



HAL
open science

Les activités Sodar (Sound Detection and Ranging) et couche limite atmosphérique au CNET/CRPE

Alain Weill

► **To cite this version:**

Alain Weill. Les activités Sodar (Sound Detection and Ranging) et couche limite atmosphérique au CNET/CRPE. Histoire de la recherche contemporaine: la revue du Comité pour l'histoire du CNRS, CNRS Éditions, 2022, 29 pp. insu-03690576

HAL Id: insu-03690576

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-03690576>

Submitted on 8 Jun 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Histoire de la recherche contemporaine

La revue du Comité pour l'histoire du CNRS

Articles en pré-publication

Les activités Sodar (Sound Detection and Ranging) et couche limite atmosphérique au CNET/CRPE

Sodar (Sound Detection and Ranging) research and atmospheric boundary layer at CNET/CRPE

Alain Weill



Electronic version

URL: <https://journals.openedition.org/hrc/6915>

ISSN: 2265-786X

Publisher

CNRS Éditions

Brought to you by Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines



Electronic reference

Alain Weill, "Les activités Sodar (Sound Detection and Ranging) et couche limite atmosphérique au CNET/CRPE", *Histoire de la recherche contemporaine* [Online], Articles in prepublication, Online since 19 April 2022, connection on 08 June 2022. URL: <http://journals.openedition.org/hrc/6915>

This text was automatically generated on 19 April 2022.

© Comité pour l'histoire du CNRS

Les activités Sodar (Sound Detection and Ranging) et couche limite atmosphérique au CNET/CRPE

Sodar (Sound Detection and Ranging) research and atmospheric boundary layer at CNET/CRPE

Alain Weill

Alain Weil, directeur de recherche émérite au laboratoire atmosphères, observations spatiales (LATMOS), décrit 25 années de recherche au CNRS par sondage acoustique Doppler au sein du CNET/CRPE. Des expériences de terrain dans la basse atmosphère illustrent le texte. Surprises, découvertes et innovations instrumentales émaillent ce récit qui souligne également l'importance des relations humaines.

Avant-propos

- 1 Le texte qui suit doit être considéré à la fois comme un récit, avec un aspect historique et un point de vue personnel sur une activité scientifique initiée en septembre 1971, jusqu'en 1994, moment où les activités « couche limite au-dessus des continents » du Centre national d'études et télécommunications (CNET) et du Centre de recherche en physique de l'environnement (CRPE – devenu CETP : Centre des environnements terrestre et planétaires) se sont définitivement orientées vers la couche limite atmosphérique marine (CLAM) et les interactions océan-atmosphère, avec un volet acoustique. Les publications ne sont certes pas exhaustives, ni représentatives de l'ensemble de nos publications dans des journaux avec comités de lecture. De la littérature dite « grise » mais marquante, souvent citée, fait partie des références.
- 2 J'ai consacré plus de 25 années sur ce thème de recherche. André Spizzichino, membre de mon jury de thèse d'État en juin 1971 (j'étais alors au laboratoire de météorologie dynamique, LMD), m'avait invité à participer aux activités de recherche atmosphérique du CNET. Ces recherches, tout au moins telles que je les ai perçues, étaient alors

partagées au sein d'un groupe très dynamique et enthousiaste : Isaac Revah et Philippe Waldteufel travaillaient sur les radars Ronsard, destinés à l'étude de la convection profonde et les précipitations tandis qu'André Spizzichino et Michel Aubry animaient des activités scientifiques sur le sondage acoustique Doppler. André Spizzichino et Michel Aubry sont à l'origine du développement des Sodar en France et du programme de recherche associé au CNET. Dans un premier temps, j'ai donc participé entre fin 1971 et 1975 aux activités de l'équipe de Michel Aubry, en me consacrant à un « apprentissage » de l'acoustique atmosphérique et à l'étude de la turbulence observable par le Sodar. Au LMD, je développais des recherches sur la mesure de la turbulence dans les basses couches de l'atmosphère. J'ai bénéficié pleinement des conseils et acquis scientifiques de l'équipe de Michel Aubry. En 1975, j'ai été affecté officiellement dans l'équipe et j'en ai pris la responsabilité suite au départ de Michel Aubry et André Spizzichino en 1977. Ils avaient préparé de façon très rigoureuse tout l'aspect traitement et interprétation du signal des Sodar ce qui a facilité leur utilisation thématique. Plusieurs expériences préparatoires ont eu lieu entre 1973 et 1975 auxquelles j'ai participé en m'intéressant plus particulièrement aux mesures de turbulence : 1973 à Aire-sur-l'Adour sur « l'atténuation du son par la turbulence » (photographie 1), 1974 à Mimizan (Centre d'essai des Landes) sur la validation des mesures de vent par Sodar, puis première campagne sur la couche limite à Chigné (Maine-et-Loire) en 1976.



Photographie 1. Aire-sur-l'Adour, novembre 1973 : expérience de mesure de l'atténuation du son par la turbulence. Au premier plan à gauche Isaac Revah et à droite Michel Aubry. Ils installent des « mains de manœuvre » sur le ballon captif. Alain Weill au milieu, en arrière-plan (© François Baudin).

- 3 Afin que ce récit ne soit pas trop technique, dans un encadré sont décrits ce qu'est un Sodar, le principe du sondage acoustique et quelles sont les observations relatives à ces instruments, avec quelques illustrations et références essentielles. Pour en savoir plus sur les Sodar on peut aussi lire le document archivé¹ sur les activités Sodar qui prend en compte des aspects plus techniques. Seront alors abordées les recherches, en structurant les résultats significatifs dans un contexte national et international et en spécifiant une histoire des « savoirs » plutôt qu'une simple chronologie de résultats.

Récit : sondages acoustiques et études de la couche limite au CRPE-CETP

- 4 Dès 1973 la couche limite atmosphérique CLA au-dessus des continents a été l'objet de recherches au CRPE, avec comme instrument privilégié les Sodar. Une orientation vers la couche limite marine CLAM en 1991, décidée avec le Comité de recherche atmosphérique de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS (INSU), nous a amené à réfléchir sur une instrumentation à la mer.

