M. 1995. *La Contaminación Atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales. Siglo Veintiuno (Ed.). 3a ed. México, D.F. 192 pp.*
- Cherkaoui, T. E., El Hassani, A. (2012). *Seismicity and seismic hazard in Morocco: 1901-2010. Bulletin institut scientifique rabat, 34, 45-55.*
- Cherkaoui, T.-E., 1988. *Fichier des séismes du Maroc et des régions limitrophes 1901–1984. Travaux de l'Institut Scientifique, Rabat, séries Géologie & Géographie physique 17, 158.*
- Cloetingh S, Vanderbeek PA, Vanrees D, Roep TB, Biermann C, Stephenson RA (1992) *Flexural interaction and the dynamics of neogene extensional basin formation in the Alboran-Betic Region. Geo-Mar. Lett., 12, 66-75*
- Comas MC, Garcia-Dueñas V, Jurado MJ (1999) *Neogene Tectonic Evolution of the Alboran Sea from MCS Data. Geo-Marine Letters 12: 157-164*
- Cooper, OR, Parrish, DD, Ziemke, J, Balashov, NV, Cupeiro, M, et al. 2014 *Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. Elem. Sci. Anth., 2: 000029. DOI: <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000029>*
- Dahy, S.A. and Gaber, H.H. (2009) "Discriminating Nuclear Explosions from Earthquakes at Teleseismic Distances" *European Journal of Applied Sciences 1 (4): 47-52.*
- Dan Plafcan, Eric, S., Dogan, S., Muawia, B., Ibenbrahim, A. and Taj-Eddine, Ch. [1997] "Regional Discrimination of Chemical Explosions and Earthquakes: A Case Study in Morocco," *Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 87, No. 5, pp. 1126-1139.*
- Delgado J., Lopez Casado C., Estevez A., Giner J., Cuenca A. and Molina S.; 2000: *Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case of study of microtremors as an exploration tool. J. App. Geoph., 45, 19-32.*
- Dewey JF, Helman ML, Turco E, Hutton DHWA, Knott SD (1989) *Kinematics of the Western Mediterranean. In: Coward, M.P., Dietrich, D. y Park, R.G. (eds.), Alpine tectonics. Geol. Soc. Spec. Publ., London, 45, 265-283*

- Dimo I. et al. *Studying the sensitivity of pollutants' concentrations caused by variations of chemical rates*, *Journal of Computational and Applied Mathematics*. - 2010. - Vol. 235. - pp. 391-402.
- Docherty CA, Banda E (1995) *Evidence for the eastward migration of the Alboran Sea based on regional subsidence analysis: A case for basin formation by delamination of the subcrustal lithosphere*. *Tectonics*, 14, 804-818.
- Dravinski, M., G. Ding, and K.-L. Wen (1996), *Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins*, *BSSA*, 86, 646–654.
- Draxler RR, Hess GD. *Description of the HYSPLIT\_4 Modeling System*. Silver Spring, Maryland, USA: NOAA Air Resources Laboratory; 1997 (Available at <http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-224.pdf>).
- Draxler RR, Stunder B, Rolph G, Stein A, Taylor A. *HYSPLIT Tutorial*. Silver Spring, Maryland, USA: NOAA Air Resources Laboratory; 2012b (Available at [http://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/Spring2011/HYSPLIT\\_Tutorial.pdf](http://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/Spring2011/HYSPLIT_Tutorial.pdf)).
- Draxler RR, Stunder B, Rolph G, Stein A, Taylor A. *HYSPLIT\_4 User's Guide*. Silver Spring, Maryland, USA: NOAA Air Resources Laboratory; 2012a (Available at [http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit\\_user\\_guide.pdf](http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf)).
- Duval A.M., Meneroud J.-P., Vidal S. and Bard P.-Y.; 1994: *Usefulness of microtremor measurements for site effect studies*. In: *Proc. 10th Europ. Conf. Earthq. Eng.*; Vienna, Austria, 1, pp. 521-527.
- El Alami, S.O., Tadili, B., Aït Brahim, L., Mouayn, I., 2004. *Seismicity of Morocco for the period 1987–1994*. *Pure and Applied Geophysics* 161, 969–982.
- El Azzouzi, M., Bernard-Griffiths, J., Bellon, H., Maury, R.C., Piqué, A., Fourcade, S., Cotten, J., Hernandez, J., 1999. *Evolution of the sources of Moroccan volcanism during the Neogene*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 329, 95–102.
- El Fellah, Younes, Abd El-Aziz Khairy Abd El-Aal, Mimoun Harnafi Antonio Villaseñor., 2016, *New comprehensive standard seismic noise models and 3D seismic noise variation for Morocco territory, North Africa, obtained using seismic broadband stations*, *Exploration Geophysics*, DOI: 10.1071/EG15053
- El-Fellah, Y., Abd El-Aal, A. K., Harnafi, M, and Himmi, M. M., 2014, *Ambient seismic noise levels: a survey of the permanent and temporary seismographic networks in Morocco, North Africa*: *Bulletin de l'Institut Scientifique*,

