

## ANALYSE DES ANOMALIES DU BRUIT SISMIQUE AMBIANT AU DROIT DE RESERVOIRS DE FLUIDE

EL KHOURY C.<sup>1</sup>, CHAURIS H.<sup>1</sup>, KAZANTSEV A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech - Centre de Géosciences, Fontainebleau, France, christine.el\_khoury@mines-paristech.fr

<sup>2</sup> Storengy - Engie Group, Bois-Colombes, France, alexandre.kazantsev@storengy.com

### RESUME

*Des anomalies spectrales dans le bruit sismique ambiant sont couramment observées au-dessus des réservoirs de fluide. Si elles étaient bien comprises, ces anomalies pourraient avoir des applications pour l'exploration de réservoirs géothermiques ou la surveillance de stockages souterrains de gaz. L'objectif des travaux est de reproduire par simulation numérique les anomalies spectrales LFPS (Low Frequency Passive Seismic) observées en surface au niveau des stockages de gaz (en particulier sur les sites de Chémery et Saint-Illiers) et des réservoirs géothermaux.*

**Mots clés :** LFPS, réservoirs de fluide, anomalies spectrales

### ANALYSIS OF ANOMALIES IN SEISMIC AMBIANT NOISE ABOVE FLUID RESERVOIRS

#### ABSTRACT

*Spectral anomalies in seismic ambient noise are currently observed above fluid reservoirs. If well understood, these anomalies may have applications such in geothermal reservoirs exploration or underground gas storage. The objective is to reproduce by numerical simulations the spectral LFPS (low frequency passive seismic) anomalies observed on the surface above gas storages (in particular in Chémery and Saint-Illiers sites) and geothermal reservoirs.*

**Key words:** LFPS, fluid reservoirs, spectral anomalies

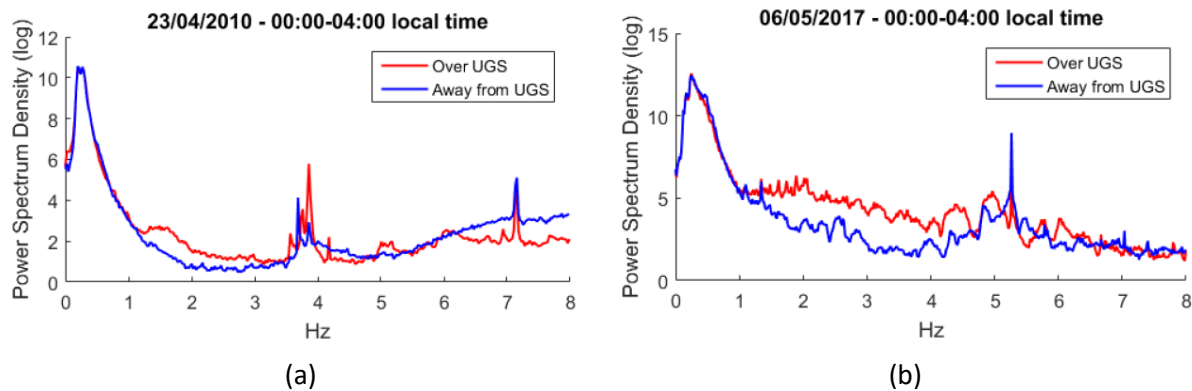
#### INTRODUCTION

L'origine du bruit sismique ambiant est classée en deux principales catégories : naturelle et humaine. La composition du bruit diffère d'un site à l'autre. Bonnefoy-Claudet et al. (2006) analysent le travail de plusieurs auteurs et concluent que la composante verticale du bruit est dominée par des ondes P de volume ainsi que le mode fondamental des ondes de Rayleigh et des modes supérieurs (Peruzetto et al, 2018).