1. Balbutiements, vent, turbulence thermique et dynamique, ondes de gravité

- 5 1974, le premier Sodar Doppler triple du CRPE est opérationnel et la mesure du vent validée en comparant avec des sondages météorologiques par ballons pilot et des mesures sur un mât instrumenté de 200 mètres au Centre d'essais des Landes CEL [1].
- 6 L'équipe dispose alors d'un ensemble d'éléments quantitatifs, techniques et de physique de la mesure validés. Voilà qui permet d'initier des recherches sur la couche limite atmosphérique et les travaux de Chong, 1976, [1], sont étroitement associés aux publications fondatrices, Aubry et al., 1974, [2], Spizzichino, 1974, [3], Spizzichino, 1975, [4]. Une coopération s'engage avec l'EERM (Établissement d'étude et de recherches météorologiques) et un groupe de travail issu de la communauté scientifique nationale, fait le point sur les questions scientifiques de la couche limite à résoudre. Aussi étrange que cela paraisse, du côté des modélisateurs, spécialistes de la couche limite de l'époque qui faisaient partie d'un groupe de réflexion : « tout était résolu et il n'y avait nul besoin de recherches expérimentales sur le sujet ». Bien heureusement, le potentiel scientifique des Sodar avait été évalué, [4] et les équipes de Boulder (USA) avaient déjà montré l'importance des sondeurs acoustiques pour les études de la couche limite et de nombreuses questions scientifiques sur la couche limite atmosphérique restaient sans réponse. Cette même année 1975, un Sodar simple vertical du laboratoire, bien isolé phoniquement est prêté à l'EERM, Estival et Aubry, 1975, [5] puis mis en œuvre à Fessenheim pour EDF (Électricité de France), afin de tester les particularités du site avant construction de la centrale nucléaire. Une analyse de la variable cible des Sodar, la turbulence thermique, en exploitant des mesures à Aire-sur-l'Adour sur ballon captif, nous éclaire sur sa variabilité dans la basse couche limite, Weill et al., 1976, [6]. Toujours la même année, en juin, une campagne de mesure définie par le CRPE est mise en œuvre à Chigné (Maine-et-Loire) : le Sodar Doppler trois antennes est utilisé, avec des mesures météorologiques et micrométéorologiques sur mât et ballon captif. Une girouette miniaturisée à fil chaud (que j'avais développée avec mes collègues au LMD) est implantée sur la drisse du ballon captif. Cette première campagne de mesure est partagée avec l'EERM (Pierre Leberre responsable). Des données d'excellente qualité sont acquises documentant la structure thermique et dynamique de l'inversion radiative. Des études sur les ondes de gravité et les mouvements convectifs de la couche limite (les panaches) sont alors possibles. Le système anémométrique à fil chaud a parfaitement fonctionné Kaynejad, 1975, [7], Weill et al. 1976, [8].
- 7 *Le site de Chigné est bucolique, dans ce qu'on appelle la France profonde. Nous sommes hébergés dans un presbytère tenu par un curé révolutionnaire et des photos du Che ornent les murs. Nous déjeunons à la cantine des écoles. Une excellente ambiance de terrain et de nombreux souvenirs*

émaillent cette campagne de mesure. Quelques potacheries : l'équipe technique météo avait un soir cloué les sabots du « chef » abandonnés sur le pas de la porte de la baraque Algeco. Les ayant enfilés, celui-ci ne comprenait pas l'inertie de ses sabots.... Un des techniciens effectuant des sondages pilot avec le théodolite s'inquiétait du brouillard (« quel brouillard !! »), alors que ses collègues avaient occulté la lunette du théodolite avec du papier... Je me souviens de l'ami André Spizzichino traversant les champs en costume de ville avec à la main un ballon pilote attaché par un fil devant remplacer le ballon captif plein de fuites... Une bonne humeur animait ces campagnes de mesure, et chaque expérience était une aventure partagée qui avec le recul nous apportait des éléments concrets pour faire le lien entre la couche limite du laboratoire et celle que nous appréhendions : des résultats concrets ont suivi.

- 8 Nos observations sont fertiles et des résultats nouveaux ont été trouvés. La structure de la couche d'inversion observée par les Sodar, Weill et al., 1976, [9] a été analysée et des thèses et articles utilisant les Sodar, Van Grunderbeeck, 1975, [11], Eymard, 1988, [10], Van Grunderbeeck, 1976, [12] témoignent de l'importance des résultats et restent toujours cités plus de quarante ans après. Une stratégie avait été engagée dans l'équipe de ne proposer des sujets de thèses que si les données avaient été acquises avant la thèse, avec une qualité assurée, afin de ne pas handicaper les futurs thésards dont les thèses ne duraient que deux années. Ces premières expériences ont permis d'en savoir davantage sur la turbulence dynamique et thermique dans les couches d'inversion et la distinction entre les ondes de gravités piégées qui ne transportent pas d'énergie et celles qui transportent de l'énergie sous l'influence de la convection matinale, Eymard and Weill, 1979, [13]. Les logiciels d'exploitation des mesures ont été modifiés afin de calculer systématiquement un paramètre turbulent (le taux de dissipation), suite à [9] repris par Strauss, 1980, [14]. Instruits par les phénomènes observés, une stratégie expérimentale est lancée, en coopération avec Météo France, l'Institut national de recherches agronomiques, le laboratoire de météorologie physique (LAMP) à Clermont-Ferrand et le laboratoire d'aérodynamique (LA) de Toulouse, afin de documenter des cycles complets d'évolution des couches limites, analyser de façon fine la structure des panaches et des ondes de gravité.