- Faccenna, C., C. Piromallo, A. Crespo-Blanc, L. Jolivet, and F. Rossetti (2004), *Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs*, *Tectonics*, 23, TC1012, doi:10.1029/2002TC001488.
- Fadil, A., P. Vernant, S. McClusky, R. Reilinger, F. Gomez, D. B. Sari, T. Mourabit, K. L. Feigl, and M. Barazangi (2006), *Active tectonics of the western Mediterranean: GPS evidence for roll back of a delaminated sub-continental lithospheric slab beneath the Rif mountains*, *Geology*, 34, 529 – 532, doi:10.1130/G22291.1.
- FNORS *Santé et environnement dans les régions de France- [s.l.] : Ministère de la santé, de la Jeunesse, des Sports et de la vie associative, Septembre 2008.*
- Frizon de Lamotte, D., Andrieux, J., Guézou, J.C., 1991. *Cinématique des chevauchements Néogènes dans l'arc bético-Rifains, discussion sur les modèles géodynamiques. Bulletin de la Societe Geologique de France* 4, 611–626.
- Frizon de Lamotte, D., Crespo-Blanc, A., Saintbezar, B., Comas, M., Fernandez, M., Zeyen, H., Ayarza, P., Robert-Charrue, C., Chalouan, A., Zizi, M., Teixell, A., Arboleya, M.-L., Alvarez-Lobato, F., Julivert, M., Michard, A., 2004. *TRASNSMED transect I [Betics, Alboran Sea, Rif, Moroccan Meseta, High Atlas, Jbel Saghro, Tindouf basin]*. In: Cavazza, W., Roure, F., Spakman, W., Stampfli, G.M., Ziegler, P.A. (Eds.), *The TRANSMED Atlas – The Mediterranean Region from Crust to Mantle*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gallart, J., R. Carbonell, J. Díaz, A. Gil, M. Ruiz, M. Harnafi, L. Elmoudnib, D. ElOuai, A. Levander, I. Palomeras, D. Cordoba and FJ. Alonso-Chaves (2012), *Crustal structure beneath the Rif Cordillera, North Morocco, from active seismic profiling*, Paper presented at EGU General Assembly, European Geosciences Union, Vienna, Austria.
- Gil A, Gallart J, Diaz J, Carbonell R, Torne M, Levander A, Harnafi M (2014), *Crustal structure beneath the Rif Cordillera, North Morocco, from the RIFSIS wide-angle reflection seismic experiment*, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 4712–4733, doi:10.1002/2014GC005485.
- Hadfield L. et Seaton R.A.F. *A co-evolutionalry model of change in enviromental management. Futures.* - 1999. - Vol. 31. - pp. 577-592.
- Hanka, W., [www.gfz-potsdam.de/geofon/manual](http://www.gfz-potsdam.de/geofon/manual), 2000.
- Hanks, C. and Kanamori, H. [1979] “A moment magnitude scale,” *J Geophys Res* 84, 2348-2350.
- Harmand, Ch., Cantagrel, J.M., 1984. *Le volcanisme alcalin tertiaire et quaternaire du Moyen Atlas (Maroc): chronologie K/Ar et cadre géodynamique. Journal of African Earth Sciences*, 2 (1), 21–55.

