

# UNE NOUVELLE FACON DE CONSIDERER L'ORIGINE DES RELIEFS ET PLUS PARTICULIEREMENT LA GENESE DE LA TOPOGRAPHIE DU MASSIF ARMORICAIN.

Jean.Pierre Lefort<sup>\*</sup> , Bhrigu Nath Prasad Agarwal<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> *Laboratoire de Tectonophysique, Allée des Lucanes, Chemin des Cavaliers, Le District, 35250. Saint Sulpice-la- Forêt, FRANCE.*

<sup>\*\*</sup> *Department of Applied Geophysics, Indian School of Mines, DHANBAD 826004, INDIA.*

*RESUME : Plusieurs méthodes géophysiques ont été développées pour mettre en évidence les ondulations de la base de la croûte ( ou Moho) autres que celles liées aux chaînes de montagne ou aux grands bassins. Elles sont toutes basées sur l'étude des données gravimétriques préexistantes. L'étude de ces ondulations de deuxième ordre est très importante car elle permet de mieux expliquer certaines formes du relief et particulièrement celles que l'on croyait liées à l'érosion. Trois grandes familles d'ondulations ont pu être mises en évidence ; elles sont liées à la formation des Alpes, des Pyrénées ou à l'ouverture du golfe de Gascogne. Elles témoignent donc de l'existence soit de compressions soit de distensions crustales. Le calcul de l'équilibre existant entre les ondulations profondes et les reliefs sus-jacents montre que la croûte est parfois en déséquilibre isostatique. Ces déséquilibres sont à l'origine de séismes ou de surrections topographiques lentes. Ce phénomène est décrit plus en détail pour la Bretagne ou les deux principaux types d'ondulations sont sécants.*

*MOTS-CLÉS : Topographie, gravimétrie, érosion, isostasie.*

## 1 – Introduction

Mises à part les chaînes de montagne dont on sait que la topographie résulte en général (mais pas toujours) d'une collision continentale, on admet souvent que les reliefs qui nous entourent ont été générés par l'érosion. Si cette érosion est indéniable, on sait maintenant qu'elle a en général été surestimée et qu'elle ne participe le plus souvent qu'à 10% du phénomène global qui est à l'origine de la formation des reliefs. L'origine de ceux-ci est en réalité à rechercher dans les profondeurs de la lithosphère. L'explication de ce phénomène nécessite au préalable quelques rappels sur la constitution du globe.



## 2 – Rappels

Le globe terrestre est constitué de couches concentriques. La couche la plus externe est, comme on le sait, nommée la CROÛTE. Elle montre, sous les continents, une épaisseur moyenne de 30 kilomètres. Il existe une analogie parfaite entre l'épaisseur de cette croûte par rapport au globe terrestre et l'épaisseur d'une peau d'orange par rapport à une orange. On sait depuis une centaine d'années que cette croûte est plus épaisse sous les chaînes de montagnes et plus fine sous certains bassins mais on ne connaît pas, en dehors de ces deux cas extrêmes, le détail de ses variations d'épaisseur. La base de cette croûte repose sur le MANTEAU qui a une densité plus élevée que celle de la CROÛTE. La Limite entre ces deux enveloppes se nomme la discontinuité de Mohorovicic, aussi appelée MOHO par les géophysiciens.

## 3– Méthodologie et données

Au cours de ces dernières années nous avons mis au point une série de logiciels permettant de visualiser à partir des données gravimétriques existantes, le détail des ondulations de ce MOHO. Ces données sont particulièrement intéressantes à utiliser car elles sont très abondantes. Il existe pratiquement une donnée tous les 500 mètres sur l'ensemble de notre territoire, ce qui permet une excellente précision dans les calculs. Nous exposerons ici les résultats les plus récents acquis en France et parlerons plus particulièrement de ceux obtenus en Bretagne. Remarquons que les méthodes utilisées, qu'il s'agisse de filtrage fréquentiel, de prolongement vers le haut, d'études polynomiales ou du traitement du signal, donnent des résultats pratiquement identiques. Nous avons cependant privilégié la méthode fréquentielle car elle permet de suivre pas à pas l'évolution des calculs et d'éliminer ainsi les artefacts parfois générés par le calcul. Nous n'entrerons pas plus avant dans cet article sur les différentes procédures utilisées lors du calcul des isobathes du Moho.

## 4 – Résultats à l'échelle de la France

A l'échelle de la France on observe, en plan, deux types principaux d'ondulations du MOHO ( Figure 1).