2. Couche limite convective sur site homogène, panaches, flux Sodar, flux élémentaires, paramétrisation des flux, ondes de gravité

- 9 Lors de la campagne coopérative de 1977 à Voves sur le terrain homogène de Villeau (photographie 2) on utilisera plusieurs Sodar verticaux, un ballon captif et des radiosondages afin de bien décrire la CLA dans l'espace et le temps. Le Sodar de G. Dubosclard (IOPG - institut et observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand) sera utilisé et des mesures micrométéorologiques et météorologiques aéroportées (EDF-INAG - Institut national d'astronomie et de géophysique) seront mises en œuvre par les équipes du LAMP. L'expérience est soigneusement préparée et se déroulera comme prévue en juillet 1977. Il convient de noter que le site expérimental de Voves a été choisi en relation avec l'INRA et l'INAG afin de recevoir un mât instrumenté (mesures météorologiques et de turbulence) cédé par EDF à l'INAG. Le site a été choisi pour son homogénéité apparente et sa représentativité *a priori* pour l'étude de la couche limite planétaire en terrain plat et homogène afin d'expérimenter dans des conditions les plus proches des modèles de couche limite de l'époque, en particulier ceux qui simulaient l'expérience de référence sur site homogène Wangara (Australie). Cependant, ce mât ne sera opérationnel qu'à partir de 1978. On remplacera le mât par des mesures par ballon

captif, en sondant la couche limite à partir de montées et descentes du ballon équipé de mesures météorologiques et de turbulence.



Photographie 2. Des acteurs de la campagne de Voves 77 (à Villeau). En haut à gauche, Jean-François Fèvre montant le Sodar, à droite Laurence Eymard. En bas à gauche François Baudin dans la remorque calcul. On aperçoit en arrière, Patrick Van Grunderbeeck, à droite Alain Weill « à la barbe fleurie » (©François Baudin).

- 10 Les résultats ne tardent guère : tout d'abord, les données de Voves 77 valident le modèle de couche limite convective de l'EERM. En particulier les données des Sodar sont utilisées pour estimer des paramètres turbulents du second ordre, André et al., 1978, [15] ce qui était vraiment nouveau. Nous montrons comment estimer le flux de chaleur de surface à partir de la variance de vitesse verticale, Weill et al., 1978, [16]. Une analyse approfondie de la turbulence observée par Sodar permet d'utiliser le concept de similitude locale proposée par John Wyngaard (spécialiste de la turbulence aux USA), et d'établir une paramétrisation nouvelle appliquée aux mesures du Sodar, Weill et al., 1980, [17].
- 11 *À titre anecdotique, l'article envoyé tout d'abord à JAS (Journal of Atmospheric Science) a été retardé, puis renvoyé par l'éditeur scientifique sous prétexte que la revue ne correspondait pas au sujet étudié et qu'il fallait l'envoyer à une autre revue. J'envoie alors l'article rapidement au journal JAM (Journal of Applied Meteorology) moins théorique et plus météorologique, mais de très bon niveau, et il est accepté assez rapidement. La stupeur, en regardant JAS après la publication de notre article dans JAM est de constater qu'un scientifique renommé publiait la même paramétrisation que nous avons proposée, heureusement après nous et JAS était donc approprié !*
- 12 Cette approche, par extrapolation des flux jusqu'au niveau où ils s'annulent, permet une estimation de la base de l'inversion lorsqu'elle n'est plus à portée du Sodar. Cette physique de la similitude locale est très fructueuse et nous quantifions la contribution aux flux de température des panaches convectifs à partir d'échantillonnages conditionnels. De plus, les statistiques appliquées à l'analyse de la vitesse verticale par

Sodar classent les différents mouvements verticaux à petite échelle, Taconet, 1980, [18], Taconet and Weill, 1982, [19], Taconet and Weill, 1982, [20]

- 13 Des esprits chagrins, grands spécialistes de la turbulence, ne nous avaient pas vraiment encouragés à cette étude de flux élémentaires : « nous avons essayé et nous n'y sommes pas arrivés... alors. ! » Une estimation des dimensions caractéristiques des panaches est publiée, Van Grunderbeeck et al., 1979, [21]. Une analyse des flux d'entraînement associés à l'évolution de l'inversion est effectuée et les flux d'entraînement quantifiés, Dubosclard, 1980, [22]. Par ailleurs, une paramétrisation du vent, associée au niveau de l'inversion est proposée, Klapisz and Weill, 1982, [23].
- 14 Nous apportons ainsi notre « pierre » dans les connaissances de la couche limite convective et nos travaux sont reconnus dans le concert international. Une réflexion sur les conditions stables, (où la stratification thermique est stable) suit. Cette caractéristique de la couche limite nocturne est étudiée pendant les hivers 78 et 79 au moment où le mât météo-micrométéorologique de Voves devient opérationnel.

3. Couches stables et couche limite hivernale, organisation de la convection en ciel clair, couche limite tropicale continentale

- 15 Nous abordons la paramétrisation de ces couches stablement stratifiées qui s'avèrent le siège de turbulence intermittente, Weill et al., 1980, [24]. En particulier avec J.F. Louis, scientifique modélisateur reconnu du Centre européen de météorologie de Reading, nous analysons alors les questions de variabilité des stabilités nocturnes qui laissent échapper des « bouffées » de turbulence. Cet aspect explique la variabilité nocturne : la nuit, la variabilité est le plus souvent contrôlée par des phénomènes de transport local par le vent (advection locale), qui modifient le concept de couche limite homogène localement. On conçoit alors la difficulté des paramétrisations, Louis et al., 1983, [25]. Mais déjà nous nous posons de nouvelles questions pour lesquelles les Sodar vont être utiles : la couche limite hétérogène et la couche limite à moyenne échelle.
- 16 Dans les observations, des structures turbulentes intermittentes, très individualisées se manifestent très souvent, avec une signature en réflectivité (turbulence thermique), très caractéristique. En participant à des expériences de propagation électromagnétique (projet CNET, PACEM) il est montré que cette signature de la stratification thermique par Sodar est un indicateur pertinent pour l'étude de trajets multiples pour des ondes électromagnétiques (propagation des faisceaux hertziens), Mon et al., 1980, [26]. En 1981, pendant la grande expérience COPT 81 en Côte d'Ivoire, le Sodar est utilisé comme instrument complémentaire dans l'étude de la couche limite observée en trois dimensions. Des cibles artificielles de $\frac{1}{2}$ longueur d'onde des radars Doppler Ronsard sont utilisés (le Chaff). Voilà qui permet de visualiser par radar, l'organisation convective tridimensionnelle en ciel clair, dans une couche limite tropicale Eymard and Weill, 1985, [27]. Dans cette campagne de mesure, les Sodar montrent aussi la signature très basses couches de phénomènes frontaux violents « gust fronts » (fronts de rafale) associés aux lignes de grain, Sommeria and Testud, 1984, [28]. Nos données, en particulier lors d'une rafale choisie par sa complémentarité avec les mesures radar, sont diffusées aux modélisateurs de l'expérience COPT 81.