- Herrmann, H., Hoffmann, D., Schaefer, T., Brüner, P., Tilgner, A., 2010. *Tropospheric aqueous-phase free-radical chemistry: radical sources, spectra, reaction kinetics and prediction tools*. *ChemPhysChem* 11, 3796–3822
- Houdret J.L., Mace T. et Jean P. *Réglementation et normalisation - [s.l.] : LCSQA, 2008.*
- Huang, G., Zhou, X., Deng, G., Qiao, H., and Civerolo, K.: *Measurements of atmospheric nitrous acid and nitric acid*, *Atmos. Environ.*, 36, 2225–2235, doi:10.1016/s1352-2310(02)00170-x, 2002.
- Ibs- Von Seth M. and Wohlenberg J.; 1999: *Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 250-259.
- Kampa, M., Castanas, E., 2008. *Human health effects of air pollution*. *Environmental Pollution* 151, 362–367.
- Khalizov, A.F., Cruz-Quinones, M., Zhang, R., 2010. *Heterogeneous reaction of NO<sub>2</sub> on fresh and coated soot surfaces*. *J. Phys. Chem. A* 114, 7516–7524
- Khattach .D et al. (2013) *Main crustal discontinuities of Morocco derived from gravity data*
- Kim, W. Y., Simpson, D. W. and Richards, P. G. [1997] “*High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions*,” *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, no. 5, 1365–1386
- Kleffmann, J., Kurtenbach, R., Lörzer, J., Wiesen, P., Kalthoff, N., Vogel, B., et al., 2003. *Measured and simulated vertical profiles*
- Konno, K., and T. Omachi (1998). *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, no. 1, 228–241.
- Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R.W., Vernant d, P., Reilinger, R.E., McClusky, S., Mourabit, T., Davila g, J.M., Amraoui, N., 2011. *New GPS constraints on active deformation along the Africa–Iberia plate boundary*. *Earth and Planetary Science Letters* 308, 211–217.
- Kulkarni N. et Grigg J. *Effect of air pollution on children*, *Symposium: social paediatrics*. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - pp. 238-243.
- Kurtenbach, R., Becker, K.H., Gomes, J.A.G., Kleffmann, J., Lörzer, J.C., Spittler, M., et al., 2001. *Investigations of emissions and heterogeneous formation of HONO in a road traffic tunnel*. *Atmos. Environ.* 35, 3385–3394.
- Lachet C., Hatzfeld D., Bard P.Y., Theodulidis N., Papaioannou C. and Savvaidis A.; 1996: *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece). Comparison of different approaches*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 6, 1692-1703.

