

Projet ANR-15-CE31-0015

AlpArray-FR

Programme générique (défi de tous les savoirs) 2015

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC.....	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics.....	2
B.2	Résumé consolidé public en français.....	2
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	3
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	5
C.1	Résumé du mémoire.....	5
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique.....	6
C.4	Résultats obtenus	7
C.5	Exploitation des résultats.....	13
C.6	Discussion	14
C.7	Conclusions	15
C.8	Références	15
D	LISTE DES LIVRABLES	16
E	IMPACT DU PROJET	17
E.1	Indicateurs d'impact	17
E.2	Liste des publications et communications	17
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	22
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	23

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	AlpArray-FR
Titre du projet	Voir et comprendre les Alpes en 3D, de la croûte au manteau
Coordinateur du projet (société/organisme)	Anne Paul, ISTerre, CNRS & Univ. Grenoble Alpes
Période du projet (date de début – date de fin)	01/10/2015 – 31/03/2020
Site web du projet, le cas échéant	https://www.isterre.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/anne-paul/alparray-fr/le-projet-anr-alparray-fr/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme Anne Paul
Téléphone	04 76 63 52 58 / 06 76 66 58 00
Adresse électronique	anne.paul@univ-grenoble-alpes.fr
Date de rédaction	Avril 2021

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	IPGS (devenu ITES au 01/01/21), Univ. de Strasbourg, Mme Alessia Maggi Geoazur, Univ. Côte d'Azur, M. Jean-Xavier Dessa
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

AlpArray : Voir et comprendre les Alpes en 3D, de la croûte au manteau

Un réseau sismologique dense et homogène sur les Alpes pour étudier et comprendre la structure de la chaîne en 3D, de la croûte au manteau

Des millions d'Européens vivent dans les régions alpines et sont affectés par l'orogène, que ce soit par sa topographie, sa géologie ou les risques naturels qu'elle engendre. Les géologues ont étudié la chaîne alpine depuis plus de 100 ans, mais sa structure profonde restait mal connue faute de données sismologiques de qualité. Le projet AlpArray ambitionnait de combler ce manque par le déploiement d'un réseau sismologique terre-mer dense et homogène, couvrant les Alpes (s.l.) sur 11 pays pendant 2-3 ans. Composante française d'AlpArray, le projet AlpArray-FR a permis l'installation de 63 stations temporaires à terre et de 8 stations fond de mer, fournissant une contribution majeure au réseau complet de 276 stations temporaires. De nombreuses équipes travaillent à l'analyse de la base de données générée. Nous avons calculé des images de la structure de la croûte et du manteau supérieur alpins, dont la résolution exceptionnelle a permis la découverte de structures profondes inconnues jusque-là et la corrélation aux données géologiques de surface. Une équipe de géologues, géophysiciens et modélisateurs travaille à la construction d'un modèle géologique 3D qui a commencé à apporter des connaissances nouvelles sur la chaîne.

Une base de données sismologiques exceptionnelle par la densité de ses mesures permettant l'utilisation des méthodes d'imagerie les plus innovantes

Le réseau sismologique AlpArray déployé sur 11 pays européens a fourni des données de haute qualité grâce à la mise en place de procédures communes de sélection des sites de mesure, d'installation et de suivi du fonctionnement des capteurs. D'importantes améliorations techniques ont été apportées au système européen distribué d'archivage de données sismologiques pour qu'il puisse recevoir la plupart des données en temps quasi-réel et les rendre accessibles aux participants sous 3 jours. Les enregistrements du réseau franco-allemand de 24 capteurs fond de mer en Méditerranée sont distribués comme les données enregistrées à terre, de façon transparente pour les utilisateurs. La densité du réseau a permis le développement et l'application de nouvelles méthodes d'inversion probabiliste de données de dispersion d'ondes de surface issues du bruit de fond. Nous avons pu calculer des modèles haute-résolution de vitesse des ondes sismiques avec estimation des incertitudes, cartographier l'anisotropie radiale et azimutale des ondes de surface, ainsi que l'atténuation des ondes dans la croûte alpine. La mise en œuvre de méthodes innovantes d'inversion de formes d'ondes complètes est en cours.

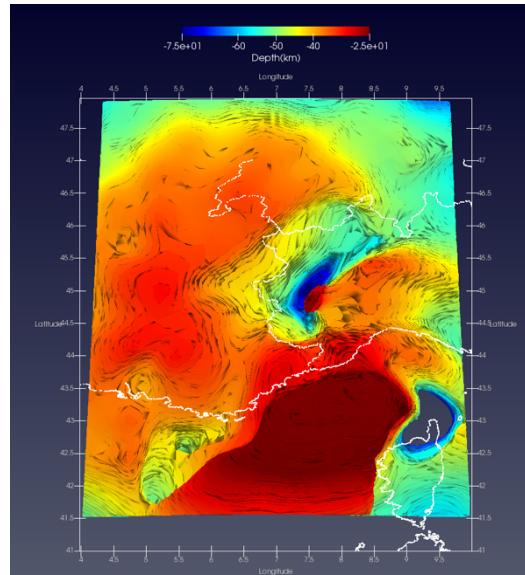
Résultats majeurs du projet

La base de données sismologiques acquise par un réseau de capteurs dense et homogène sur l'arc alpin et ses avant-pays est la production majeure du projet. Nos tomographies sismiques de la structure crustale ont une excellente résolution (~50 km) qui permettra de construire un modèle géologique 3D de la lithosphère alpine en extrapolant en profondeur les données géologiques de surface. Ce projet a démarré dans le cadre du chantier « Alpes et bassins périphériques » sélectionné par le programme RGF (Référentiel Géologique de la France), notamment pour valoriser les résultats d'AlpArray-FR.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet

L'équipe AlpArray-FR est à l'origine de 11 publications parues dans des revues internationales et 5 actuellement soumises ou en révision, dont 14 portent sur l'exploitation du bruit sismique. 18 publications issues de travaux d'autres équipes européennes sont parues co-signées par le groupe de travail AlpArray dont font partie les partenaires d'AlpArray-FR. Les données AlpArray ont été exploitées dans 3 thèses soutenues et 1 en cours préparées à ISTerre (Grenoble), l'IPGS (Strasbourg) et le LGL-TPE (Lyon).

Illustration



Vue 3D de la surface d'isovitesse d'onde S $Vs=4.3$ km/s dans les Alpes occidentales. Cette surface est un bon analogue de la limite croûte-manteau (Moho), sauf au nord de la Corse. Figure issue de la tomographie de bruit ambiant de Nouibat et al. (soumis)

Informations factuelles

AlpArray-FR est un projet de recherche fondamentale coordonné par l'ISTerre (Grenoble, A. Paul) dont les partenaires financés sont l'ITES (ex-IPGS, Strasbourg, A. Maggi) et Geoazur (Nice, J-X. Dessa) et les partenaires non financés le LGL-TPE (Lyon) et l'IPGP (Paris). Le projet a démarré le 01/10/2015 et a duré 66 mois. Il a bénéficié d'une aide de l'ANR de 620 k€ pour un coût global de l'ordre de 3700 k€.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Probing Alpine geodynamics in 3D with state-of-the-art seismic arrays and tomography

A dense and homogeneous seismological network in the Alps to study and understand the structure of the chain in 3D, from crust to mantle

Millions of Europeans live on land formed by the Alpine orogeny and are affected by its topography, geology and associated natural hazards. The Alps have been intensely studied by geologists for more than a century, but the belt has not been given the attention it deserves using recent geophysical techniques. The ambition of the European AlpArray collaborative project was to fill that gap by providing unified and homogeneous seismological land-sea coverage of the greater Alpine area in 11 countries during 2-3 years. As the French component of AlpArray, the AlpArray-FR project has enabled the installation of 63 temporary stations on land and 8 ocean-bottom seismometers, providing a major contribution to the complete network of 276 temporary stations. A large number of European teams work on the analysis of recorded data. We have computed images of the Alpine crust and upper mantle structure, whose exceptional resolution enables the discovery of previously unknown deep structures and their correlation with surface geological data. A team of geologists, geophysicists and modellers is working on the construction of a 3D geological model that has started to provide new knowledge about the belt.

An outstanding seismological database due to the density of its measurements allowing the use of the most innovative imaging methods

With common procedures for selecting measurement sites, installing and monitoring the sensor operation, the AlpArray seismological network spread over 11 European countries has provided high quality data. The European distributed seismic data archiving system has undergone major technical improvements in order to receive most data in near-real time and provide access to participants within 3 days. Records from the French-German network of 24 sea-bottom stations in the Mediterranean are distributed using the same procedures as data recorded on land, in a way that is transparent to end-users. The high density of the network has enabled the development and use of new probabilistic inversion methods of surface wave dispersion data from ambient seismic noise. We have computed high-resolution seismic wave velocity models with uncertainty estimation, mapped radial and azimuthal anisotropy of surface waves, and wave attenuation in the Alpine crust. The implementation of innovative methods for full waveform inversion is currently underway.

Major results

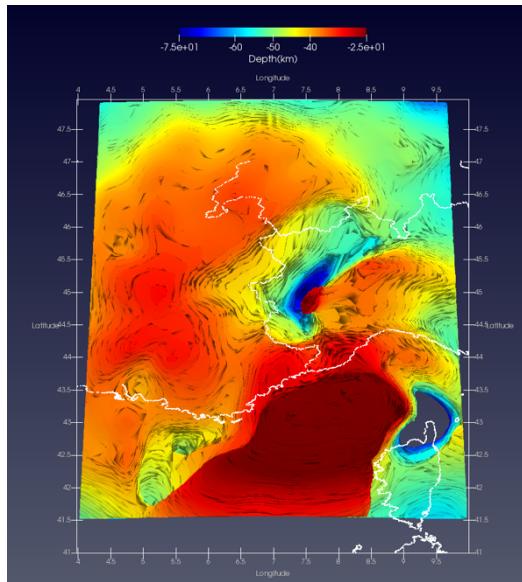
The seismological database recorded by the dense and homogeneous network over the Alpine arc and its forelands is the major output of the AlpArray project. Our seismic tomographies of the crustal structure have an excellent resolution (~50 km) which will allow building a 3D geological model of the Alpine lithosphere by extrapolating the surface geological data in depth. This 3D geological model construction project started within the framework of the "Alps and peripheral basins" project selected by the RGF (Référentiel Géologique de la France) programme, in particular to enhance the results of AlpArray-FR.