4. Hétérogénéité de la couche limite, structures frontales en ciel clair, « climatologie de la turbulence », structure fine de la couche de surface

- 17 Dès le retour de COPT 81, après des discussions au sein de l'ISARS (International Society For Acoustic Remote Sensing) fondée à Calgary (Canada) en juin 1981 par E.H. Brown de la NOAA (Boulder) et le professeur S.P. Singal du National Physical Laboratory, New-Delhi, la question de l'homogénéité spatiale de la C.L. et des études avec plusieurs Sodar sont abordées. Avec Georges Dubosclard (juin 1982) nous analysons, pour une première approche de la variabilité spatiale, trois Sodar (avec trois antennes Doppler) implantés dans la Beauce, à différentes distances et grossièrement orientés d'est en ouest. L'hétérogénéité de la couche limite nocturne est due à des écoulements très locaux. Ceci introduit une orientation vers les couches limites plus complexes et à mésoéchelle ou moyenne échelle (échelles horizontales de quelques centaines de mètres jusqu'à 100 km). Après avoir réfléchi sur les questions de la mésoéchelle et sur les fronts observés par les Sodar, deux campagnes coopératives internationales se sont alors déroulées : les campagnes COAST 83 en Hollande et Mesogers 84 dans le Gers.
- 18 Comme résultat, Weill et al., 1988, [30] nous apportons des renseignements importants sur le déplacement d'une discontinuité frontale et sa signature turbulente. Les potentialités du minisodar du CRPE (photographie 3) pour l'étude de la couche de surface sont démontrées, faisant d'un tel instrument un outil incomparable remplaçant un mât instrumenté pour utiliser et tester des paramétrisations de la couche de surface, Weill et al., [31].



Photographie 3. Le minisodar Doppler trois antennes, 6 kHz du CRPE : les trois antennes monostatiques sont fixées sur un chariot de remorque. On remarque au premier plan à droite la chambre de compression avec un cornet exponentiel pour envoyer les impulsions sur un tronc de parabole : le faisceau central du signal d'émission-réception en sortie est parallèle aux axes des cylindres (D.R.).

- 19 Nous découvrons l'usage du minisodar sous la pluie, suivi du développement aux USA d'un minisodar spécifiquement « précipitations », s'inspirant de nos résultats, Coulter and Martin 1986, [32], Coulter et al., 1989, [33].
- 20 Une contribution sur les signatures spectrales de la vitesse verticale du vent est apportée, Desbraux, 1985, [34], Desbraux and Weill, 1986, [35].

5. Couche limite à méso-échelle, structure des fronts « convectifs » de basses couches, ondes de gravité et mélange horizontal

- 21 Nous abordons des mouvements ou structures météorologiques d'échelle moyenne. Dans une première expérience internationale coopérative avec Météo France, nous nous intéressons à une région de relief relativement complexe, le Gers. L'expérience MESOGERS 1984 utilise des stations de mesure automatiques, un réseau de huit Sodar Doppler déployés d'ouest vers l'est et décrivant des mailles triangulaires de différentes tailles, Weill et al., 1988, [36]. Deux des Sodar sont implantés proches de stations automatiques Patac (coup de poing en occitan) de Météo France. On doit ajouter que des mesures de flux par l'INRA (Versailles et Avignon), d'humidité des sols et l'utilisation de données de télédétection spatiale et aéroportée (radar embarqué sur hélicoptère) font partie du projet. D. Vidal - Madjar du CRPE est l'investigateur principal de la partie télédétection spatiale et héliportée. Des mesures météorologiques et micrométéorologiques aéroportées sont prises en charge par A. Druilhet et P. Durand du LA. Des apports sur les systèmes frontaux, les ondes de gravité inertielles, les relations entre température de surface, relief et couche limite sont obtenus : Zhong, 1991, [37], Zhong and Weill, 1990, [38]. Un concept déjà initié lors d'expériences dans la Beauce d'homogénéisation horizontale à mésoéchelle est étudié. Il s'avère utilisable pour la zone hétérogène du Gers dans la phase matinale, Masmoudi, 1988, [39], Masmoudi and Weill, 1988, [40]. Cette campagne de mesure bénéficie d'une coopération avec les équipes de Pennstate University (département de Météorologie) D. Thomson et T. Carlson avec la participation de C. Fairall et une coopération avec A. Belgiaars (Centre météorologique royal des Pays-Bas, KNMI). Concernant les fronts en tant que discontinuité turbulente observée par les Sodar, l'application de la méthode de triangulation déjà employée pour l'observation des ondes de gravité dans [13], conduit à l'estimation des coefficients de traînée associés à ces fronts ainsi qu'un essai de classification des signatures frontales, Gera and Weill, 1987, [41], Gera and Weill, 1991, [42]. Un autre concept important pour les questions de validation de mesures spatiales lié à des « longueurs de rugosité intégrées », expliquant que les mesures de flux par Sodar intègrent les effets du sol à une échelle spatiale supérieure aux mesures en surface, voit le jour. Déjà initié dans [36], il est appliqué par Soares et al., 1988, [43] et explicité dans Weill, 1991, [44] : la capacité intégratrice des Sodar est ainsi utilisable pour comparer à des estimations de télédétection aéroportées et spatiales (à condition d'interpréter les estimations à partir d'un modèle météorologique régional).
- 22 En 1985 nous sommes les organisateurs du 3^{ème} colloque international de l'International Society of Acoustic Remote Sensing (ISARS) au CNET à Issy-les-Moulineaux avec le soutien du CNET et l'INAG.