- Lachet, C., and P.-Y. Bard (1994), *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique*, *Journal of Physics of the Earth*, 42, 377–397.
- Le Cloirec P. *COV (Composés organiques volatils)*, *Techniques de l'ingénieur*. – 2004-G 1 835.
- Lee, D.S., Holland, M.R., Falla, N., 1996. *The potential impact of ozone on materials in the UK*. *Atmospheric Environment* 30, 1053–1065.
- Leet, D. (1962). *The detection of underground explosions*. *Scient. Am.* 206, 55-59.
- Liu W.T. et al. *Diagnosis of air quality through observation and modelling of volatile organic compounds (VOCs) as pollution tracers*, *Atmospheric Environment*. - 2012. - Vol. 55. - pp. 56-63.
- Llop S. et Ballester F. *Ambient air pollution and annoyance responses from pregnant women*, *Atmospheric Environment*. - 2008. - Vol. 42. - pp. 2982-2992.
- Mauffret, A., 2007. *The Northwestern (Maghreb) boundary of the Nubia (Africa) Plate*. *Tectonophysics* 429, 21–44.
- Mayer H. *Air pollution in cities*, *Atmospheric Environment*. - 1999. - Vol. 33. - pp. 4029-4037.
- Medina, F., I. Bensaid, A. Tangi, 2011. *Catalogue of focal mechanisms of Moroccan earthquakes for the period 1959–2007; analysis of parameters*. *International Meeting on Seismic Hazards Sismo 2010, Agadir, February, 24–26, 2010, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n33, 37–46*.
- Missenard, Y., Anita, Cadoux, 2011. *“Can Moroccan Atlas lithospheric thinning and volcanism be induced by edge-driven convection?”* *Terra Nova* 00, 1–8.
- Missenard, Y., H. Zeyen, D. Frizon de Lamotte, P. Leturmy, C. Petit, M. Sébrier, and O. Saddiqi (2006), *Crustal versus asthenospheric origin of relief of the Atlas Mountains of Morocco*, *J. Geophys. Res.*, 111, B03401, doi:10.1029/2005JB003708.
- Monk P.S. et al. *Atmospheric composition change: global and regional air quality*, *Atmospheric environment Vol.43*. - 2009.
- Monks, PS, Archibald, AT, Colette, A, Cooper, O, Coyle, M, Derwent, R, Fowler, D, Granier, C, Law, KS, Mills, GE, Stevenson, DS, Tarasova, O, Thouret, V, von Schneidmesser, E, Sommariva, R, Wild, O and Williams, ML 2015 *Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer*. *Atmos. Chem. Phys.*, 15: 8889–8973. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>

- Mukhopadhyay, S. and Bormann, P. (2004) *Low cost seismic microzonation using microtremor data: an example from Delhi, India. Journal of Asian Earth science*, 24, 271-280. DOI:10.1016/j.jseaes.2003.11.005.
- Nakamura, Y. (1989), *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30, 1.
- Oswald, R., Behrendt, T., Ermel, M., Wu, D., Su, H., Cheng, Y., et al., 2013. *HONO emissions from soil bacteria as a major source of atmospheric reactive nitrogen. Science* 341, 1233–1235.
- Palano, M., Pablo, J. González, José, Fernández, 2012. *Strain and stress fields along the Gibraltar Orogenic Arc: constraints on active geodynamics. Gondwana Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.021>.
- Parolai S., Bindi D. and Augliera P.; 2000: *Application of the GIT to a microzonation study: numerical simulation and comparison with different site-estimation techniques. Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 286-297.
- Pascal L. *Effet à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité. Revue française d'allergologie Vol. 49. - 2009.*
- Peden D.B. *Effect of air pollution in asthma and respiratory allergy, Otolaryngology - Head and Neck Surgery . - 1996. - Vol. 114. - pp. 242-247.*
- Pedrera, A., Ruiz-Constán, A., Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Sanz de Galdeano, C., Marín-Lechado, C., Ruanob, P., Benmakhrouf, M., Akil, M., López-Garrido, A.C., Chabli, A., Ahmamoud, M., Lourdes, González-Castillo, 2011. *Is there an active subduction beneath the Gibraltar orogenic arc? Constraints from Pliocene to present-day stress field. Journal of Geodynamics* 52, 83–96.
- Percy K.E. et Feretti M. *Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts , Environmental Pollution Vol.30. - 2004. - pp. 113-126.*
- Perez-Belzuz F, Alonso B, Ercilla G (1997) *History of mud diapirism and trigger mechanisms in the Western Alboran Sea." Tectonophysics* 282(1-4): 399-422
- Pérouse, E., P. Vernant, J. Chéry, R. Reilinger, and S. McClusky (2010), *Active surface deformation and sub-lithospheric processes in the western Mediterranean constrained by numerical models, Geology*, 38, 823 – 826, doi:10.1130/G30963.1.
- Piqué A., Laville E., *L'ouverture initiale de l'Atlantique central, Bull. Soc. géol. Fr.* 166 (1995) 725–738.