Scientific production since the beginning of the project

The AlpArray-FR team has published 11 papers in international peer-reviewed journals and 4 papers are currently under review. Thirteen papers deal with ambient seismic noise. Eighteen publications resulting from the work of other European teams are co-authored by the AlpArray working group,

which includes the AlpArray-FR partners. AlpArray data have been used in three defended PhD theses and one in progress, at ISTerre (Grenoble), ITES-IPGS (Strasbourg) and LGL-TPE (Lyon).

Figure



Caption: 3-D view of the iso-velocity surface $V_s=4.3$ km/s in the Western Alps. This surface is considered as a good proxy of the crust-mantle boundary (Moho), except to the North of Corsica. Figure from the ambient-noise tomography by Nouibat et al. (submitted).

Facts and figures

AlpArray-FR is a fundamental research project coordinated by ISTerre (Grenoble, A. Paul) whose funded partners are ITES (ex-IPGS, Strasbourg, A. Maggi) and Geoazur (Nice, J-X. Dessa) and non-funded partners LGL-TPE (Lyon) and IPGP (Paris). The project started on 01/10/2015 and lasted 66 months. It benefited from an ANR grant of 620 k€ for a global cost of about 3700 k€.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : / non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Des millions d'Européens vivent dans les régions alpines et sont affectés par l'orogène, que ce soit par sa topographie, sa géologie ou les risques naturels qu'elle engendre. Les géologues ont étudié la chaîne alpine depuis plus de 100 ans, mais sa structure profonde restait mal connue faute de données sismologiques de qualité. Le projet AlpArray ambitionnait de combler ce manque par le déploiement d'un réseau sismologique terre-mer dense et homogène, couvrant les Alpes (s.l.) sur 11 pays pendant 2-3 ans. Composante française d'AlpArray, le projet AlpArray-FR a permis l'installation de 63 stations temporaires à terre et de 8 stations fond de mer, fournissant une contribution majeure au réseau complet de 276 stations temporaires. De nombreuses équipes travaillent à l'analyse de la base de données générée. Nous avons calculé des images de la structure de la croûte et du manteau supérieur alpins, dont la résolution exceptionnelle a permis la découverte de structures profondes inconnues jusque-là et la corrélation aux données géologiques de surface. Une équipe de géologues, géophysiciens et modélisateurs travaille à la construction d'un modèle géologique 3D qui a commencé à apporter des connaissances nouvelles sur la chaîne.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

L'orogenèse alpine est à l'origine de la surface sur laquelle vivent des millions d'Européens, de la géologie et ses ressources naturelles, de la topographie, des déformations actives et les risques naturels qui lui sont associés. Il est ainsi particulièrement important de comprendre la dynamique de cet orogène, de se donner les moyens de remonter dans le passé pour tenter de prévoir l'avenir. Comme la plupart des chaînes du bassin Méditerranéen, les Alpes ont une géométrie particulièrement complexe et tri-dimensionnelle à petite échelle. Les panneaux plongeants des subductions sont détachés ou déchirés, la polarité d'une subduction peut changer en quelques centaines de km, la lithosphère plongeante peut être océanique ou continentale, épaisse ou amincie. Depuis plus d'un siècle, les études géologiques ont fourni des contraintes spatiales et temporelles sur la formation des Alpes et ses subductions si complexes. Elles en ont fait une chaîne emblématique où de nombreux concepts d'importance majeure ont été définis, comme les nappes de charriage ou la subduction continentale. Mais le manque de données géophysiques sur la structure lithosphérique et asthénosphérique empêchait de prolonger les données géologiques vers le bas, de relier les processus crustaux aux processus mantelliques dans un schéma thermomécanique cohérent.

Le principal enjeu scientifique de l'initiative européenne AlpArray, dont le projet AlpArray-FR est la composante française, était de combler l'important déficit de connaissance sur les structures profondes de la chaîne (croûte et manteau supérieur). Il s'agissait d'acquérir des données sismologiques de qualité par un réseau dense (~50 km entre stations) et homogène sur les Alpes et leurs avant-pays, incluant la mer Ligure entre Corse et continent. Un deuxième enjeu était de développer et d'appliquer à ces données des méthodes d'imagerie innovantes capables de fournir des tomographies de résolution suffisante pour qu'elles puissent être corrélées, comparées, confrontées aux données géologiques de surface. Enfin, le troisième enjeu était de mieux comprendre la dynamique actuelle de la chaîne et les aléas induits en améliorant les catalogues de sismicité pour mieux localiser les failles sismogènes, pour clarifier les liens entre séismes et déformation mesurée par géodésie, notamment le soulèvement rapide des zones internes, et comprendre les moteurs de la sismicité et des déplacements verticaux dans les Alpes occidentales où la convergence entre plaques Europe et Adria est nulle.

Le contexte était particulièrement favorable au démarrage du projet. L'initiative européenne AlpArray était née en 2010 sur le constat que le réseau sismologique temporaire pouvait être mis en place sur les 11 pays concernés, à condition de disposer des équipements et financements sur une base nationale. Les financements correspondants existaient dans plusieurs des pays concernés (Suisse, République Tchèque, Autriche, etc.). Les parcs nationaux d'instruments sismologiques, comme Sismob ou le parc de sismomètres fond de mer INSU-IPGP en France, pouvaient fournir les équipements nécessaires. En France, le déploiement du réseau national RESIF-RLBP (réseau large-bande permanent du projet Réseau sismologique et géodésique français) avait démarré sur financement du Programme Investissements d'Avenir. Le système européen distribué d'archivage et de distribution de données sismologiques EIDA (European Integrated Data Archive, <http://www.orfeus-eu.org/data/eida/>) commençait à bien fonctionner et il était (à peu près) techniquement prêt à archiver et distribuer les données du réseau temporaire AlpArray de façon homogène et transparente pour l'utilisateur depuis 6 nœuds différents, dont le nœud français RESIF-DC (centre de données RESIF) basé à Grenoble.

Une expérience sismologique temporaire nommée CIFALPS (China-Italy-France Alps seismic transect) avait déjà été menée en 2012-2013 le long d'un profil au travers des Alpes sud-occidentales. Des résultats d'importance majeure étaient déjà publiés, ou en passe de l'être, comme la découverte du Moho (limite croûte-manteau) de la plaque européenne à 75-80 km de profondeur sous le massif de Dora Maira, première preuve sismologique (donc directe) de subduction continentale dans les Alpes (Zhao et al., 2015). Cette expérience a montré ce que l'analyse de données sismologiques de qualité peut apporter à la connaissance de la structure lithosphérique des Alpes. Sa valorisation scientifique a grandement bénéficié d'une vraie collaboration interdisciplinaire entre géologues et géophysiciens qui a posé les bases d'une future exploitation similaire des données AlpArray.

Enfin, de nouvelles méthodes d'imagerie sismologique comme la tomographie de bruit ambiant (Stehly et al., 2009) ou l'inversion de formes d'ondes complètes étaient en cours de développement et

n'attendaient plus que les données d'un réseau dense pour donner leur pleine mesure dans l'étude de la structure du sous-sol alpin.

Pour un état de l'art sur l'apport de l'imagerie sismologique à la connaissance de la structure de la lithosphère alpine avant AlpArray, le lecteur pourra se référer à Paul (2021).

C.3 RESULTATS OBTENUS

Action 1 : acquisition et distribution de données sismologiques

Le projet ANR AlpArray-FR a permis l'installation de 63 stations temporaires à terre (2016-2020) et de 8 stations fond de mer (OBS, 2017-2018), fournissant une contribution majeure au réseau AlpArray complet de 276 stations temporaires, dont 24 OBS en mer Ligure (Hetényi et al., 2018). Il a aussi accéléré de plusieurs mois à plusieurs années l'installation de 17 stations permanentes du réseau permanent RESIF-RLBP dans l'Est de la France. La base de données sismologiques acquise par le réseau de capteurs dense et homogène sur l'arc alpin et ses avant-pays est la production majeure du projet AlpArray-FR, et d'AlpArray en général. L'ensemble de données AlpArray, dont le code-réseau attribué par la fédération internationale des réseaux sismologiques (FDSN) est Z3, est archivé et distribué par 6 nœuds EIDA de façon complètement homogène et transparente pour les utilisateurs. Les données des sismomètres fond de mer sont également archivées et distribuées par les mêmes procédures. Toutes les données de Z3 sont sous embargo, et réservées aux participants au projet jusqu'au 01/04/22. A partir de cette date, les données seront totalement ouvertes. Le DOI de l'ensemble de données Z3 est https://doi.org/10.12686/alparray/z3_2015.

Les données du projet AlpArray-FR (63 stations terrestres dans l'Est de la France et 8 OBS en mer Ligure) sont archivées et distribuées par le nœud RESIF-DC basé à Grenoble et leur taille totale est de 2.1 To. Le pourcentage de récupération des données, ou rapport entre la durée pour laquelle des données sont disponibles et la durée totale d'installation des stations est de 94%, ce qui est tout à fait remarquable et rarement atteint pour ce type d'expérience. Nous devons ce succès aux équipes techniques d'ISTerre, de l'IPGS et de Geozur, très compétentes et impliquées dans le projet, ainsi qu'à l'utilisation de la télétransmission par modem GSM partout où la couverture le permettait, et ce, pour la première fois en France.

Action 2 : tomographie sismique de la croûte et du manteau alpin par des méthodes innovantes

L'exploitation des données du réseau AlpArray est encore largement en cours dans un grand nombre de laboratoires et d'instituts en Europe. Il est probable qu'elle se prolongera pendant des années. L'accord de collaboration signé par les participants à AlpArray précise que toutes les publications (et communications) utilisant les données Z3 doivent avoir «AlpArray Working Group» à la fin de la liste d'auteurs, ce qui permet de les trouver avec les outils bibliographiques comme ISI-Web of Science. A ce jour (fin avril 21), 18 publications incluant le groupe de travail AlpArray dans la liste d'auteurs, mais sans co-auteur de l'équipe française AlpArray-FR sont publiées et au moins 5 sont soumises. Des membres de l'équipe française sont auteurs ou co-auteurs de 11 publications et 5 soumises (cf. liste en E.2). Notez que la première publication dans un journal international à comité de lecture utilisant les données AlpArray a été réalisée par notre équipe en 2018 (Lu et al., 2018). Quatre thèses, dont trois ont été soutenues (Lu, 2019 ; Alder, 2020 ; Soergel, 2020) et une est en cours ont utilisé ou utilisent les données AlpArray dans des laboratoires participants au projet AlpArray-FR.