Des anomalies dans le bruit sismique ambiant, définies par une amplification sur la composante verticale des spectres pour des fréquences de quelques Hertz, sont couramment observées au droit des réservoirs de fluide (Saenger et al, 2009). La Figure 1 illustre deux exemples sur des sites de stockages de gaz (Chémery et Saint-Illiers) opérés par Storengy, où la densité spectrale mesurée sur une station au droit du réservoir est comparée à celle d'une station éloignée. Si elles étaient bien comprises, ces anomalies pourraient avoir des applications pour l'exploration de réservoirs géothermiques ou la surveillance du stockage souterrain de gaz. Une étude récente (Kazantsev, 2018) a donné des premières explications : d'abord un effet de structure, et dans une moindre mesure la présence d'un réservoir qui crée une hétérogénéité provoquant la diffraction des ondes de surface (Kazantsev et al., 2019).

L'objectif est de reproduire par simulation numérique les anomalies LFPS observées. Nous montrons ici que des simulations numériques de la propagation d'ondes sismiques réalisées en 3D ont confirmé que l'effet attendu d'un réservoir de gaz est très inférieur à celui d'une éventuelle structure géologique anticlinale, dans le cadre d'une modélisation élastique. La réponse LFPS observée sur les sites de

Chémery et Saint-Illiers a pu être approchée en forme et ordre de grandeur sur un modèle simplifié, de par la présence d'une couche lente en surface, localement amincie par la déformation anticlinale.

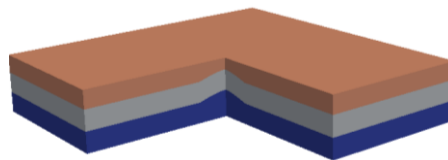


**Fig. 1** – Densités spectrales sur la composante verticale mesurées simultanément au-dessus du réservoir (en rouge) et loin du réservoir (en bleue) sur le site de (a) Chémery, (b) Saint-Illiers (Storengy)

## MODELISATION NUMERIQUE

La méthode utilisée pour les simulations numériques est la méthode des éléments spectraux (Komatitsch et Vilotte, 1998) par l'intermédiaire du code Specfem3D (Komatitsch et al, 1999). C'est une méthode qui appartient à la catégorie des méthodes à formulation faible des équations différentielles ; elle est pertinente pour la modélisation de géométries complexes. La particularité de cette méthode est que la matrice de masse est diagonale par construction, garantissant une très grande précision numérique.

Un modèle géologique simplifié (modèle à 3 couches horizontales) est utilisé dans premier temps dans les simulations. Ce modèle à couches est déformé localement pour représenter une structure anticlinale formant un piège au niveau d'un stockage de gaz (Fig. 2). Un réservoir de gaz est introduit dans certaines simulations. Le réservoir est représenté par une baisse de densité et de la vitesse sismique  $V_p$  de l'ordre de 10 à 20 %, ce qui correspond à la substitution de l'eau par le gaz au sein d'un milieu poreux.



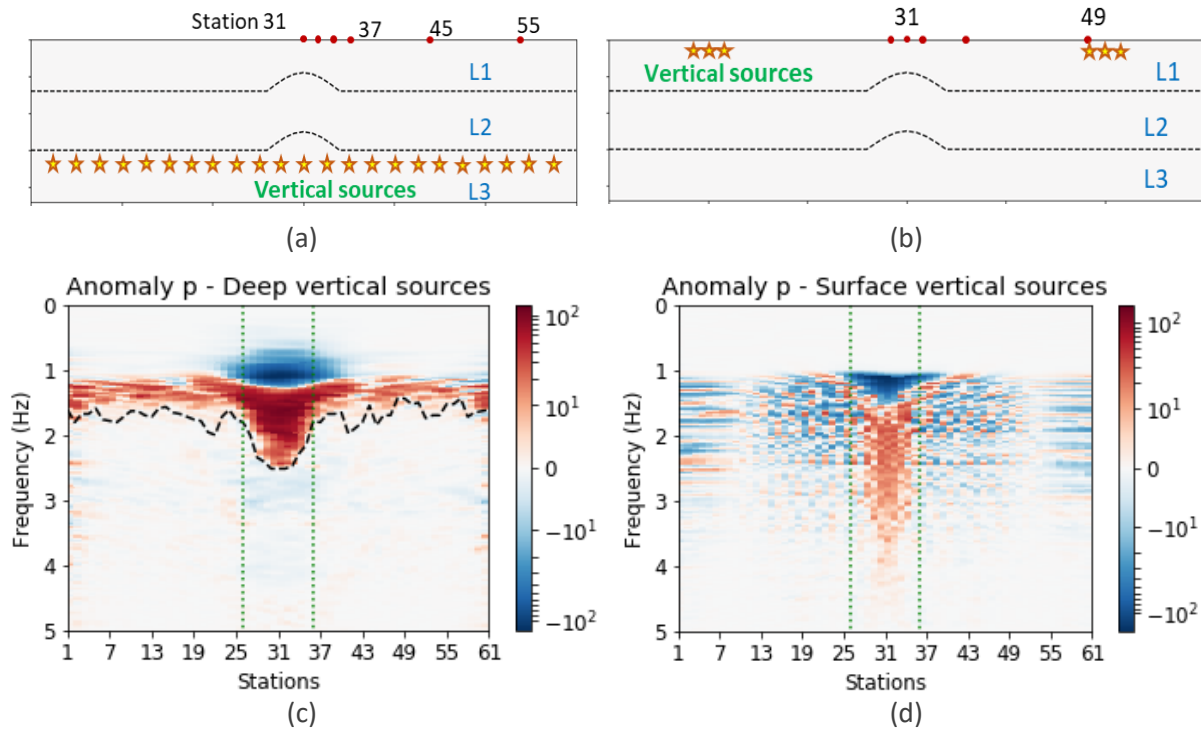
**Fig 2** – Modèle géologique à trois couches avec structure anticlinale