- Platzman, E.S., Platt, J.P., Olivier, P., 1993. Palaeomagnetic rotations and fault kinematics in the Rif arc of Morocco. *Journal of the Geological Society* 150, 707–718.
- Qin, Y., Tonnesen, G.S., Wang, Z., 2004a. Weekend/weekday differences of ozone, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, PM<sub>1</sub> and the light scatter during ozone season in southern California. *Atmospheric Environment* 38, 3069–3087.
- Quadri de la Torre, G. & L. R. Sánchez-Cataño. 1994. La Ciudad de México y la
- Rial, J.A Saltzman, N.G and liang, H. 1992: Earthquake induced Resonance in sedimentary basins. *American Scientist* V. 80, p 566-578
- Rivero-Serrano, O. G. Ponciano-Rodríguez y T. Fortoul Van Der Goes. 1993. *Contaminación*
- Schultz, MG, Akimoto, H, Bottenheim, J, Buchmann, B, Galbally, IE, et al. 2015 The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elem Sci Anth*, 3: 000067. DOI: <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000067>
- Seber, D., M. Barazangi, A. Ibenbrahin, and A. Demnati (1996), Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and the Rif-Betic mountains, *Nature*, 379, 785 – 790.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiley-Interscience, New York, 1998.
- SESAME-project (2004), *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*, Tech. rep., EC project SESAME, WP05 Instrumental layout for array measurements Deliverable D23.12.
- Sivacoumar R. [et al.] Air pollution modeling for an industrial complex and model performance evaluation, *Environmental pollution*. - 2001. - Vol. 111. - pp. 471-477.
- Soto JI, Comas MC, de la Linde J (1996) Espesor de sedimentos en la cuenca de Alborán mediante una conversión sísmica corregida. *Geogaceta*, 20, 382-385
- Steimen, S., D. Fah, F. Kind, C. Schmid, and D. Giardini (2003), Identifying 2D resonance in microtremor wave fields, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93 (2), 583–599.
- Stich, D., Enrico, Serpelloni, Flor de Lis, Mancilla, Jose, Morales, 2006. Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics* 426, 295–317.

- Stutz, J., Alicke, B., and Neftel, A.: Nitrous acid formation in the urban atmosphere: Gradient measurements of NO<sub>2</sub> and HONO over grass in Milan, Italy, *J. Geophys. Res.*, 107, 8192, doi:10.1029/2001jd000390, 2002.
- Tahayt, A., Taoufik Mourabit, Alexis Rigo, Kurt, L. Feigl, Abdelali Fadil, Simon McClusky, Robert Reilinger, Mostafa Serroukh, Abdelouahed Ouazzani Touhami, Driss Ben Sari, Philippe, Vernant, 2008. *Mouvements actuels des blocs tectoniques dans l'arc Bético-Rifain à partir des mesures GPS entre 1999 et 2005. Comptes Rendus Geoscience 340 (June (6)), 400–413.*
- Teixell, A., P. Ayarza, H. Zeyen, M. Fernández, and M. L. Arboleya (2005), *Effects of mantle upwelling in a compressional setting: The Atlas Mountains of Morocco, Terra Nova*, 17, 456 – 461, doi:10.1111/j.1365- 3121.2005.00633.x.
- Toupance G. et Person A. *Pollution atmosphérique gazeuse, mesure des gaz, Techniques de l'ingénieur.* - 2004. - P 4 031.
- VandenBoer, T.C., Young, C.J., Talukdar, R.K., Markovic, M.Z., Brown, S.S., Roberts, J.M., et al., 2014a. *Nocturnal loss and daytime source of nitrous acid through reactive uptake and displacement. Nat. Geosci.* 8, 55–60
- Wathelet, M. (2008), *An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling, Geophysical Research Letters*, 35, L09,301, doi :10.1029/2008GL033256.
- Wattset AB, Platt JP, Buhl P (1993) *Tectonic evolution of the Alboran Sea Basin. Basin Res.*, 5, 153-177
- Widmer-Schmidrig R., BSSA, [www.geophys.unistuttgart.de/~widmer/SG\\_BSSA\\_finale.pdf](http://www.geophys.unistuttgart.de/~widmer/SG_BSSA_finale.pdf), 2003.
- Wielandt, E. (2002). *International Geophysics, Seismometry Ch 18. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology.*
- Zeyen, H., Ayarza, P., Fernández, M., Rimi, A., 2005. *Lithospheric structure under the western African-European plate boundary: a transect across the Atlas Mountains and the Gulf of Cadiz. Tectonics* 24, <http://dx.doi.org/10.1029/2004TC001639>, TC2001.
- Zha, Q., Xue, L., Wang, T., Xu, Z., Yeung, C., Louie, P.K.K., et al., 2014. *Large conversion rates of NO<sub>2</sub> to HNO<sub>2</sub> observed in air masses from the South China Sea: evidence of strong production at sea surface? Geophys. Res. Lett.* 41, 7710–7715.
- Zhou, X., Beine, H.J., Honrath, R.E., Fuentes, J.D., Simpson, W., Shepson, P.B., et al., 2001. *Snowpack photochemical production of HONO: a major source of OH in the Arctic boundary layer in springtime. Geophys. Res. Lett.* 28, 4087–409.