Action 2.1 : calcul d'observables géophysiques

La liste de livrables de l'Action 2 incluait le calcul d'observables géophysiques destinées à être utilisées en entrée des tomographies. Nous avons calculé une base complète de données de corrélation de bruit ambiant utilisant toutes les stations permanentes disponibles en Europe occidentale ainsi que les stations des réseaux temporaires auxquels nous avons accès, soit AlpArray, Cifalps, Cifalps-2, et EASI. Cette banque de données couvre la période 2015-2020, pour environ 1500 stations. Elle a été utilisée dans une grande partie des publications sur les corrélations de bruit dont le premier auteur fait partie

de l'équipe (Lu et al., 2018, 2020 ; Soergel et al., 2020 ; Alder et al., 2021 ; Lu et al., en révision ; Nouibat et al., soumis). Nous avons également partagé cette banque de données avec les participants d'AlpArray qui le souhaitaient (Sadegi-Bagherabadi et al., 2021). Un autre livrable annoncé était une banque de données de fonctions récepteur, signaux issus d'enregistrements de télésismes qui donnent accès aux ondes converties sur les discontinuités majeures de vitesse comme le Moho ou les discontinuités mantelliques. Une telle banque de données homogène a été constituée au sein du groupe de travail « fonctions récepteur » d'AlpArray, pour toutes les stations permanentes ou temporaires disponibles dans la région. Plusieurs membres de l'équipe AlpArray-FR ont participé à ce groupe de travail et traité et sélectionné les données des stations françaises. Mais l'exploitation des données par le groupe de travail a pris du retard du fait de la pandémie et d'autres facteurs extérieurs.

Enfin, nous avions projeté de collecter les données de champ de gravité disponibles dans les Alpes occidentales. Cette tâche a été réalisée par le groupe de travail « gravité » de AlpArray dont fait partie G. Balmino du BGI (bureau gravimétrique international, OMP Toulouse). Ce groupe a retraité l'intégralité des résultats de mesure du champ de gravité à terre de façon homogène pour calculer des cartes d'anomalie de Bouguer et d'anomalie à l'air libre pour toute la région alpine (Zahorec et al., en révision). Les données résultantes vont être distribuées aux pas de 4 km en accès libre, et de 2 km en accès restreint au groupe AlpArray dans un premier temps.

Action 2.2 : tomographie de bruit ambiant

Au-delà de l'acquisition et archivage des données du réseau temporaire, c'est dans ce domaine que l'équipe de projet a le plus travaillé et produit de résultats. Trois thèses, dont une en cours ont exploité les données AlpArray pour la tomographie par corrélation de bruit à ISTerre (Y. Lu, 2019 ; D. Soergel, 2020 ; A. Nouibat, 2019-2022), et une quatrième a utilisé les données AlpArray dans la 2^{ème} partie de sa thèse au LGL-TPE de Lyon (C. Alder, 2020). Toutes ont développé et appliqué de nouvelles méthodes d'inversion pour extraire des données le plus d'informations avec la plus haute résolution possible.

1- Modèles lithosphériques de vitesse d'onde S (thèses Y. Lu & A. Nouibat, postdoc C. Harris)

Y. Lu (Lu, 2019) a mis en place une procédure d'inversion probabiliste des données de dispersion des ondes de Rayleigh pour calculer une tomographie en vitesse d'onde S de la croûte d'Europe occidentale, dont les Alpes sont bien sûr la zone la mieux résolue (Lu et al., 2018). Sa principale découverte dans les Alpes occidentales est un approfondissement brutal de la limite croûte-manteau de ~8 km le long d'une structure rectiligne orientée NE-SO située sous les massifs cristallins externes de Belledonne au Mont Blanc. L'orientation de cette structure d'échelle lithosphérique suggère un héritage Varisque éventuellement repris mais peu déformé par l'orogenèse Alpine. Dans la seconde partie de sa thèse, Y. Lu a réalisé une tomographie de bruit ambiant dite par équation d'ondes car elle utilise les principes physiques de la propagation des ondes via l'utilisation d'une modélisation dans un milieu tridimensionnel et hétérogène par éléments spectraux (Lu et al., 2020). Cette méthode évite les hypothèses simplificatrices de tomographie de bruit classique, que sont fréquence infinie et rais droits. Le nouveau modèle de vitesse d'onde S calculé par Lu et al. (2020) est différent du modèle d'entrée de Lu et al. (2018), avec notamment des contrastes de Vs renforcés dans le sous-sol des Alpes.

A. Nouibat (thèse 2019-2022) a implémenté une méthode d'inversion dite transdimensionnelle, car aucun paramètre n'est fixé a priori, pour calculer les cartes de vitesse de groupe des ondes de surface et leurs incertitudes. Il a ensuite utilisé la méthode probabiliste de Y. Lu pour calculer un nouveau modèle de vitesse d'onde S (Nouibat et al., soumis). L'utilisation de l'intégralité des données AlpArray, la prise en compte des incertitudes sur les vitesses de groupe et l'exploration dans l'inversion probabiliste pour Vs d'une banque de modèles beaucoup plus large que celle de Y. Lu sont les trois facteurs qui lui ont permis d'aboutir à un modèle 3D de Vs très bien résolu sur la région Alpine. La résolution de la partie crustale du modèle est en effet meilleure que 50 km, distance moyenne entre stations. Les détails qu'il révèle peuvent réellement être corrélatés, comparés, confrontés aux données géologiques de surface. Il devient possible de construire un modèle géologique 3D en extrapolant la carte géologique en profondeur avec le modèle sismologique pour contrainte. Ce travail est d'ailleurs en cours dans un

groupe de travail du chantier « Alpes et bassins périphériques » du programme RGF (Référentiel Géologique de la France, rgf.brgm.fr) qui réunit géologues et géophysiciens.

La figure 1 montre deux exemples de résultats de la tomographie de Nouibat et al. dans les Alpes sud-occidentales : en (a), une carte de profondeur d'un analogue du Moho, et en (b), une coupe verticale dans le modèle de vitesse d'onde S. Grâce à une inversion transdimensionnelle des cartes de vitesse de groupe de Lu et al. (2018), Zhao et al. (2020) avaient mis en évidence la subduction de la croûte européenne sous le coin mantellique (« mantle wedge » noté MW sur la fig. 1b) entre les croûtes Européenne et Adriatique. Cette subduction est bien visible dans le modèle de Nouibat et al., sous forme d'une zone de Vs plus lente plongeant dans le manteau de Vs rapide (fig. 1b). Le modèle de Nouibat et al. apporte une nouvelle vision de la structure du coin mantellique qui culmine à 10 km de profondeur sous le massif de Dora Maira (DM sur la fig. 1a). Il met en évidence un corps de vitesse rapide (Vs>4.3 km/s), probablement périclithique (donc mantellique), qui semble flotter dans le coin de subduction entre 20 et 50 km de profondeur sous la partie sud de l'anomalie gravimétrique dite du corps d'Ivrée (ligne pointillée rouge sur la fig. 1a). Ce corps est nommé ASB (pour « Adria seismic body ») car il concentre la majorité des hypocentres des séismes les plus profonds des Alpes occidentales (cercles roses sur la Fig. 1b).

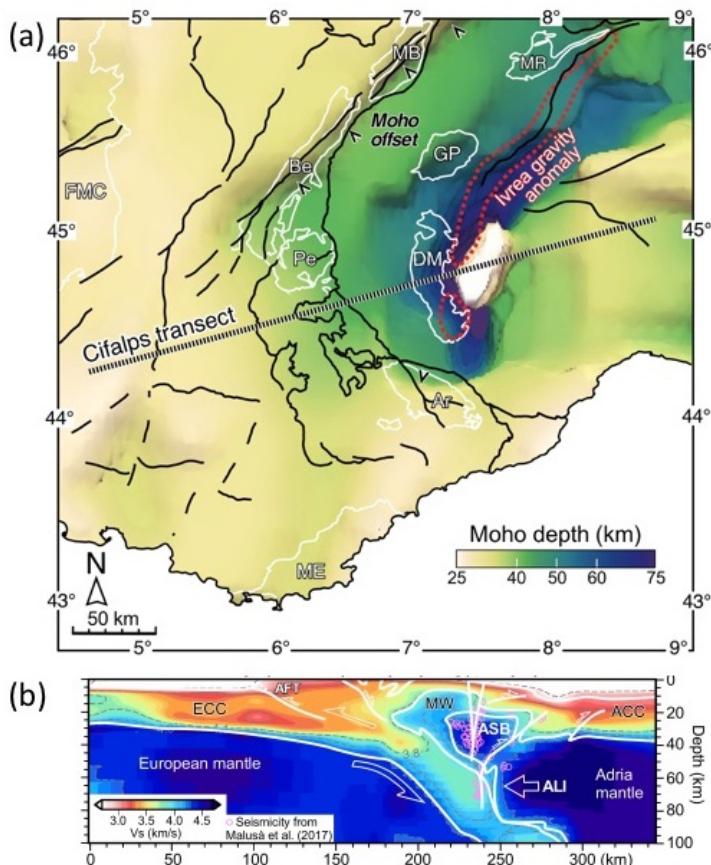


Figure 1 : Résultats de la tomographie de Nouibat et al. (soumis) pour les Alpes sud-occidentales. (a) Carte de profondeur de la surface Vs=4.3 km/s, considérée comme analogue du Moho. Les pointes de flèches noires montrent le saut de Moho de Belledonne (Be) au Mont Blanc (MB). (b) Coupe dans le modèle de vitesse d'onde S le long du profil Cifalps dont la localisation est indiquée sur la carte. Les principales discontinuités interprétées à partir du modèle Vs sont marquées par des traits blancs, notamment le Moho Européen, le Moho Adriatique, le contour du coin mantellique (MW) et celui du corps de vitesse rapide ASB (Adria seismic body). Les hypocentres des séismes de profondeur supérieure à 20 km sont indiqués par des cercles roses (d'après Malusà et al., 2017). ACC : Adriatic continental crust, ALI : Adriatic lithospheric indentor, Ar : Argentera, ASB : Adria seismic body, Be: Belledonne, DM: Dora Maira, ECC : European continental crust, GP : Gran Paradiso, MB: Mont Blanc, Pe : Pelvoux. Figure modifiée d'après Nouibat et al. (soumis).