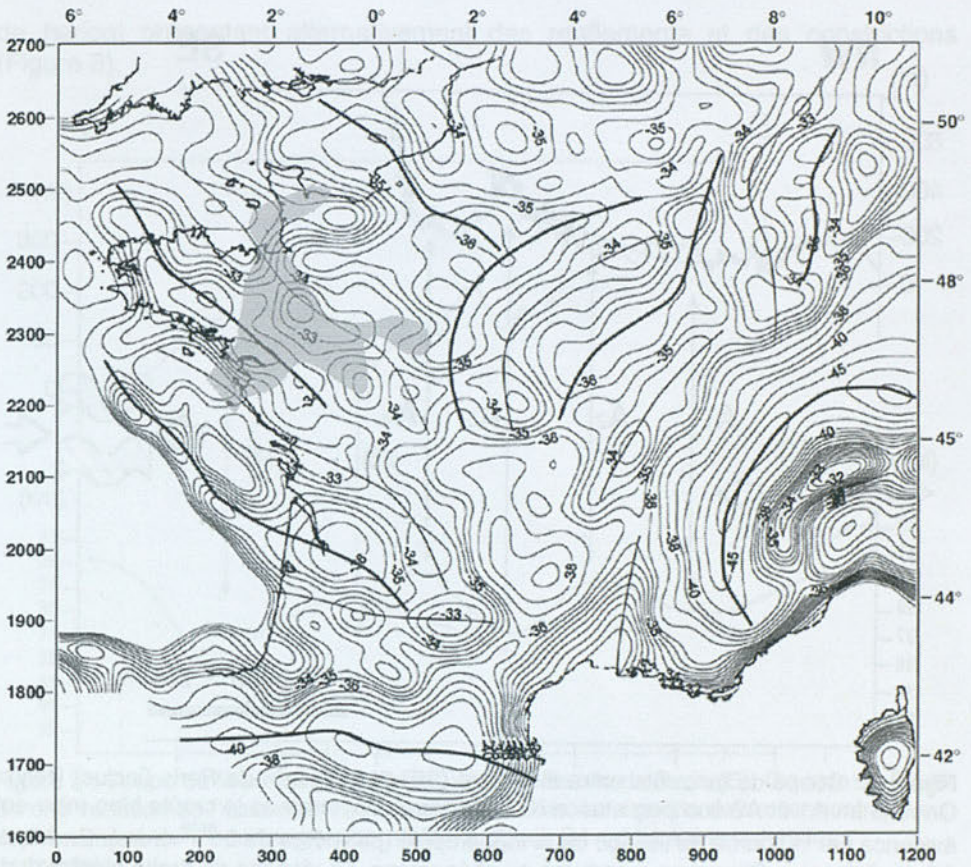


Figure 1 : Distribution des ondulations du Moho sous la France. Les axes épais (ou axes positifs) correspondent à des zones où la croûte est plus épaisse. Les axes filiformes (ou axes négatifs) correspondent à des zones où la croûte est plus fine. Les profondeurs sont exprimées en kilomètres. Les coordonnées sont exprimées en degrés et en kilomètres. La zone figurée en gris représente aussi un « axe » négatif mais a été obtenue à l'aide d'autres méthodes ( cf. le texte pour de plus amples explications).

4.1- Le premier type d'ondulations présente des formes en croissant, espacées de 200 kilomètres environ, concentriques avec les Alpes, et dont l'amplitude verticale est de l'ordre de 4 kilomètres. Ces ondulations affectent les régions localisées entre les Alpes et la région de Rennes où elles ne montrent plus qu'un ou deux kilomètres d'amplitude. Notre méthodologie ne permettant pas discerner les ondulations dont l'amplitude est inférieure à trois kilomètres, le croissant « alpin » figuré en grisé et qui prend en écharpe l'est de la Bretagne a été représenté à partir de données sismiques et géologiques. Il est intéressant de comparer ces ondulations profondes avec la topographie de surface. On note alors qu'il existe, en coupe, une superposition parfaite entre les ondulations du MOHO et celles de la topographie, sans changement notable d'épaisseur de la croûte. Ce dispositif peut parfaitement être comparé avec celui d'une tôle ondulée épaisse (Figure 2).