### **Résumé**

Ce travail de recherche est divisé en deux grandes parties, l'une s'intéresse à l'analyse des signaux sismiques fournis par des stations larges bandes des réseaux sismiques, acquis dans le cadre de la coopération internationale avec l'Institut Scientifique. Pour étudier les possibilités et les méthodes de discriminations entre un séisme et une explosion. Nous utilisons la méthode de l'analyse spectrale qui fournit de meilleurs résultats, pour les spectres situés entre 9 à 12 Hz pour une explosion et entre 1 à 3 Hz pour un séisme. Nous adoptons, la méthode de Nakamura pour évaluer l'effet de l'amplification et/ou atténuation du bruit sismique dans chaque station, les valeurs de la fréquence dominante du site, et le calcul de l'épaisseur de la couche sédimentaire superficielle.

Le deuxième volet concerne la caractérisation des constituants atmosphériques. C'est une exposition des séjours scientifiques au CNRS d'Orléans, et les mesures effectuées sur le Supersite-Voltaire tel que l'acide nitreux (HONO), les mesures obtenues par AIM (l'Ambiant Ion Monitor). Ainsi que le montage de la première station de recherche Atmosphérique Au Maroc (Atlas Mohammed V), opérée par l'université UMV depuis 2017. Plusieurs études ont été effectuées pour caractériser les polluants atmosphériques, et surveiller à long terme les tendances de la pollution et les gaz à effet de serre.

**Mots-clefs (5) :** Réseaux sismiques ; discrimination ; effet de site (Etude H/V) ; Recherche Atmosphérique ; Atlas Mohammed V.

### **Abstract**

This research work is divided into two major parts, the first focuses on the analysis of seismic signals provided by broadband stations of the seismic networks, acquired in the framework of international cooperation with the Scientific Institute. To study the possibilities and methods of discrimination between an earthquake and an explosion. We use the spectral analysis method, which provides better results, for spectra between 9 to 12 Hz for an explosion and between 1 to 3 Hz for an earthquake. We adopt the Nakamura method to assess the effect of amplification and/or attenuation of seismic noise in each station, the values of the dominant frequency of the site, and the calculation of the thickness of the surface sedimentary layer.

The second part concerns the characterization of atmospheric constituents. This is an exhibition of scientific stays at the CNRS Orleans, and measurements made on Supersite-Voltaire such as nitrous acid (HONO), measurements obtained by AIM (Ambient Ion Monitor). As well as the installation of the first Atmosphere research station in Morocco (Atlas Mohammed V), operated by UMV University since 2017. Several studies have been carried out to characterize atmospheric pollutants, and to monitor in long-term the pollution trends and greenhouse gases.

**Key Words (5) :** Seismic networks ; Discrimination ; Site Effect (H/V Study); Atmospheric Research ; Atlas Mohammed V.