La publication Guerin et al. (2019) par l'équipe de Geoazur porte sur le même thème puisqu'elle a utilisé la tomographie de bruit pour calculer un modèle de vitesse d'onde S des Alpes sud-occidentales et de la marge nord-Ligure en utilisant une partie des stations AlpArray-FR.

Enfin, le seul financement du projet AlpArray-FR spécifiquement dédié à du personnel recherche a été utilisé pour le postdoc de C. Harris à l'IPGS (1 an). Sa mission était d'adapter la méthode SOLA-Backus-Gilbert (Zaroli, 2016 ; Zaroli et al., 2017) au calcul des cartes de vitesse de groupe des ondes de Rayleigh

issues des corrélations de bruit. L'avantage principal de la méthode SOLA est qu'elle permet d'estimer les incertitudes sur les vitesses de groupe, comme le fait l'inversion transdimensionnelle de Nouibat et al. (soumis), mais pour un coût de calcul bien moindre, et avec peut-être de meilleures performances lorsque la couverture des données est spatialement hétérogène. C. Harris a démarré cette implémentation et l'application aux données de la banque de corrélations AlpArray, mais il a démissionné de son postdoc après seulement 6 mois du fait de la pandémie et de son souhait de rentrer aux Etats-Unis pour prendre un emploi permanent. Ce travail se poursuit actuellement à l'IPGS (devenu ITES) sous la direction de C. Zaroli. Son application pourrait être testée sur le territoire métropolitain si le projet FRLitho3D qui vient d'être soumis à l'appel à projets générique 2021 de l'ANR est sélectionné.

2- Tomographie de l'atténuation des ondes dans les Alpes (thèse D. Soergel)

D. Soergel a utilisé les données de notre banque de corrélations de bruit pour cartographier l'atténuation des ondes sismiques dans les Alpes et régions environnantes (Soergel et al., 2020). Il calcule pour cela le facteur de qualité de la coda, Q-coda, qui est une mesure de l'atténuation de la partie tardive, ou coda, des ondes de Rayleigh. Utiliser les corrélations de bruit permet des mesures à plus basse fréquence qu'avec des enregistrements de séismes. La figure 2 montre la carte de Q-coda entre 2.5 et 5s de période. Les ondes sismiques sont en général beaucoup plus atténuerées dans les bassins sédimentaires (bassin du Po, bassin Pannonien en rouge sur la fig. 2) que dans les Alpes ou les Apennins (en bleu). L'atténuation est très faible dans tout le sud-est de la France. Ce type de carte peut trouver des applications à l'évaluation du risque sismique.

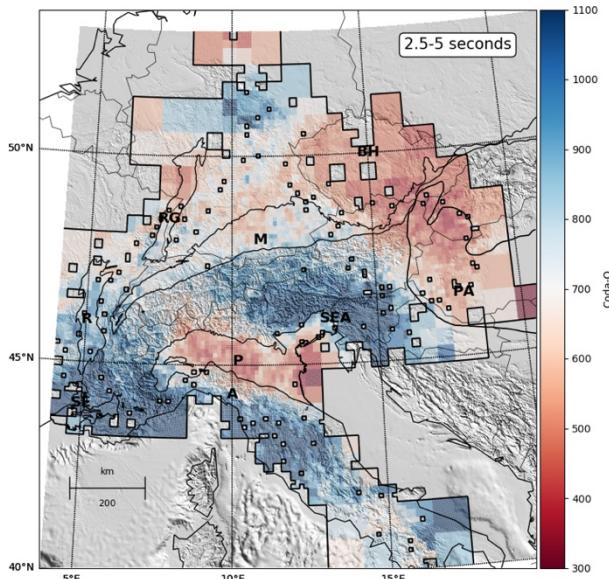


Figure 2 : Carte d'atténuation de la coda des ondes de surface (Q-coda) mesurée à partir des corrélations de bruit dans les Alpes et régions environnantes pour des périodes comprises entre 2.5 et 5s. A : Apennins, P : bassin du Po, PA : bassin Pannonien. Fig. extraite de Soergel et al. (2020).

3- Tomographie de l'anisotropie radiale et azimutale (thèses C. Alder & D. Soergel)

Dans la seconde partie de sa thèse, D. Soergel a mesuré l'anisotropie azimutale, ou variation de la vitesse des ondes S avec la direction dans le plan horizontal, dans la croûte et le manteau supérieur alpins (Soergel, 2020). L'intérêt de l'utilisation des corrélations de bruit par-rapport à d'autres approches comme l'analyse de la biréfringence des phases SKS est qu'elle permet de déterminer les variations des paramètres de l'anisotropie azimutale, amplitude et direction de vitesse rapide, avec la profondeur. Pour séparer l'influence de l'anisotropie azimutale de celle des hétérogénéités de vitesse isotrope, qui sont importantes dans la lithosphère Alpine, D. Soergel a utilisé une méthode de formation de voie (beamforming) sur des mini-réseaux de stations. Les résultats montrent que l'anisotropie est globalement forte à 15s de période (croûte moyenne), et qu'elle décroît jusqu'à 40s avant de ré-augmenter à 60s (manteau supérieur). Les anisotropies les plus fortes sont mesurées à 15s de période dans le nord-est de la France où les directions d'axe rapide sont orientées NE-SO. Dans son postdoc débuté au LGL-TPE de Lyon en janvier 2021, D. Soergel travaille à l'inversion de ses données par une

méthode Bayésienne (transdimensionnelle) pour estimer les variations des paramètres anisotropes avec la profondeur. Une publication devrait être soumise dans les semaines qui viennent.

C. Alder a analysé les vitesses des ondes de Love et de Rayleigh issues de la banque de données de corrélations de bruit et les a inversées simultanément par une méthode transdimensionnelle pour estimer l'anisotropie radiale dans la croûte européenne (Alder, 2020 ; Alder et al., 2020). L'anisotropie radiale est le rapport entre la vitesse de propagation des ondes SH polarisées horizontalement, et celle des ondes SV polarisées verticalement. Elle est un marqueur de l'orientation préférentielle des structures d'une roche, appelée aussi fabrique (foliation, fracturation, etc.).

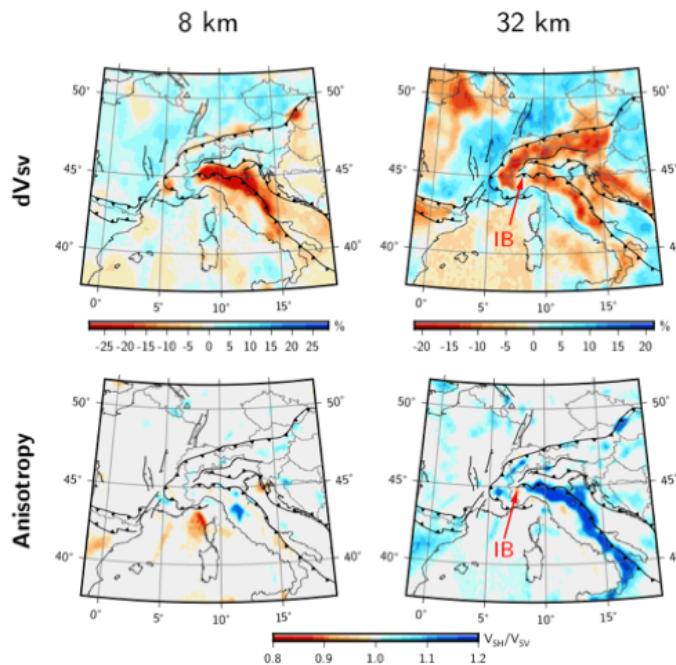


Figure 3 : Cartes de variations relatives de vitesse des ondes Sv (haut) et d'anisotropie radiale (bas) à 8 km (gauche) et 32 km (droite) de profondeur. Fig. extraite de Alder et al. (2020).

Contrairement à toutes les études grande échelle qui montrent que la croûte inférieure et le manteau supérieur peu profond présentent une anisotropie radiale sur toute l'Europe, C. Alder ne trouve de l'anisotropie que dans la croûte inférieure de la chaîne des Apennins (Italie, voir fig. 3). Cette différence est liée à l' excellente couverture des données utilisées, à leur contenu plus haute-fréquence que les enregistrements de séismes utilisés dans les études précédentes, et à l'inversion probabiliste qui permet de séparer l'anisotropie «structurale» (ou extrinsèque) liée par exemple à un litage horizontal fin (hectométrique), de l'anisotropie intrinsèque liée à la fabrique des roches. L'anisotropie radiale de la croûte inférieure des Apennins, où le rapport de vitesses V_{SH}/V_{SV} est supérieur à 1 (carte en bas à droite de la fig. 3) est attribuée à une fabrique (foliation) horizontale de la croûte inférieure résultat de la déformation ductile associée à l'importante extension récente et actuelle dans cette chaîne.

4- Autre application : étude du bruit sismique en Europe

Lu et al. (soumis) a étudié les caractéristiques spatio-temporelles du bruit microsismique en Europe en utilisant les enregistrements de plus de 1000 stations, dont celles d'AlpArray. L'objectif était d'identifier les fenêtres temporelles dans lesquelles la contribution des ondes de volume au bruit ambiant est la plus importante. Seules les ondes de volume permettent en effet d'étudier par corrélation de bruit la géométrie d'interfaces profondes comme les discontinuités du manteau. Une application à la cartographie des discontinuités qui limitent la zone de transition du manteau à 410 et 660 km sous la région alpine est en cours suite à cette étude.

Action 2.3 : nouvelles stratégies d'inversion jointe de plusieurs types de données

Ce thème n'a pas été abordé, faute de doctorants et/ou postdoctorants. Il faut cependant noter que les inversions jointes de plusieurs observables sont l'une des propositions du projet FRlitho3D qui vient d'être déposé à la seconde phase de sélection de l'AAPG2021 de l'ANR. Si le projet est sélectionné, les inversions seront réalisées sur le territoire métropolitain en utilisant notamment les données AlpArray-FR.