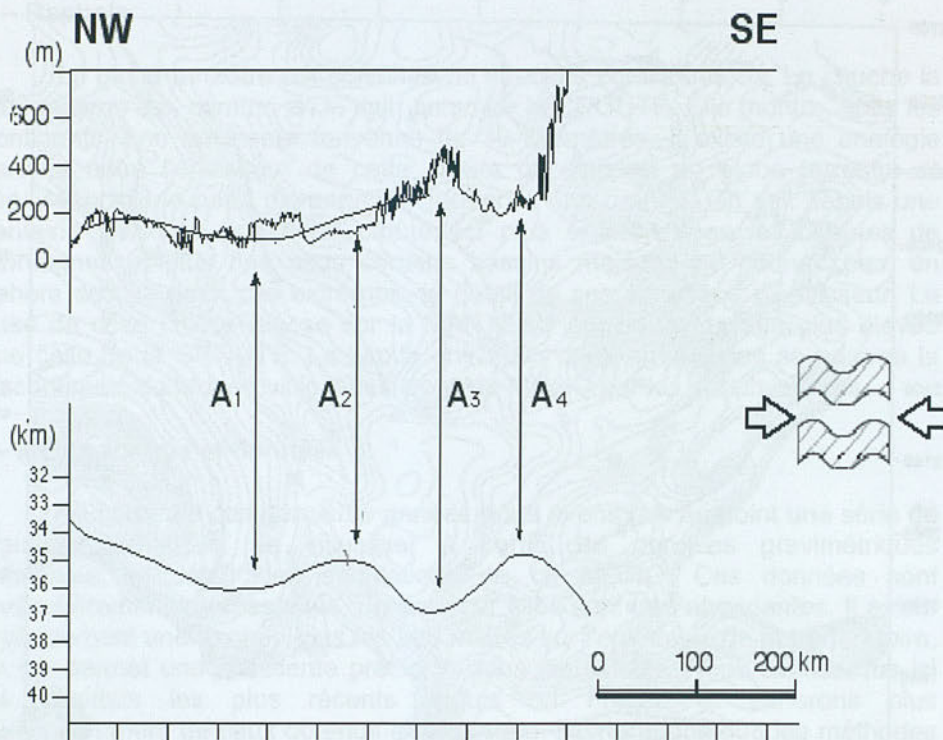


Figure 2 : Coupe de la croûte entre les Alpes (SE) et le Bassin de Paris (inclus) (NW). On note en A1 et A2 une persistance de l'épaisseur moyenne de la croûte bien mise en évidence par la courbe de lissage de la topographie (polynôme de 6<sup>ème</sup> ordre). En A3 et A4 la distension Oligocène a perturbé ce phénomène. La vignette de droite montre que le phénomène de « flambage » constaté en A1 et A2 est lié à des compressions horizontales.

Il montre ainsi qu'en France ce n'est pas l'érosion qui crée les principaux reliefs, même si elle y participe pro-parte. Divers calculs et expériences physiques montrent que ce type de déformation est lié à des phénomènes de compressions. Les axes courbes qui affectent le MOHO et qui s'organisent autour des Alpes montrent à l'évidence que leur genèse est liée à la formation de cette chaîne de montagne. Ce que confirme l'étude des sédiments éocènes dont le dépôt a été contrôlé par ces formes arquées.

4.2- Le deuxième type d'ondulations, qui sont toujours orientées Nord/ouest-Sud/est, a été reconnu entre l'axe du Golfe de Gascogne et la Picardie. L'amplitude des ondulations du MOHO est ici encore de 4 kilomètres et leur espacement de 200 kilomètres. Si l'on compare ces ondulations avec la topographie de surface, on note une relation différente de celle qui a été observée entre les Alpes et la Bretagne. Ici, ce sont les zones d'altitude élevée qui se superposent aux approfondissements du MOHO. En coupe, il existe une certaine analogie entre cet arrangement de la croûte et la forme d'une gousse

de haricot présentant alternativement des renflements et des constriction (Figure 3).