6. Extension d'échelle, Sodar dans la forêt, les Sodar et les systèmes frontaux

- 23 La question de l'extension d'échelle depuis l'échelle locale jusqu'à l'échelle régionale reste toujours d'actualité (le passage à la couche limite à mésoéchelle). Nous sommes invités à participer à l'expérience Hapex Mobilhy (1986), responsable et premier investigateur P.I., J.C. André (Météo France), 1998, [45]. Avec trois Sodar dont le minisodar et un Sodar dans la forêt Landaise, nous montrons comment estimer les

effets dynamiques de la forêt sur la tension du vent Mazaudier et al., 1991, [46]. Nos mesures sont utilisées par W. Brutsaert, le célèbre hydrologue de l'université de Cornell (USA) pour valider sa méthode de mesure des paramètres de la couche limite à partir de radiosondages couche limite à haute cadence et cela nous est utile pour évaluer nos mesures, Parlange and Brutsaert, 1990, [47]. Nous nouons une coopération avec l'équipe du Professeur H.R. Lehmann de l'institut Hertz de Berlin et analysons avec lui les apports méthodologiques et le chemin parcouru depuis une vingtaine d'années d'utilisation des Sodar pour la recherche sur la couche limite de par le monde, Weill and Lehmann, 1990, [48].

- 24 Les Sodar du CRPE sont utilisés dans le cadre de l'expérience FRONT 87 en relation avec des mesures par des radar ST (Stratosphère Troposphère) et les radars Ronsard, en Bretagne près de Brest. Des résultats sur la structure des fronts précipitants dans la basse couche limite, Koroni and Mazaudier, 1993, [49] et des résultats sur la structure des fronts en zones montagneuses sont obtenus lors de l'expérience Pyrex, Kotroni et al., 1994, [50].

7. Expertise acquise par les sondages acoustiques et apport dans le domaine d'application, essai de sondage de la vitesse des gaz dans les bouches volcaniques

- 25 L'expertise acquise par notre équipe est utilisée par plusieurs organismes (EDF, LA, Institut franco-allemand de Saint-Louis, Société Thomson) pour la caractérisation de la structure spatio-temporelle de la turbulence et du vent. En nous cantonnant sur l'aspect recherche, Frank Beyrich, chercheur Est-Allemand a choisi d'achever son PhD dans l'équipe. Il montre les difficultés de l'estimation des hauteurs de mélange (hauteurs caractéristiques dans lesquelles se manifeste le mélange turbulent de la couche limite) et l'intérêt des Sodar en analysant les données archivées, Beyrich and Weill, 1993, [51].
- 26 Il convient de décrire ici une recherche concernant l'utilisation d'une antenne acoustique Doppler pour l'estimation des vitesses verticales de jets volcaniques au Stromboli. Cette recherche est liée à une coopération avec Claude Jaupart de l'institut de physique du globe de Paris (IPG). Claude Jaupart m'avait interrogé en 1990 sur la possibilité de sonder acoustiquement les jets volcaniques. Après de multiples interrogations sur la température dans les jets (pour estimer la vitesse du son), la topographie des bouches volcaniques, et malgré des points non résolus sur la température et structure des jets, la topographie des lieux, nous avons tenté une expérience de faisabilité en septembre 1991 au Stromboli. Le traitement du signal de réception d'une antenne a été modifié afin de filtrer les bruits très basses fréquences liés aux explosions volcaniques et cette antenne a été transportée par un camion du CNET à l'île de Stromboli.
- 27 *Après plusieurs péripéties : pannes de l'élévateur de charges du camion, réparation d'urgence en commandant une pièce à Paris livrée sur l'île, discussions avec la mafia locale pour transporter une lourde caisse sur une distance de quelques mètres par chariot élévateur afin d'accéder à un hélicoptère de la protection civile italienne qui en attendant transportait des touristes.... Les chercheurs de l'IPG et moi-même avons dû faire le sacrifice d'une partie de nos frais de mission pour que le transport de quelques mètres soit effectué... in fine, l'hélicoptère a transporté notre antenne au sommet du Stromboli (photographie 4). Nous sommes également transportés, Jean-*

François Fèvre, Jacques Bilbille et moi-même, pour passer une nuit inquiétante dans un brouillard soufré asphyxiant, avec peu de nourriture, le matériel de « survie » ayant été oublié dans l'embarquement de l'hélicoptère : quelle aventure ! Le lendemain nous récupérons l'ensemble du matériel oublié, plantons la tente et installons l'antenne. Le système de réception du signal étant placé dans la caisse de l'antenne. Jacques et moi descendons chaque jour les bandes magnétiques et les donnons à Brigitte Piron qui traite les données en bas. Nous remontons à pied les quelques 800 m de dénivellation avec de la nourriture et des boissons, dont le pastis.

- 28 Les résultats obtenus ont été prometteurs et on peut dire qu'une estimation des vitesses verticales entre 20 m/s et 80 m/s a été obtenue justifiant la pertinence de la technique choisie, Weill et al., 1995, [52] mais impliquant toutefois une amélioration de la méthode (mesures radiométriques de la température de la bouche volcanique, filmage des séquences éruptives, estimation de la topographie...).



Photographie 4. Sur la crête sommitale du Stromboli, « la fine équipe » : de gauche à droite Brigitte Piron, Jacques Bilbille, Alain Weill et au premier plan à droite Jean-François Fèvre. On distingue au fond l'antenne du Sodar et à gauche la caisse de transport de l'antenne faisant office de P.C. d'enregistrement (© Jacques Bibille).