Action 2.4 : inversion de formes d'ondes complètes

Plusieurs demandes de financement de thèse ont été déposées par le groupe de Geoazur, sans succès jusqu'à la sélection par l'ANR du projet LiSAlps (« Probing the 3D Alpine lithosphere by Full Waveform Inversion of the AlpArray teleseismic data », coord. S. Operto) lors de l'appel à projets générique 2020. La thèse associée démarra en 2021.

Action 3 : sismicité, mouvements de terrain induits et aléas liés aux séismes dans les Alpes occidentales et leurs avant-pays

Actions 3.1 et 3.2 : traitement et analyse de la sismicité enregistrée par le réseau AlpArray-FR, en particulier dans la région Jura-Vosges-graben du Rhin supérieur (thèse A. Renouard)

Conçu pour densifier la couverture spatiale des réseaux sismologiques permanents, le réseau temporaire AlpArray-FR a contribué à une meilleure localisation des séismes de petite magnitude dans l'Est de la France. Les données du réseau ont été intégrées en temps différé au système national de surveillance sismique du BCSF-RéNass basé à Strasbourg.

La thèse d'A. Renouard (IPGS) visait à implémenter et/ou améliorer les procédures automatiques de détection et tri d'événements pour aller vers la production de catalogues de séismes de meilleure qualité sur la région couverte par AlpArray-FR, en particulier dans le nord-est de la France (Renouard, 2020). Elle a amélioré la détection automatique des séismes de faible magnitude dans le cadre du système de détection SeisComP3 utilisé par le BCSF-RéNaSS comme par de nombreux réseaux de surveillance en Europe. Par la suite, A. Renouard a utilisé une méthode d'intelligence artificielle, l'apprentissage machine supervisée, pour discriminer les séismes des tirs de carrière en identifiant les caractéristiques des signaux qui permettent de dissocier efficacement ces deux catégories d'événement (Renouard et al., soumis). La procédure de détection automatique qu'elle a développée sous SeisComP3 comme le module de discrimination des événements basé sur l'apprentissage machine supervisé seront distribués par un lien github activé lorsque la publication sera acceptée. Une analyse préliminaire du catalogue de sismicité produit sur une période test (07/16-12/16) semble mettre en évidence un degré poussé de regroupement spatio-temporel des séismes en amas, où chaque amas est identifié par des formes d'ondes fortement similaires. La finalisation du catalogue de sismicité pour toute la durée du réseau temporaire (2016-2019) et son analyse sont en cours à l'ITES (ex-IPGS).

Projets opportunistes : Séisme du Teil et essaim de La Chapelle (Savoie)

Le séisme du Teil (Ardèche) du 11/11/2019, remarquable par sa magnitude (Mw 4.9), la faible profondeur de son hypocentre (1-3 km) et les importants dégâts qu'il a produits dans plusieurs villages, a été enregistré par les stations AlpArray-FR, et notamment Z3.A192B qui était la station la plus proche puisque située à 9 km de l'épicentre (Cornou et al., 2021). Les données des stations AlpArray-FR étant accessibles aux membres des laboratoires ISTerre, Geoazur et IPGS, mais sous embargo pour les autres selon l'accord de collaboration AlpArray. Nous avons donc décidé avec l'accord du Directeur-adjoint scientifique de l'INSU, S. Guillot, de les mettre à disposition de la communauté sur demande et engagement à respecter un certain nombre de contraintes de diffusion et de citation. L'ensemble des enregistrements du choc principal par les stations AlpArray-FR encore en place (29 stations) et les enregistrements continus des 18 stations situées à moins de 200 km de l'épicentre, entre le 25/10/19 et le 31/01/20 (pour l'étude d'éventuels précurseurs et des répliques) sont téléchargeables depuis le centre de données RESIF-DC sur demande à A. Paul. Elles ont été distribuées largement dans la communauté universitaire ainsi qu'à l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) et à EDF.

Une station AlpArray-FR était située juste au-dessus de l'important essaim sismique de La Chapelle (Savoie) au nord de la vallée de la Maurienne, en 2017-2018. Les données de l'essaim sont en cours d'analyse au sein du projet Sism@lp-Swarm à ISTerre (Sism@alp-Swarm).

Action 4 : interprétations géologiques des résultats géophysiques et intégration à un modèle géodynamique 4D

Ce volet du projet a démarré en 2019 avec l'interprétation des résultats d'imagerie issus de la thèse de Yang Lu, essentiellement au sein d'ISTerre et du groupe franco-italo-chinois du projet international CIFALPS qui avait précédé AlpArray-FR (Zhao et al., 2020 ; Malusà et al., 2021). Les résultats les plus marquants de cette tomographie ont été mentionnés précédemment (Action 2.2).

La valorisation géologique des tomographies issues d'AlpArray-FR a pris un important élan en 2019-2020 avec la sélection du chantier « Alpes et bassins périphériques » par le programme RGF (Référentiel Géologique de la France). Ces travaux sont détaillés ci-après (C.4).

C.4 EXPLOITATION DES RESULTATS

Le plus important livrable du projet AlpArray-FR est la base de données sismologiques du réseau temporaire terre-mer Z3 de 276 stations qui complètent les stations permanentes pour fournir une couverture homogène de toute la région alpine et ses avant-pays (Hetényi et al., 2018). Ces données seront ouvertes à tous à partir du 01/04/2022. Elles sont actuellement analysées et exploitées par un grand nombre de doctorants, postdoctorants, chercheurs des laboratoires européens participants. Les caractéristiques de l'ensemble de données (qualité, densité spatiale, homogénéité de la couverture), l'intérêt du chantier alpin et la levée de l'embargo en 2022 induiront certainement d'autres projets d'utilisation par des laboratoires du monde entier dans les années qui viennent.

En France, le projet AlpArray-FR a indubitablement eu un important effet catalyseur sur le chantier alpin, qu'il a remis en lumière. Il a fortement contribué à la sélection du chantier « Alpes et bassins périphériques » par le programme RGF. Trois thèses en cours sur des projets d'imagerie ou d'étude de la sismicité sont financées ou co-financées par le chantier RGF : A. Canva (Geoazur, imagerie sismique de la marge nord-Ligure), A. Nouibat (ISTerre, imagerie de la lithosphère alpine par corrélation de bruit et inversion de formes d'ondes complètes de séismes régionaux), E. Hannouz (ISTerre, relations structurales et cinématiques actuelles entre l'arc externe des Alpes Occidentales et la vallée du Rhône). M. Sonnet (ISTeP) prépare sa thèse cofinancée par Sorbonne-Université et l'INSU sur la signature géophysique de la subduction alpine en combinant mesures de terrain et modélisations pour fournir une interprétation pétrophysique des résultats de tomographie (coll. A. Nouibat). Enfin, l'IDEX UCA-JEDI et l'INSU ont financé le profil de sismique active SEFASILS au travers de la marge Ligure (Dessa et al., 2020, et thèse A. Canva).

Au démarrage de la thèse d'A. Nouibat, A. Paul, S. Guillot et P. Calcagno (BRGM) ont initié un groupe de travail alliant géophysiciens et géologues de plusieurs universités françaises et du BRGM pour construire un modèle géologique (ou géomodèle) 3D d'échelle crustale sur l'emprise [41.5°N-48°N ; 4°E-10°E] incluant Alpes occidentales, vallée du Rhône et mer Ligure. Il s'agit de s'appuyer sur la carte géologique au million, les données géophysiques existantes le long de profils (sismique réflexion profonde ECORS-CROP, sismologie passive Cifalps et Cifalps-2), le modèle 3D de vitesse d'onde S (et ultérieurement d'onde P) d'A. Nouibat, et les connaissances des géologues pour construire un ou plusieurs modèles géologiques 3D de la partie la plus tridimensionnelle de l'arc alpin. Ce géomodèle pourra fournir les conditions aux limites de modèles à plus petite échelle pour d'autres projets de RGF-Alpes, et il pourra être confronté à d'autres données géophysiques comme l'anomalie gravimétrique (Bouguer et/ou à l'air libre). A plus long terme, le modèle pourra être intégré à une modélisation thermomécanique 3D des Alpes. Des contacts dans ce sens sont pris avec les équipes du projet 4D-MB, composante allemande d'AlpArray financée par la DFG, et avec les Autrichiens (Université de Vienne) et leurs services géologiques nationaux.

Enfin, et comme évoqué précédemment, les projets ANR LisAlps (AAPG2020) et FRLitho3D s'il est financé (AAPG2021, en cours d'évaluation) poursuivront la valorisation des données AlpArray. Une

inversion de formes d'ondes complète sera faite dans le projet LiSAlps, d'une part à l'échelle de toutes les Alpes, et d'autre part avec focalisation sur la mer Ligure. FRLitho3D propose de mettre en œuvre une série de méthodes d'imagerie pour construire un modèle 3D de référence pour la lithosphère du territoire métropolitain.

C.5 DISCUSSION

L'objectif principal du projet AlpArray-FR était de contribuer à l'initiative européenne AlpArray en installant les stations sismologiques temporaires situées dans l'est de la France pendant au minimum 2 ans dans la période 2015-2019, et en distribuant les données en temps quasi-réel aux laboratoires participants. A part un an de postdoc à l'IPGS, le budget accordé au projet par l'ANR a pour l'essentiel financé la mise en place et le fonctionnement du réseau y compris les salaires de personnels techniques en CDD. Le projet n'aurait pu être réalisé sans les infrastructures nationales EPOS-RESIF (Réseau sismologique et géodésique français) - parc national d'instruments sismologiques mobiles Résif-SisMob, réseau national large-bande permanent Résif-RLBP et centre de données sismologiques Résif-DC –, les instruments sismologiques fond de mer du parc INSU-IPGP, et enfin l'accès au navire océanographique « Pourquoi-Pas ? » de la Flotte océanographique française. Malgré quelques retards de livraison d'équipements neufs du parc SisMob et ceux de l'installation des nouvelles stations de Resif-RLBP, nous avons pleinement atteint cet objectif d'acquisition de données. AlpArray-FR a même donné un coup d'accélérateur à l'installation de 17 stations du RLBP dans l'Est de la France. Les publications qui en sont issues valorisent les infrastructures de recherche.