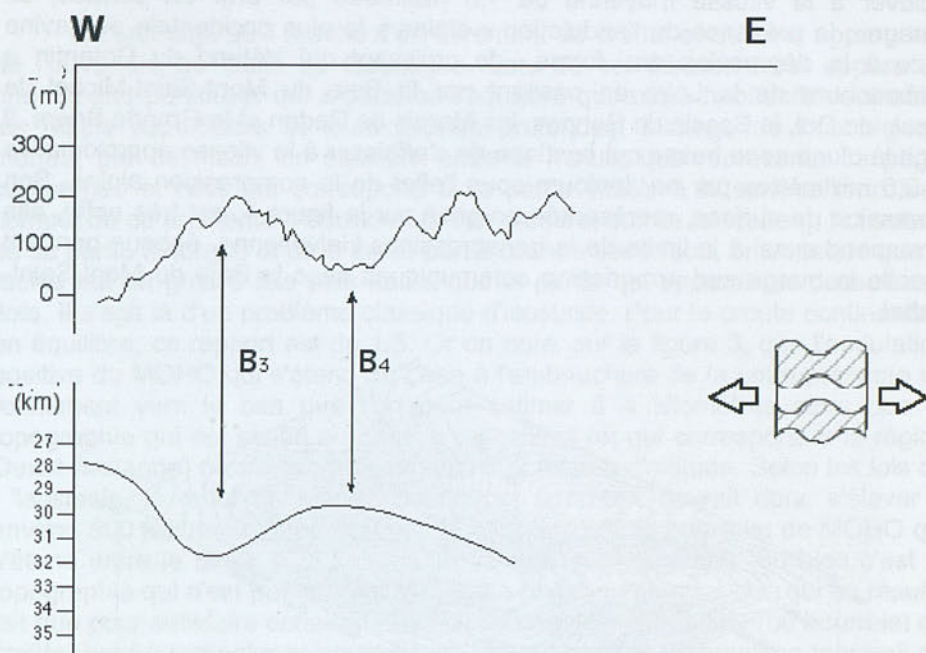


Figure 3 : Coupe de la croûte entre Brest (W) et le Bassin de Paris (E). On note en B3 et B4 une variation de l'épaisseur moyenne de la croûte. La vignette de droite montre que le phénomène de « boudinage » constaté en B3 et B4 est lié à une extension horizontale

Contrairement au cas précédent, il existe donc ici des variations d'épaisseur de la croûte. On sait grâce à de multiples expériences physiques que ceci est lié à des phénomènes d'étirement crustal. En réalité ces ondulations se sont créées il y a plusieurs millions d'années lors de l'ouverture du Golfe de Gascogne au Crétacé.

4.3- Le troisième type de structures crustales qui a été reconnu est limité et paraît restreint à la zone des Pyrénées. On sait, grâce à l'existence de profils de sismique profonde, que l'axe négatif que nous avons reconnu et qui suit cette orogénèse n'est pas lié à une ondulation de la croûte mais bien à la présence d'une zone de failles majeures anciennes, qui paraît avoir été injectée par des fragments de manteau supérieur

## 5 – Résultats à l'échelle de la Bretagne

La Bretagne correspond à une zone singulière puisqu'elle montre l'intersection des deux types majeurs d'ondulation du MOHO.



Les ondulations du MOHO que l'on observe à l'Est de la Bretagne sont donc le résultat de la surrection des Alpes (qui continuent aujourd'hui de se soulever à la vitesse moyenne de 1,5 millimètre par an). En surface, en Bretagne, la présence de l'ondulation « alpine » la plus occidentale se devine grâce à la dépression en forme de croissant qui s'étend du Cotentin à l'embouchure de la Loire en passant par la Baie du Mont-Saint-Michel, le Marais de Dol, le Bassin de Rennes, les Marais de Redon et la Grande Brière. Il s'agit là d'une zone basse qui continue de s'affaisser à la vitesse approximative de 0,5 millimètres par an, toujours sous l'effet de la compression alpine. Son expression de surface, représentée en grisé sur la figure 1, est très nette, elle correspond aussi à la limite de la transgressions Helvétique, époque pendant laquelle la marge sud armoricaine communiquait avec la Baie du Mont-Saint-Michel.