## RESULTATS ET DISCUSSION

Des simulations en présence du réservoir ont confirmé les conclusions apportées dans le travail de Kazantsev (2018) en 2D : la présence de gaz dans le réservoir ne peut pas être la source principale des anomalies observées dans le cadre de la propagation d'ondes élastiques. Le travail s'est alors focalisé sur l'effet de la structure géologique anticlinale dans la génération d'anomalies.

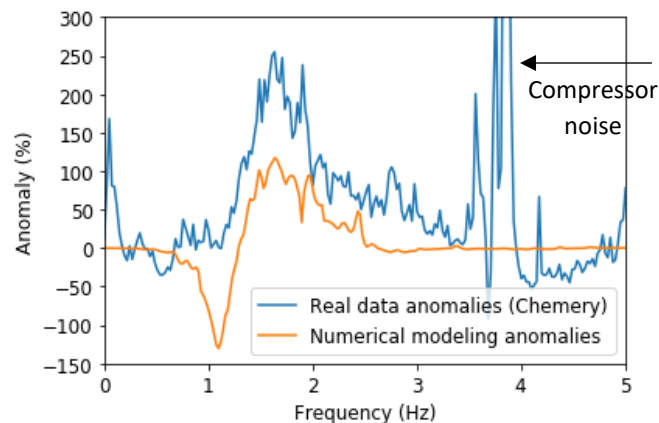
Après de nombreuses simulations effectuées dans le but d'exploiter l'effet de la structure anticlinale, un ensemble de configurations qui permettent d'obtenir une anomalie spectrale qualitativement comparable à celle mesurée dans les données réelles a été retenu. En particulier, on illustre ici la configuration 1 (Fig. 3a) : onde P plane verticalement incidente et la configuration 2 (Fig. 3b) : ondes de surface (Rayleigh) venant de part et d'autre de la zone d'intérêt. Un attribut  $p$  pouvant être assimilé à l'anomalie est calculé. Il représente le pourcentage de différence entre le spectre sur un modèle avec

structure anticlinale et le spectre sur un modèle à couches horizontales pour une station donnée. Les valeurs des densités spectrales sur la composante verticale sont calculées sur une ligne de stations passant par l'anticlinal, et des cartes montrant l'évolution spatiale de l'anomalie en fonction de la position des stations et de la fréquence sont représentées. Pour la configuration 1, on observe l'amplification dans la zone de l'anticlinal délimitée par les traits verts (Fig. 3c). Celle-ci s'étend de 1.2 à 2.7 Hz, et atteint 100% en valeur relative. Pour la configuration 2, l'anomalie est constituée d'un large pic entre 1.5 et 3-4 Hz, précédée d'une légère anomalie négative (Fig. 3d). La force de l'anomalie est nettement diminuée ; elle atteint 40% du maximum en valeur relative. Néanmoins, il se peut qu'elle augmente pour un modèle plus complexe.