Le financement sur d'autres sources de 5 thèses à Grenoble, Lyon et Strasbourg a permis de réaliser une partie des objectifs scientifiques décrits dans le projet. Quatre de ces thèses portent sur l'utilisation de nouvelles méthodes de tomographie par corrélation de bruit, qui ont apporté des résultats importants. Certaines des publications parues sur ce thème font déjà date comme le montre le classement de Lu et al. (2018) dans la collection des papiers récents les plus cités de la revue Geophysical Journal International ([lien sur https://academic.oup.com/gji/](https://academic.oup.com/gji/)). La sélection par l'ANR du projet LiSAlps (AAPG2020) et peut-être celle du projet FRLitho3D (AAPG2021) permettront le financement de nouvelles thèses et nouveaux postdocs qui poursuivront la valorisation des données. Au démarrage d'AlpArray-FR, il était difficile d'imaginer que sans thèse financée par le projet, nous atteindrions un tel niveau de valorisation en fin de projet, alors que de surcroit, le réseau a fonctionné en intégralité jusqu'à mi-2019.

Le plus difficile était certainement d'amorcer l'interprétation géologique des tomographies dans la durée du projet, puisqu'il fallait attendre que les images soient disponibles. Nous avons également réussi à démarrer ces interprétations dans un cadre plus large que celui qui était prévu initialement grâce au chantier RGF-Alpes et bassins périphériques et son groupe de travail sur le géomodèle crustal 3D.

Au niveau européen, AlpArray a créé un important réseau de collaboration entre sismologues, géologues et géodynamiciens des 17 pays impliqués. AlpArray a aussi montré qu'il était possible de construire une grande expérience européenne basée uniquement sur des financements nationaux et l'utilisation de parcs nationaux d'instruments. Une réflexion a été lancée dès 2018 sur la possibilité de bâtir de nouveaux projets sur cette dynamique. Elle a abouti à l'initiative AdriaArray qui vise à étudier la structure et la dynamique de la plaque Adriatique et des chaînes environnantes, notamment en installant un réseau sismologique temporaire en complément des réseaux permanents du Massif Central à la Mer Noire et de la Pologne à la Crète. Ce projet est soutenu par l'infrastructure européenne EPOS (« European Plate Observing System ») et une demande de financement européen COST (European Cooperation in Science and Technology) a été soumise à l'automne 2020. Quatre chercheurs de laboratoires français participent à la proposition COST : S. Chevrot (GET Toulouse), M. Métois (LGL-TPE Lyon), A. Paul (ISTerre Grenoble), et C. Rosenberg (IStEP Paris).

C.6 CONCLUSIONS

Le projet ANR AlpArray-FR a atteint son objectif principal, l'acquisition et la distribution d'un ensemble de données sismologiques de qualité par un réseau temporaire terre-mer complétant les réseaux permanents pour atteindre une couverture homogène de tout l'arc alpin et ses avant-pays avec une station tous les 50 km environ. La valorisation scientifique des données a démarré rapidement grâce à 4 thèses soutenues en 2019 et 2020 (ISTerre, IPGS, LGL-TPE), financées en dehors du projet. Une thèse est en cours (2019-2022, ISTerre) et une autre débutera en 2021 (Geoazur). Grâce à ce démarrage rapide et à la qualité des étudiants et de leurs résultats, l'équipe française est, avec l'Université de Vienne (Autriche), celle qui a le mieux valorisé les données du réseau AlpArray à ce jour. Le projet a donné une nouvelle dynamique aux recherches sur les Alpes dans la communauté des Sciences de la Terre, et a aidé à la sélection d'autres projets comme le chantier RGF-Alpes et bassins périphériques. C'est dans ce cadre et grâce au financement d'autres thèses qu'a démarré la valorisation géologique des résultats d'AlpArray-FR. Enfin, la dynamique initiée par AlpArray au niveau Européen et la démonstration faite de la possibilité de mener ce type de projet à terme uniquement sur financements nationaux va probablement aboutir au démarrage d'un autre projet, AdriaArray, dont le réseau sismologique couvrira une grande partie de l'Europe.

C.7 REFERENCES

- Alder, C., 2020. Etude de la déformation de la croûte et du manteau terrestres à partir de l'anisotropie sismique des modèles tomographiques, Thèse de Doctorat Université de Lyon, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02965440>
- Alder, C., et al. 2021. Evidence for radial anisotropy in the lower crust of the Apennines from Bayesian ambient noise tomography in Europe, *Geophysical Journal International*, ggab066, [doi:10.1093/gji/ggab066](https://doi.org/10.1093/gji/ggab066)
- Dessa, J.-X., et al., 2020. Seismic Exploration of the Deep Structure and Seismogenic Faults in the Ligurian Sea by Joint Multi Channel and Ocean Bottom Seismic Acquisitions: Preliminary Results of the SEFASILS Cruise, *Geosciences* 2020, 10, 108, [doi:10.3390/geosciences10030108](https://doi.org/10.3390/geosciences10030108)
- Guerin, G., et al. 2020. High resolution ambient noise tomography of the Southwestern Alps and the Ligurian margin, *Geophysical Journal International*, 220, 806-820, [doi: 10.1093/gji/ggz477](https://doi.org/10.1093/gji/ggz477)
- Hetényi, G., et al. 2018. The AlpArray Seismic Network – a large-scale European experiment to image the Alpine orogeny, *Surveys in Geophysics*, 39, 1009–1033, [doi: 10.1007/s10712-018-9472-4](https://doi.org/10.1007/s10712-018-9472-4).
- Lu, Y., et al. 2018. High-resolution surface wave tomography of the European crust and uppermost mantle from ambient seismic noise, *Geophysical Journal International*, 214, 1136-1150, [doi:10.1093/gji/ggy188](https://doi.org/10.1093/gji/ggy188)
- Lu, Y., 2019. Tomography of the alpine arc using noise correlations & waveform modelling, Thèse de Doctorat Université Grenoble Alpes, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02135198>
- Lu, Y., et al. 2020. Imaging Alpine crust using ambient noise wave-equation tomography, *Geophysical Journal International*, 222, 69-85, [doi: 10.1093/gji/ggaa145](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa145)
- Lu, Y., et al., Mapping the seismic noise field in Europe: spatio- temporal variations in wavefield composition and noise source contributions, submitted to *Geophysical Journal International*.
- Malusà M. G., et al. 2017. Earthquakes in the Alpine mantle wedge, *Gondwana Research*, 44, 89-95, [doi: 10.1016/j.gr.2016.11.012](https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.11.012).
- Malusà, M. G., et al. 2021. The deep structure of the Alps based on the CIFALPS seismic experiment: a synthesis, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22, e2020GC009466, [doi: 10.1029/2020GC009466](https://doi.org/10.1029/2020GC009466)
- Nouibat, A., et al., Lithospheric transdimensional ambient-noise tomography of W-Europe: implications for crustal-scale geometry of the W-Alps, submitted to *Geophysical Journal International*.
- Paul, A., What we (possibly) know about the 3D structure of crust and mantle beneath the Alpine chain, in: *The European Alps* (eds. N. Bellahsen, C. Rosenberg), coll. Sciences, ISTE-Wiley Editions, in press.
- Renouard, A., 2020. Thèse de Doctorat Université de Strasbourg.

- Renouard A., et al., Towards false event detection and quarry blast vs earthquake discrimination in an operational setting, submitted to *Seismological Research Letters*.
- Sadeghi-Bagherabadi, A. et al. 2021. High-resolution crustal S-wave velocity model and Moho geometry beneath the Southeastern Alps : new insights from the SWATH-D experiment, *Frontiers in Earth Science*, 9:641113, [doi: 10.3389/feart.2021.641113](https://doi.org/10.3389/feart.2021.641113)
- Soergel, D., 2020. Extension des méthodes d'imagerie par corrélation de bruit sismique : atténuation et anisotropie sous AlpArray, Thèse de Doctorat Université Grenoble Alpes, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03185939>
- Soergel, D., et al. 2020. Coda-Q in the 2.5 s - 20 s period band from seismic noise - Application to the greater Alpine area, *Geophysical Journal International*, 220, 202-217, [doi:10.1093/gji/ggz443](https://doi.org/10.1093/gji/ggz443)
- Stehly, L., et al. 2009. Tomography of the Alpine region from observations of seismic ambient noise, *Geophysical Journal International*, 178, 338-350, [doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04132.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04132.x)
- Zahorec, P., et al. 2021. The first pan-Alpine surface-gravity database, a modern compilation that crosses frontiers, *Earth System Science Data*, in press, [doi: 10.5194/essd-2020-375](https://doi.org/10.5194/essd-2020-375)
- Zaroli, C., 2016. Global seismic tomography using Backus–Gilbert inversion, *Geophysical Journal International*, 207, 876-888, [doi: 10.1093/gji/ggw315](https://doi.org/10.1093/gji/ggw315)
- Zaroli, C., et al. 2017. Toward Seeing the Earth's Interior Through Unbiased Tomographic Lenses, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 11,399–11,408, [doi: 10.1002/2017GL074996](https://doi.org/10.1002/2017GL074996)
- Zhao, L., et al. 2015. First seismic evidence for continental subduction beneath the Western Alps, *Geology*, 43, 9, 815-818, [doi:10.1130/G36833.1](https://doi.org/10.1130/G36833.1).
- Zhao, L., et al. 2020. Evidence for a serpentized plate interface favouring continental subduction, *Nature Communications*, 11, 2171, [doi: 10.1038/s41467-020-15904-7](https://doi.org/10.1038/s41467-020-15904-7)

D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
07/2017	1	Réseau sismologique à terre : installation, construction de la base de données	Données	ISTerre, Geoazur IPGS,	07/2017 : fin de l'installation du réseau. Données distribuées en temps quasi-réel de l'installation de la 1 ^{ère} station (11/15) au démontage de la dernière (02/21)
01/2019	2	Réseau sismologique fond de mer : installation, démontage, construction de la base de données	Données	ISTerre, Geoazur IPGS,	
12/20	3	Observables géophysiques : corrélations de bruit sismique	Données analysées	ISTerre	Base de données mise à jour par étapes au fur et à mesure du projet
2021	4	Traitement automatique de la sismicité : module de détection automatique + module de	Modules logiciels	IPGS	Livrable non prévu initialement

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
		discrimination des événements			

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revues à comité de lecture	11	2
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	1	
	Communications (conférence)	25	5
France	Revues à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	1	3
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		2
	Autres	4	