- 29 Bien entendu, cette « première » décrite dans de façon publicitaire dans *La Recherche*, Brandeis, 1995, [53] sera le prélude à d'autres instrumentations novatrices dont des radar Doppler adaptés aux volcans qui s'inspireront des perspectives que nous avons énoncées, Dubosclard et al., 1999, [54].
- 30 En guise de conclusion : quelques commentaires « retour d'expériences ».
- 31 *Il est particulièrement important pour moi de parler ici de deux de mes anciens collègues du LMD, Welf Brandès et Christian Oberto avec qui j'ai initié mes recherches expérimentales sur la turbulence atmosphérique. Je les ai perdus de vue, ils étaient des amis et restent enfouis respectueusement dans ma mémoire. J'ai échafaudé avec eux des projets instrumentaux « novateurs » à l'époque (fils chauds et froids à usage atmosphérique, réfractomètre embarquable...). Sur l'ensemble des expériences, plusieurs jeunes chercheurs ont participé aux recherches, ont montré leur immense talent. Ils sont devenus des professionnels incontournables de notre communauté de recherche atmosphérique et sont des amis. Je pense en particulier à Laurence Eymard et Odile Taconet qui après leur thèse ont effectué une carrière au CNRS. Des chercheurs étrangers avec lesquels j'avais coopéré, sont restés des amis et quand nous nous rencontrons, « nous évoquons les recherches passées et ce que nous aurions aimé faire », Margo Kallistratova de l'Académie de sciences de Moscou, Hans-Reiner Lehmann de l'institut Hertz de*

Berlin, Denis Thomson et Toby Carlson de Pennstate Université, Giesepe Mastrantonio du CNR de Rome. Certains ont malheureusement disparu. La présence sur le terrain des techniciens qui se sont retrouvés très souvent dans les campagnes de mesure : Jacques Bilbille, Serge Dubois, Jean-François Fèvre, Daniel Borié... et notre collègue et brillant ingénieur François Baudin, « le chef des Sodar », responsable du développement technique et coordinateur des projets Sodar et de bien d'autres projets du CRPE et CETP dont les radar Ronsard ou des radar embarqués sur aéronefs. Ces personnes m'ont laissé un souvenir inoubliable. Ils étaient remarquables à tous points de vue : une aptitude à la logistique de terrain se manifestant par efficacité, rigueur, comportement amical, dans ce qui peut s'intituler « l'ambiance de terrain ». L'ambiance de terrain est quelque chose d'important définie par les relations humaines qui font qu'indépendamment du fonctionnement des instruments, une expérience soit une réussite. Ces personnes « sans histoire » au sens historique, méritent d'être prises en compte dans ce récit, histoire d'une recherche. Mais l'orchestre ne serait complet sans les « informaticiens » temps réel (ceux qui réalisent les programmes de commande instrumentale) qui ont contribué au projet Sodar et compté dans sa réussite. Ils ont souvent participé aux expériences (Gérard Belbeoch, Brigitte Piron, Patrick Célin).

Fonctionnement d'un Sodar

Fonctionnement d'un Sodar

Sodar et principe du sondage : A gauche, le premier Sodar triple du CNET/ CRPE en 1974 : il est monostatique (chaque antenne fonctionne en émission et réception). L'impulsion est de durée $\tau = 100 \text{ ms}$ et de fréquence f , variable entre 1000 Hz et 5000 Hz. A droite, le découpage en portes de distance $\Delta r = c\tau/2 = 17 \text{ m}$, avec un premier niveau à 22 m. La période de répétition de l'impulsion est $T = 4 \text{ s}$. La turbulence thermique est l'écho Sodar ou réflectivité : plus la turbulence thermique est forte, plus l'écho est intense. A cette réflectivité est associée une dérive Doppler proportionnelle à la vitesse du vent le long des antennes, ce qui permet de mesurer le vecteur vent. Les sondages sont effectués jusqu'à 540m (32 portes).

A gauche, un Facsimile Sodar montrant l'érosion de l'inversion thermique en fonction du temps et de l'altitude : à partir de 9 heures en temps local LT, un régime de plumes convectives (plus c'est noir, plus la turbulence thermique est intense). A droite, superposition de la réflectivité en rouge avec la vitesse verticale ascendante en jaune et descendante en bleu. On remarque en orange, des plumes convectives dans un air descendant et en bleu, des structures sans turbulence, dans un air descendant. L'inversion thermique, en violet ou en orange est le siège de mouvements turbulents ascendants ou descendants.

Pour en savoir plus

Andrei.S. Monin, "Characteristics of the scattering of sound in a turbulent atmosphere", Sov. Phys. Acoust., 1962, N° 7, pp. 370-373.

Lindsay, G., McAllister, "Acoustic sounding of the lower atmosphere", J. Atm. Terr. Phys., 1968, N°30, pp. 1439-1440.

Michel Aubry, Robert Chezlemas and André. Spizzichino, "Preliminary results of the atmospheric sounding program at CNET", Boundary Layer Meteorol., 1974, N°7, pp.513-519.

Edmond. H. Brown and Freeman F. Hall, JR., "Advances in Atmospheric Acoustics", Reviews of Geophysics and Space Physics, 1978, 16, N°1, pp. 47-110.