**Fig 3** – Configurations de sources retenues dans les simulations, (a) configuration 1, (b) configuration 2. Cartes de l'anomalie  $p$  sur une ligne de stations passant par l'anticlinal pour (c) la configuration 1 et (d) la configuration 2

Pour la configuration 1, qui se rapproche le plus des observations réelles, on superpose sur la Figure 4 l'anomalie réellement mesurée à Chémery (courbe bleue) à la modélisation (courbe orange). C'est une



**Fig 4** – Première comparaison des anomalies des simulations numériques avec les anomalies observées dans les données réelles sur le site de Chémery

première comparaison des résultats de la modélisation avec les données réelles. L'ordre de grandeur de l'amplification ainsi que la bande de fréquence sont comparables à ceux dans les données réelles. La forte anomalie négative précédant l'anomalie positive, observée dans la simulation, n'est pas présente dans les données réelles. Ceci est dû au fait qu'il n'y a pas, dans les données réelles, de fort pic de résonance à 1.3 Hz associé à la couche lente de surface, alors que ce pic est présent dans la simulation. Il reste à changer les paramètres géométriques de l'anticlinal et à considérer un modèle avec des propriétés plus réalistes pour tenter de se rapprocher autant que possible des données réelles.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Comme conclusion, on peut dire que l'anomalie spectrale LFPS est essentiellement statique et déterminée par le contexte géologique typique des réservoirs de gaz étudiés. Plus particulièrement, elle est observée dans le cas de l'amincissement local de la couverture sédimentaire superficielle. Le travail se poursuivra par des simulations numériques dans un modèle réaliste (non-simplifié) et la confrontation systématique aux données réelles, sur les sites de Chémery et Saint-Illiers. Les simulations doivent aussi permettre, pour différentes compositions possibles du bruit ambiant, de relier les propriétés géométriques de l'anticlinal et les propriétés de la couverture sédimentaire superficielle aux caractéristiques de l'anomalie attendue. Ces lois vont être validées par des simulations sur les modèles géologiques réalistes de Chémery et Saint-Illiers. Par la suite une transition sur le cas géothermique est prévue, où des paramètres plus complexes peuvent rentrer en jeu (présence de failles, circulation de fluides, émissions de sources actives, etc...).

## Remerciements

Les auteurs remercient Storengy pour le financement du projet et l'autorisation d'accès aux données et de leur présentation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**BONNEFOY-CLAUDET S., COTTON F., BARD P.Y., 2006** – The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4):205–227.

**KAZANTSEV A., 2018** – Ambient noise spectral amplitude distortions above heterogeneities: feasibility study for multi-fluid reservoir exploration and monitoring. *PhD thesis, MINES ParisTech – Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University, Paris, (France)*.

**KAZANTSEV A., CHAURIS H., DUBLANCHET P., HUGUET F., 2019** – Rayleigh wave amplitude distortions above a reservoir: new insights from elastic modelling, *Geophysical Journal International*, 1267-1289.

**KOMATITSCH D., VILOTTE J.P., 1998** – The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2):368–392.

**KOMATITSCH D., VILOTTE J.P., VAI R., CASTILLO-COVARRUBIAS J.M., SÁNCHEZ-SESMA F.J., 1999** – The spectral element method for elastic wave equations—application to 2-D and 3-D seismic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45(9):1139–1164.

**PERUZZETTO M., KAZANTSEV A., LUU K., MÉTAXIAN J.P., HUGUET F., CHAURIS H., 2018** – Broad-band ambient noise characterization by joint use of cross-correlation and MUSIC algorithm, *Geophysical Journal International*, 215(2), 760–779.

**SAENGER E., SCHMALHOLZ S., LAMBERT M., NGUYEN T., TORRES A., METZGER S., HABIGER R., MÜLLER T., RENTSCH S., MÉNDEZ-HERNÁNDEZ E., 2009** – A passive seismic survey over a gas field: Analysis of low-frequency anomalies. *GEOPHYSICS*, 74(2):O29–O40.