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	2 : AFCANE (2022-2023, échange de jeunes chercheurs France-Autriche) ; AdriaArray (>2022)
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

International : Revues à comité de lecture – Publications multipartenaires

- Alder, C., E. Debayle, T. Bodin, A. Paul, L., Stehly, H. Pedersen and AlpArray Working Group, 2021. Evidence for radial anisotropy in the lower crust of the Apennines from Bayesian ambient noise tomography in Europe, *Geophysical Journal International*, ggab066, [doi:10.1093/gji/ggab066](https://doi.org/10.1093/gji/ggab066)
- Cornou, C., et al., 2021. Rapid response to the Mw 4.9 earthquake of November 11, 2019 in Le Teil, Lower Rhône Valley, France, *Comptes Rendus Geoscience*, in press (preprint doi: [10.31219/osf.io/3afs5/](https://doi.org/10.31219/osf.io/3afs5/)).
- Guerin, G., D. Rivet, A. Deschamps, C. Larroque, A. Mordret, J-X. Dessa, and X. Martin, 2020. High resolution ambient noise tomography of the Southwestern Alps and the Ligurian margin, *Geophysical Journal International*, 220, 806-820, [doi: 10.1093/gji/ggz477](https://doi.org/10.1093/gji/ggz477)
- Hetényi, G., and co-authors (incl. A. Paul, C. Doubre, J-X. Dessa), 2018. The AlpArray Seismic Network – a large-scale European experiment to image the Alpine orogeny, *Surveys in Geophysics*, 39, 1009–1033, [doi: 10.1007/s10712-018-9472-4](https://doi.org/10.1007/s10712-018-9472-4).
- Lu, Y., L. Stehly, A. Paul, and AlpArray Working Group, 2018. High-resolution surface wave tomography of the European crust and uppermost mantle from ambient seismic noise, *Geophysical Journal International*, 214, 1136-1150, [doi:10.1093/gji/ggy188](https://doi.org/10.1093/gji/ggy188)
- Lu, Y., L. Stehly, R. Brossier, A. Paul, and AlpArray working group, 2020. Imaging Alpine crust using ambient noise wave-equation tomography, *Geophysical Journal International*, 222, 69-85, [doi: 10.1093/gji/ggaa145](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa145)
- Malusà, M. G., S. Guillot, L. Zhao, A. Paul, S. Solarino, T. Dumont, S. Schwartz, C. Aubert, P. Baccheschi, E. Eva, Y. Lu, C. Lyu, S. Pondrelli, S. Salimbeni, W. Sun and H. Yuan, 2021. The deep structure of the Alps based on the CIFALPS seismic experiment: a synthesis, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22, e2020GC009466, [doi: 10.1029/2020GC009466](https://doi.org/10.1029/2020GC009466)
- Schippkus, S., D. Zigone, G. Bokelmann and AlpArray Working Group, 2018. Ambient-noise tomography of the wider Vienna Basin region, *Geophysical Journal International*, 215, 102-117, [doi:10.1093/gji/ggy259](https://doi.org/10.1093/gji/ggy259)
- Schippkus, S., D. Zigone, G. Bokelmann and AlpArray Working Group, 2020. Azimuthal anisotropy in the wider Vienna basin region: a proxy for the present-day stress field and deformation, *Geophysical Journal International*, 220, 2056-2067, [doi: 10.1093/gji/ggz565](https://doi.org/10.1093/gji/ggz565)
- Soergel, D., H. A. Pedersen, L. Stehly, L. Margerin, A. Paul and AlpArray Working Group, 2020. Coda-Q in the 2.5 s - 20 s period band from seismic noise - Application to the greater Alpine area, *Geophysical Journal International*, 220, 202-217, [doi:10.1093/gji/ggz443](https://doi.org/10.1093/gji/ggz443)
- Zhao, L., M.G. Malusà, H. Yuan, A. Paul, S. Guillot, Y. Lu, S. Solarino, E. Eva, G. Lu, T. Bodin, Cifalps Group, AlpArray Working Group, 2020. Evidence for a serpentized plate interface favouring continental subduction, *Nature Communications*, 11, 2171, [doi: 10.1038/s41467-020-15904-7](https://doi.org/10.1038/s41467-020-15904-7)

International: Revues à comité de lecture – Publications multipartenaires – Publications soumises ou en révision

- Lu, Y., H. Pedersen, K. Stehly and AlpArray Working Group, Mapping the seismic noise field in Europe: spatio- temporal variations in wavefield composition and noise source contributions, submitted to *Geophysical Journal International*.
- Nouibat, A., L. Stehly, A. Paul, S. Schwartz, T. Bodin, T. Dumont, Y. Rolland, R. Brossier, Cifalps Team, and AlpArray Working Group, Lithospheric transdimensional ambient-noise tomography of W-Europe: implications for crustal-scale geometry of the W-Alps, submitted to *Geophysical Journal International*.
- Thorwart, M., A. Dannowski, I. Grevemeyer, D. Lange, H. Kopp, F. Petersen, W. Crawford, A. Paul, and the AlpArray Working Group, Basin inversion: Reactivated rift structures in the Ligurian Sea revealed by OBS, submitted to *Solid Earth* [preprint: [doi: 10.5194/se-2021-9](https://doi.org/10.5194/se-2021-9)].
- Wolf, F.N., D. Lange, A. Dannowski, M. Thorwart, W. Crawford, L. Wiesenbergs, I. Grevemeyer, H. Kopp, and the AlpArray Working Group, 3D crustal structure of the Ligurian Sea revealed by ambient noise tomography using ocean bottom seismometer data, submitted to *Solid Earth*.

International: Revues à comité de lecture – Publications monopartenaires

Qorbani, E., D. Zigone, M.R. Handy, G. Bokelmann, and AlpArray-EASI working group, 2020. Crustal structures beneath the Eastern and Southern Alps from ambient noise tomography, *Solid Earth*, 11, 1947-1968, [doi: 10.5194/se-11-1947-2020](https://doi.org/10.5194/se-11-1947-2020)

Lavoué, F., O. Coutant, P. Boué, L. Pinzon-Rincon, F. Brenguier, R. Brossier, P. Dales, M. Rezaeifar, and C.J. Bean, 2020. Understanding Seismic Waves Generated by Train Traffic via Modeling: Implications for Seismic Imaging and Monitoring, *Seismological Research Letters* 92, 287–300, [doi: 10.1785/0220200133](https://doi.org/10.1785/0220200133).

International: Revues à comité de lecture – Publications monopartenaires – Publications soumises ou en révision

Renouard A., Maggi A., Grunberg M., Doubre C., Towards false event detection and quarry blast vs earthquake discrimination in an operational setting, submitted to *Seismological Research Letters*.

International: Ouvrages ou chapitres d'ouvrages - Monopartenaire

Paul, A., What we (possibly) know about the 3D structure of crust and mantle beneath the Alpine chain, in: *The European Alps* (eds. N. Bellahsen, C. Rosenberg), coll. Sciences, ISTE-Wiley Editions, in press.

International: Communications (conférences) - Multipartenaire

Alder, C., E. Debayle, T. Bodin, A. Paul, L. Stehly, Y. Lu, H. Pedersen, F. Dubuffet, the AlpArray Working Group, Anisotropic Tomography of Europe Using Ambient Noise AlpArray Data, AGU Fall Meeting, 10-14.12.2018, Washington D.C., USA.

Alder, C., T. Bodin, E. Debayle, A. Paul, L. Stehly, H. Pedersen, and the AlpArray Working Group, 3D radially anisotropic model of Europe from ambient noise tomography, AlpArray & SPP 4D-MB Scientific Meeting 2019, 13-15.11.2019, Frankfurt am Main, Germany.

Dannowski, A., Wolf, F. N., Kopp, H., Grevemeyer, I., Lange, D., Thorwart, M., Crawford, W., Caielli, G., de Franco, R., Paul, A., Petersen, F. and Schramm, B. and MSM71 cruise participants, AlpArray Working Group. Investigations of the Ligurian Basin using refraction seismic data and the ambient noise technique, EGU General Assembly 2019, 08.-13.04.2019, Vienna, Austria.

Lu, Y., L. Stehly, A. Paul, and AlpArray Working Group, Surface wave tomography of Europe from ambient seismic noise, EGU General Assembly 2017, 23-28.04.2017, Vienna, Austria.

Lu, Y., A. Paul, L. Stehly, and AlpArray Working Group, Along strike changes in the crustal structure of the Alps documented by a new ambient-noise tomography, EGU General Assembly 2018, 8.-13.04.2018, Vienna, Austria.

Lu, Y., L. Stehly, A. Paul, and AlpArray Working Group, A new high-resolution and probabilistic shear-wave velocity model of the European crust and uppermost mantle derived from ambient noise tomography, EGU General Assembly 2018, 8.-13.04.2018, Vienna, Austria.

Lu, Y., L. Stehly, A. Paul, R. Brossier, and AlpArray Working Group, Tomography of the Alpine arc using ambient seismic noise correlation and waveform modelling, First AlpArray Science Meeting, 29-30.08.2018, Zürich, Switzerland.

Lu, Y., L. Stehly, R. Brossier, A. Paul, L. Métivier, and AlpArray Working Group, Ambient Noise Wave-Equation Tomography of the Alpine Crust and Uppermost Mantle, AGU Fall Meeting, 10-14.12.2018, Washington D.C., USA.

Lu, Y., H. Pedersen, L. Stehly, A. Paul, and AlpArray Working Group, Seismic noise in Europe and impact on data quality and imaging, AlpArray & SPP 4D-MB Scientific Meeting 2019, 13-15.11.2019, Frankfurt am Main, Germany.

Nouibat, A., L. Stehly, A. Paul, S. Schwartz, R. Brossier and AlpArray Working Group. First step towards an integrated geophysical-geological model of the W-Alps, AlpArray/4DMB Scientific Meeting, online, 11-13 Nov. 2020.