William D. Neff, and Richard L. Coulter, "Acoustic Remote Sensing", in D. Lenschow (editor), Probing the Atmospheric Boundary Layer, 1986, pp. 201-239, American Meteorological Society.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Chong, M. « Mesure des profils de vent par sodar-doppler », Note Technique CRPE/22, 1976 103 p.
- [2] Aubry, M., R. Chezlemas, A. Spizzichino, “Preliminary Results of the Atmospheric Acoustic Sounding Program at CNET”, *Boundary Layer Meteorol.*, 1974, 7, p. 513-319.
- [3] Spizzichino, A., “Discussion of the Operating Conditions of a Doppler Sodar”, *J. Geophys. Res.*, 1974, 79, 36, p. 5585-5591.
- [4] Spizzichino, A., “A spectral acoustic and radio waves scattered by atmospheric turbulence in the case of radar and sodar experiments”, *Ann. Geophys.*, 1975, 31, 4, p. 433- 445.
- [5] Estival, A. and Aubry, M, « Interprétation des échos sodar en termes de stratifications atmosphériques », *La Météorologie VI*, 1975, 5, p. 33-42.
- [6] Weill A., M. Aubry, F. Baudin, J. Heissat, “a study of temperature fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer”, *Boundary Layer Meteorol.*, 1976, 10, 3, p. 337- 346.
- [7] Kaynejad Mahomed, « mesure du taux de dissipation turbulent », thèse de Docteur- Ingénieur, Paris VI., 1975.
- [8] Weill A., W. Brandes, C. Oberto and P. Bares, « Anémomètre à fil chaud embarquable sur ballon captif » *J. Phys. Colloques* 37, 1976, C1-173-C1-175 DOI: 10.1051/j.phys.,976125.
- [9] Weill, A., Baudin, F., P. Van Grunderbeeck, P. Leberre, “turbulence structure in temperature inversion and in convection fields as observed by Doppler Sodar”, *Boundary Layer Meteorol.*, 1976, 10, 3, p. 337-346.
- [10] Eymard Laurence, Thèse de troisième cycle : « ondes de gravité dans la couche limite planétaire : étude par sondage acoustique », Université de Paris VI, 1978.
- [11] Van Grunderbeeck Patrick, thèse de troisième cycle : «Etude de la détermination des profils atmosphériques de température et humidité par sondage acoustique multifréquence», Université de Paris VI, 1976.
- [12] Van Grunderbeeck P., « Etude de la détermination des profils atmosphériques de température et humidité par sondage acoustique multi-fréquence », *la Météorologie*, 1975,12, p. 51-69
- [13] Eymard, L. and A. Weill, “A study of gravity waves in the boundary layer by acoustic sounding”, *Boundary-Layer Meteorol.*, 1979, 17, 2, p. 231-245.
- [14] Strauss B., « Estimation du bilan d'énergie cinétique turbulent par sondage acoustique ». Document de travail CRPE, 1980, N° 1063.
- [15] André, J. C., De Moor, G., Lacarrère, P., Therry, G., and du Vachat, R.: 1978, “Modeling the 24-Hour Evolution of the Mean and Turbulent Structures of the Planetary Boundary Layer”, *J. Atmos. Sci.*, 1978, 35, p. 1861-1885.
- [16] Weill A., L. Eymard, M.E. Lequere, C. Klapisz, F. Baudin, and P. Van Grunderbeeck, “Investigation of the planetary boundary layer with an acoustic sounder”, in *Proceedings of the IVth symposium on 'meteorological observations'*, 1978, Denver, AMS, p. 415-421.

- [17] Weill A, Klapisz C, Strauss B, Baudin F, Jaupart C, Van Grunderbeeck P and Goutorbe J. P. 1980 "Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuations with an acoustic Doppler sodar", *J. Appl. Meteorol.*, 1980, 19, p. 199–205.
- [18] Taconet Odile, « Propriétés et structure des cellules convectives dans la couche limite atmosphérique par sondage acoustique Doppler », thèse de 3ème cycle, Paris XI, 25 mars 1980.
- [19] Taconet O., A. Weill, "Convective plumes in the atmospheric boundary layer as observed with an acoustic Doppler sodar", *Boundary Layer Meteorol.*, 1982, 25, p.143-158
- [20] Taconet, O. and A. Weill, "Vertical Velocity Field in the Convective Boundary Layer as Observed with an Acoustic Doppler Sodar", *Boundary-Layer Meteorol*, 1983, 23, p.133–151.
- [21] Van Grunderbeeck, P., Leberre, P., Weill, A., Dubosclard, G., and Itier, B, « Mouvements convectifs de la couche limite atmosphérique observés au moyen de sondeurs acoustiques Doppler et d'instruments portés par un ballon captif », *Compt. Acad. Sci. Paris*, 1979, 288, p. 209–212.
- [22] Dubosclard G., "A comparison between observed and predicted values for the entrainment coefficient in the planetary boundary layer", *Boundary Layer Meteorol.*, 1980, 18, p. 473 – 483,
- [23] Klapisz, C., A. Weill, "Mean horizontal wind in inversion-capped convective boundary layer", *J. Appl. Meteor.*, 1982, 21(5), p. 648-655.
- [24] Weill A., D. Vidal-Madjar, C. KLAPISZ, J.P. GOUTORBE, « La couche limite hivernale, Journée d'Evry, colloque environnement », 1980.
- [25] Louis, J.F., A. Weill, and D. Vidal-Madjar, "Dissipation length in stable layers", *Boundary Layer Meteorol.*, 1983, 25(3), p. 229-243.
- [26] Mon, J.P., A. Weill, and L. Martin, "Effect of tropospheric disturbances on a 4.1 and 6.2 GHz line of sight path", *Ann. Télécomm.*, 1980, 35, (11-12), p. 468-471.
- [27] Eymard, L., Weill A. , "Investigation of Clear Air Convective Structures in the PLB Using Dual Doppler Radar and Doppler Sodar", *J.A.S.*, 1985, 21, No. 12, p. 1891-1906.
- [28] Sommeria G. and J. Testud, "COPT 81: A Field Experiment Designed for the Study of Dynamics and Electrical Activity of Deep Convection in Continental Tropical Regions", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1984, 65, 1, p. 4-10.
- [29] Dubosclard Georges (1986), Thèse d'Etat, IOPG (Institut Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand).
- [30] Weill, A., F. Baudin, C. Mazaudier, G. Desbraux, C. Klapisz, J. P. Goutorbe, A.G.M.Driedonks, A. Druilhet, and M. Durand, "A mesoscale shear convective organization observed during COAST experiment: Acoustic sounder measurements", *Bound. Layer Meteorol.*, 1988, 44(4), p. 359-371.
- [31] Weill, A., C. Klapisz, and F. Baudin, "The CRPE minisodar: Applications in micrometeorology and in physics of precipitation". *Atmos. Res.*, 1983, 20, p. 317–335.
- [32] Coulter, R. L., and T. L. Martin, "Results from a high power, high frequency sodar", *Atmos. Res.*, 1986, 20, p. 257–270.
- [33] Coulter R.L., T. J. Martin, and T. M. Weckwerth, "Minisodar measurements of rain", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989, 6, p. 369–377.
- [34] Desbraux Georges, « climatologie dynamique de la turbulence dans la couche limite atmosphérique durant l'expérience COAST 83, étude statistique à partir de sondages acoustiques », Université de Clermont-Ferrand, 1985.