Nouibat, A., Stehly, L., Paul, A., Brossier, R., Bodin, T., Schwartz, S., and AlpArray Working Group. First step towards an integrated geophysical-geological model of the W-Alps: A new Vs model from

- transdimensional ambient-noise tomography, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-3197, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3197>, 2021.
- Paul, A., The CIFALPS and AlpArray seismic experiments in the Alps: new data, new images, new models, new questions, International Workshop on Tethys Dynamics, IGG-CAS, Beijing, 8-9 Oct. 2018 (conf. invitée).
- Paul A., Y. Lu, L. Stehly, L. Zhao, Cifalps team and AlpArray Working Group. When new seismic datasets and imaging techniques allow a leap forward in understanding the structure of the Alpine crust, EPOS Seismology Workshop 2019, Grenoble, 7-10 Oct. 2019 (conf. invitée).
- Paul, A., Y. Lu, L. Stehly, S. Guillot, M. Malusà, R. Brossier, L., Zhao, H. Yuan, the CIFALPS Team and the AlpArray Working Group, New information on the structure of the deep crust in the Greater Alps from ambient noise wave equation tomography, AlpArray & SPP 4D-MB Scientific Meeting 2019, 13-15.11.2019, Frankfurt am Main, Germany.
- Paul, A., A. Nouibat, Cifalps Team and AlpArray Working Group, The lithospheric structure of the Western Alps is far from cylindrical: new seismic evidences from Cifalps and AlpArray experiments, AlpArray/4DMB Scientific Meeting, online, 11-13 Nov. 2020.
- Paul, A., Nouibat, A., Zhao, L., Solarino, S., Schwartz, S., Malusà, M., Stehly, L., Aubert, C., Dumont, T., Eva, E., Guillot, S., Pondrelli, S., Salimbeni, S., and AlpArray Working Group. Striking differences in lithospheric structure between the north- and south-western Alps: insights from receiver functions along the Cifalps profiles and a new Vs model, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-9391, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9391>, 2021.
- Schwartz, S., Nouibat, A., Rolland, Y., Dumont, T., Paul, A., Guillot, S., Malusà, M., Stehly, L., Group, C., and Working Group, A.: Role of the deep crustal scale geometry on Western Alps strain partitioning : Insights from S-wave velocity tomography, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-8928, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8928>, 2021.
- Soergel, D., Pedersen, H., Bodin, T., Paul, A., and Stehly, L.: Imaging azimuthal anisotropy in the alpine crust from ambient noise beamforming, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13514, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13514>, 2021.
- Thorwart, M., A. Dannowski, D. Lange, W. Rabbel, H. Kopp, A. Paul, F.N. Wolf, and AlpArray Working Group, Seismicity in the Ligurian Sea: Indications for reverse faulting, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 9-13 Dec. 2019.
- Thorwart, M., Dannowski, A., Grevemeyer, I., Lange, D., Kopp, H., Petersen, F., Crawford, W., and Paul, A. and the AlpArray Working Group: Local Seismicity indicates basin inversion in the Ligurian Sea, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-6411, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6411>, 2021.
- Wolf, F.N., D. Lange, H. Kopp, A. Dannowski, W.C. Crawford, L. Wiesenber, M. Thorwart, N. Froitzheim, I. Grevemeyer, A. Paul, and the AlpArray Working Group, Velocity structure of the Ligurian Sea (Mediterranean Sea) revealed by ambient noise tomography using ocean bottom seismometer data, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 9-13 Dec. 2019.
- Wolf, F. N., Lange, D., Kopp, H., Dannowski, A., Grevemeyer, I., Crawford, W., Froitzheim, N., Thorwart, M., and Paul, A. and the AlpArray Working Group: Crust and upper mantle structure of the Ligurian Sea revealed by ambient noise tomography using ocean bottom seismometer data, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-5374, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5374>, 2020.
- Wolf, F.N., D. Lange, A. Dannowski, M. Thorwart, W. Crawford, A. Paul, I. Grevemeyer, H. Kopp, and the AlpArray Working Group, Results of the ambient noise study in the Ligurian Sea, AlpArray/4DMB Scientific Meeting, online, 11-13 Nov. 2020.
- Wolf, F.N., D. Lange, H. Kopp, A. Dannowski, I. Grevemeyer, M. Thorwart, W.C. Crawford, A. Paul, and the AlpArray Working Group, Ambient noise analysis in the Ligurian Sea, a Mediterranean back-arc basin, AGU Fall Meeting, Online, 1-17 Dec. 2020.

Kopp, H., Crawford, W., Paul, A., Lange, D., Dannowski, A., Wolf, F., Caielli, G., Thorwart, M., de Franco, R., AlpArray offshore: Preliminary results of the Ligurian Sea OBS network and refraction lines, EGU General Assembly 2018, 8.-13.04.2018, Vienna, Austria.

International: Communications (conférences) - Monopartenaire

Renouard A., M. Grunberg, C. Doubre et al., Building a precise seismic catalog in the intraplate northwestern European region from the AlpArray experiment, EGU General Assembly 2018, 8-13.04.2018, Vienna, Austria.

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi, AlpArray seismic stations' contribution to the renewal of the Northeastern French seismic catalog, First AlpArray Science Meeting, 29-30.08.2018, Zürich, Switzerland.

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi, Toward a better characterization of small to moderate earthquakes seismological pattern in Northeastern France, 6th International Colloquium on Historical earthquakes & paleoseismology studies, 24-25 Oct. 2018, Hahn-sur-Lesse, Belgium.

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi, Automatic detection and machine learning-based discrimination of earthquakes in northwestern intraplate Europe using SeisComP3 and AlpArray network, EGU General Assembly 2019, 08-13.04.2019, Vienna, Austria.

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi Contribution of machine learning to earthquake detection in high anthropogenic context, AGU Fall Meeting, 9-13.12.2019, San Francisco, E.-U.

France: Communications (conférences) – Multipartenaire

Stehly, L., Tomographie de la lithosphère alpine : apport des données AlpArray & CIFALPS, Rencontres scientifiques et techniques RESIF, 12-14 Nov. 2019, Biarritz, France.

France: Communications (conférences) – Monopartenaire

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi, Automatic detection and machine learning-based discrimination of earthquakes in northwestern intraplate Europe using SeisComP3 and AlpArray network, Colloque AFPS (Association Française de génie parasismique), 27-30 Sep. 2019, Strasbourg, France.

Renouard, A., M. Grunberg, C. Doubre, A. Maggi, Apport de l'intelligence artificielle pour la détection automatique des séismes en contexte anthropisé, Rencontres scientifiques et techniques RESIF, 12-14 Nov. 2019, Biarritz, France.

Nouibat, A., R. Brossier, L. Stehly, A. Paul, P. Calcagno, Vers un modèle intégré des données géophysiques et géologiques des Alpes occidentales : tomographie sismique de la lithosphère alpine par corrélation de bruit ambiant, 27è Réunion des Sciences de la Terre, 1-5 Nov. 2021, Lyon, France.

Actions de diffusion – Conférences vulgarisation – Monopartenaire

Paul, A., Quand les sismologues radiographient la collision des continents sous les Alpes, Science Sandwich du CREA Mont-Blanc, Chamonix, 19 juin 2018. <http://blog.creamontblanc.org/?p=1261>.

Paul, A., La structure lithosphérique de la chaîne alpine : nouvelles données géophysiques, nouvelles images, nouvelles questions, Conférence Université Inter-Ages du Dauphiné, Grenoble, 10 mars 2021.

Actions de diffusion – Autres – Multipartenaire

Aubert, C., & A. Paul, Première lettre d'information AlpArray-FR (destinée aux communes et particuliers qui ont hébergé des instruments), 7 p., Février 2018.

Paul, A. & C. Aubert, Seconde lettre d'information AlpArray-FR (destinée aux communes et particuliers qui ont hébergé des instruments), 18 p., Octobre 2020.

Paul, A., C. Aubert et groupe technique AlpArray-FR, AlpArray: trois ans de mesures sismologiques pour comprendre les Alpes, Lettre d'information RESIF n° 18 (<https://www.resif.fr>), décembre 2020.

Paul A., C. Alder, Y. Lu, A. Nouibat, D. Soergel, et le groupe scientifique « tomographie AlpArray-FR », Nouvelle vision de la structure lithosphérique des Alpes par tomographie de bruit ambiant, Lettre d'information RESIF n° 19 (<https://www.resif.fr>), mai 2021.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Logiciels et autres prototypes :

- Module de discrimination des événements SeisComP3 écrit en Python2 intégrable dans la procédure de détection standard SeisComP3 (auteurs : Renouard et al.)
- Module de sélection de l'origine préférentielle des événements SeisComP3 écrit en Python2 intégrable dans la procédure de détection standard SeisComP3 (auteurs : Renouard et al.)
- Procédure de détection développée sous SeisComP3 encapsulée dans une image Singularity déployable sur super-ordinateurs (auteurs : Renouard et al.).

Développement d'un nouveau partenariat

- Projet d'échange de jeunes chercheurs entre la France (ISTerre, LGL-TPE) et l'Autriche (Université de Vienne) : AFCANE (Austria-France collaboration about seismic ambient noise in Europe and subsurface properties) ; dossier déposé en France (programme PHC Amadeus 2022) et en Autriche.
- Action COST (European cooperation in science & technology) AdriaArray soumise en Nov. 2020 ; ISTerre (A. Paul), le LGL-TPE (M. Métois), le GET (S. Chevrot) et l'ISTeP (C. Rosenberg) en sont participants secondaires. Objectif : structurer la communauté des Sciences de la Terre en Europe autour d'un projet d'acquisition et d'analyse de données multidisciplinaires pour comprendre et modéliser les moteurs de l'activité tectonique autour de la plaque Adriatique et les aléas associés.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTÉS EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Weyland Gauthier	H	gweyland@unistra.fr		Master	Fr		IPGS	Assistant-ingénieur en déploiement et maintenance du réseau sismologique	6	04/01/2017					
Harris Cooper	H	charris@unistra.fr		Doctorat	Hors UE		IPGS	Post-doctorant	9	26/06/2020					
Metral Laurent	H	Metral.laurent@gmail.com	Avr. 2021	Master	Fr	1.5	ISTerre	Ingénieur en déploiement et maintenance du réseau sismologique	19	15/04/2017	CDI	PME/TPE	Ingénieur	Non	Oui
Astruc Anthony	H		Juin 2017	Ingénieur	Fr		ISTerre	Ingénieur en déploiement et maintenance du réseau sismologique	2	01/06/2017					
Lu Yang	H		Avr. 2021	Master	Fr		ISTerre	Doctorant	5	01/03/2019	CDD	Recherche publique	Postdoc	Oui	Oui