- [35] Desbraux, G. and A. Weill, "Mean turbulent properties of the stable boundary layer observed during the COAST experiment". *Atmos. Res.*, 1986, 20, p. 151-164.
- [36] Weill A., C. Mazaudier, F. Baudin, C. Klapisz F. Leca, M. Masmoudi, D. Vidal Madjar, R. Bernard, O. Taconet, B.S. Gera, A. Sauvaget, A. Druilhet, P. Durand, J. Y. Caneil, P. Mery, G. Dubosclard, A. C. M. Beljaars, W. A. Monna, J. G. Van Der Vliet, M. Crochet, D. Thomson, T. Carlson, "The Mesogers 84 experiment: a report", *Boundary Layer Meteorol.*, 1988, 42,3, p. 251-264.
- [37], Zhong Ming. Thèse à l'Université de Paris VI. Estimation du rayonnement pendant les situations nuageuses de beau temps de MESOGERS 84, 1991.
- [38] Zhong, M., A. Weill, and O. Taconet, "Estimation of net radiation and surface heat fluxes using NOAA-7 satellite infrared data during fair-weather cloudy situations of Mesogers-84 experiment" *Boundary Layer Meteorol.*, 1990, 53, 4, p. 353-370.
- [39] Masmoudi Mohamed, Thèse université de Paris VI, Etude de l'écoulement à moyenne échelle au cours de l'expérience Mésogers 84, 1988.
- [40] Masmoudi M. and A. Weill, "Doppler sodar measurement of atmospheric mesoscale spectra : The Taylor hypothesis analysis" *J. Climate Appl. Meteor.*, 1988, 27, (7), p. 864- 873.
- [41] Gera B.S., A. Weill, "Doppler sodar analysis of the frontal friction in relation to the frontal slope" *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, 26 (8), p. 885-891.
- [42] Gera B.S. and A. Weill, "Doppler Sodar observations of the boundary-layer parameters and a frontal system during the "Mesogers 84" experiment", *Boundary Layer Meteorol.*, 1991,54, 1-1, p. 41-57.
- [43] Soares J.V., R Bernard, O Taconet, D Vidal-Madjar, A Weill, "Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements", *Journal of hydrology*, 1988, 99 (3-4), p. 281-296.
- [44] Weill A., "Indirect measurement of fluxes using Doppler Sodar". In *Land Surface Evaporation: measurement and parametrization*, (T. Schmugge and J.C. André Editors), 1991, p. 301-311.
- [45] Andre J.C., J.P. Goutorbe, A. Perrier, F. Becker P. Bessemoulin, et al., "Evaporation over land-surfaces: First results from HAPEX-MOBILHY special observing period". *Ann. Geophysicae*, European Geosciences Union, 1988, 6, p.477-492. <hal-01011981>.
- [46] Mazaudier C., J. Bouvet and A. Weill, "Sodar wind speed profiles over forested boundary layer during the Hapex - Mobilhy campaign", *Ann. Geophysicae*, 1991, 9(8), p. 501-509.
- [47] Parlange M.B. and W. Brutsaert, "Are radiosonde time scales appropriate to characterize boundary layer wind profiles", *J. Appl. Meteorol.*, 1990, 29, 3, p. 249-255.
- [48] Weill A. and H.R. Lehmann, "twenty years of acoustic sensing: a review and some applications", *Z. Meteorol.*, 40(4), 1990, p. 241-250.
- [49] Kotroni V. and Amory-Mazaudier, C., "Influence of orographic and canopy conditions on friction velocities observed during frontal events using Doppler sodar observations". *J. Appl. Meteorol.*, 1993, 32, p. 506-521.
- [50] Kotroni V., C. Amory-Mazaudier, K. Lagouvardos, "Doppler Sodar observations of a cold front during Pyrex Experiment: orographic aspects", *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15, 2, p. 489-497.
- [51] Beyrich F. and A. Weill, "Some aspects of determining the stable boundary layer depth from sodar data" *Boundary-Layer Meteorol*, 1993, 63, 1-2, p. 97-116.

- [52] Weill A., G. Brandeis, S. Vergniolle, F. Baudin, J. Bilbille, J.F. Fèvre, B. Piron and X. Hill, "Acoustic sounder measurements of the vertical velocity of volcanic jets at Stromboli volcano", *Geophys. Res. Lett.*, 1992, 19, p. 2357-2360.
- [53] Brandeis, G., " faudra-t-il un jour évacuer Naples? La dynamique des volcans", *La Recherche*, 1995, 274, p. 301-304.
- [54] Dubosclard G., R. Cordesses, P. Allard, C. Hervier, M. Coltelli and J. Kornprobst, "First Testing of a Volcano Doppler Radar (Voldorad) at Mount Etna, Italy", *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26, 22, p. 3389-3392.

NOTES

1. Alain Weill, « Les Activités Sodar et couche limite au CNET/CRPE », 2018, 29 p.
-

ABSTRACTS

Abstract : An experimental program on acoustic Doppler sounding has been initiated and developed at CNET/CRPE/CNRS for 25 years. Scientific questions and their evolutions about Boundary Layer and associated phenomena from dedicated experiments are presented. For each topic, since the first Sodar, a simple description of the experimental scheme and the national and international context are enounced. Through experiments where actors on the ground are illustrated from a narrative point of view, a heuristic approach with surprises and discoveries is also described.

Résumé : Un programme expérimental de sondage acoustique Doppler a été initié et développé au CNET/CRPE/CNRS sur 25 années. Sont définies les questions scientifiques et leurs évolutions à partir d'expériences de terrain dédiées à l'étude de la couche limite et de phénomènes associés. Sur chaque thème, depuis l'instrumentation initiale, un descriptif simplifié des dispositifs et le contexte scientifique national et international sont énoncés. Au travers d'expériences où les acteurs de terrain sont relatés de façon anecdotique, est décrite une approche heuristique avec des surprises et des découvertes.

INDEX

Mots-clés: Mots clés : sondages acoustiques atmosphériques Doppler ; couche limite atmosphérique ; Sodar micrométéorologie ; panaches convectifs et ondes de gravité ; turbulence.

Keywords: Keywords : Doppler acoustic sounding ; atmospheric boundary layer ; Sodar micrometeorology ; convective plumes and gravity waves ; turbulence.

AUTHOR

ALAIN WEILL

directeur de recherche émérite au laboratoire atmosphères, observations spatiales (LATMOS),
docteur ès sciences 1971, outstanding member of ISARS (1996) alain.weill@latmos.ipsl.fr