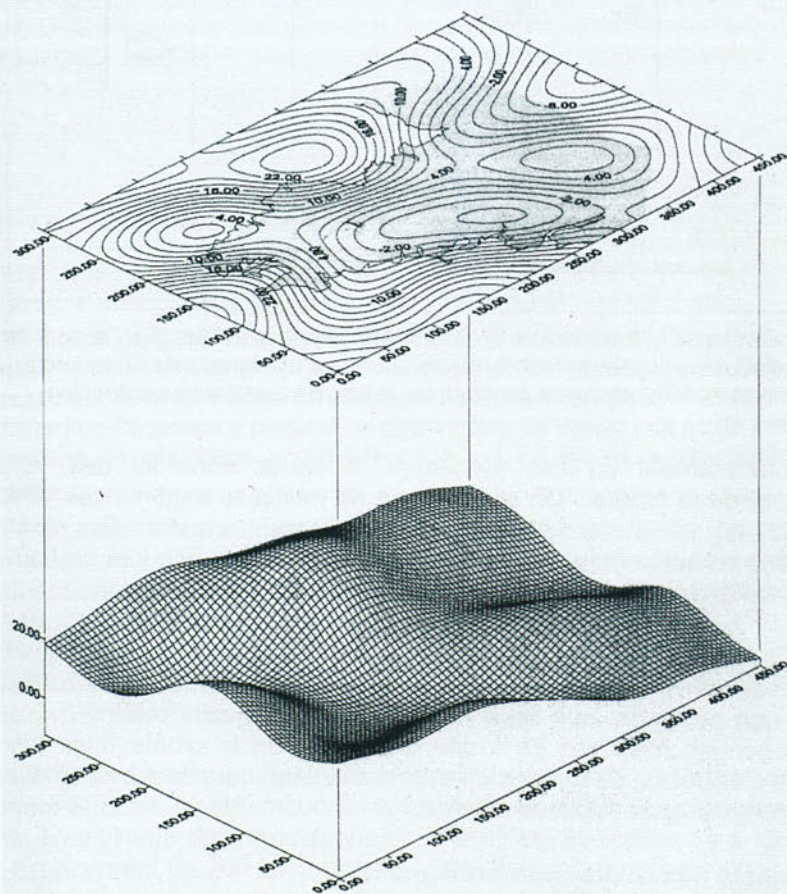


Figure 4. Projection en trois dimensions montrant les ondulations du MOHO sous la Bretagne. On note que la région où la croûte est la plus épaisse correspond à l'Ouest du Massif Armoricain tandis que celle où elle est la plus fine correspond à l'Est de cette zone.



Mis à part cet effet atténué de la surrection alpine, qu'en est-il du renflement profond orienté N130° qui joint le Léon à l'embouchure de la Loire ?.

On sait déjà qu'il résulte d'un étirement de croûte et qu'il est apparu lors de l'ouverture du Golfe de Gascogne. Lors de cet étirement est apparu un phénomène particulier qui a perturbé l'équilibre qui existe habituellement entre les reliefs superficiels et leurs racines profondes. L'image de l'iceberg qui montre, par définition, un équilibre entre la masse que représente sa partie submergée et celle qui correspond à sa partie visible à la surface rend bien compte de ce problème d'équilibre. Si l'on mesure, sur un tel iceberg, la hauteur de sa partie émergée et celle de sa partie cachée sous l'eau, on constate que la racine est en gros 9 fois plus haute que la partie qui apparaît au-dessus des flots. Il s'agit là d'un problème classique d'isostasie. Pour la croûte continentale en équilibre, ce rapport est de 1/5. Or on note, sur la figure 3, que l'ondulation positive du MOHO qui s'étend du Léon à l'embouchure de la Loire présente un renflement vers le bas que l'on peut estimer à 4 kilomètres alors que la topographie qui est située au-dessus de celle-ci (et qui correspond à la région Ouest Bretagne) ne s'élève au plus qu'à 300 mètres d'altitude. Selon les lois de l'isostasie, le relief du Menez Belair, par exemple, devrait donc s'élever à environ 800 mètres, ce qui n'est pas le cas. En Bref, le bourrelet de MOHO qui s'étend entre le Léon et la Loire a un volume trop important (ou bien c'est la topographie qui n'est pas assez élevée). Le phénomène physique qui en résulte fait que pour satisfaire cette fameuse loi de l'isostasie, la racine (ou bourrelet de croûte) tend à remonter et pousse vers le haut comme un bouchon tenterait de remonter à la surface (puisque la croûte est plus légère que le manteau). C'est la raison pour laquelle l'ouest de la Bretagne se soulève à la vitesse moyenne de 1,5 millimètres par an, phénomène antérieurement non expliqué.

On trouve donc côte à côte deux compartiments de socle dont les comportements sont dissemblables. Il en résulte un mouvement différentiel entre le compartiment qui constitue l'Ouest de la Bretagne (qui se soulève) et celui qui constitue l'Est armoricain (qui est à peu près stable). Cette différence de comportement est à l'origine d'une faille importante, la faille de Quessoy (localité située près de Saint Briec) -Vallet (localité située à l'Est de Nantes). Cette faille est soulignée par une suite de grabens tertiaires et parfois par un ressaut morphologique. Elle est actuellement active et le siège de tremblements de terre très fréquents mais de très faible intensité, seulement enregistrés sur les sismomètres, et donc sans danger,

## 6 – Conclusions

La Bretagne présente donc un intérêt tout à fait particulier puisque les deux systèmes d'ondulations du MOHO que nous avons mis en évidence se croisent dans sa partie sud-est.



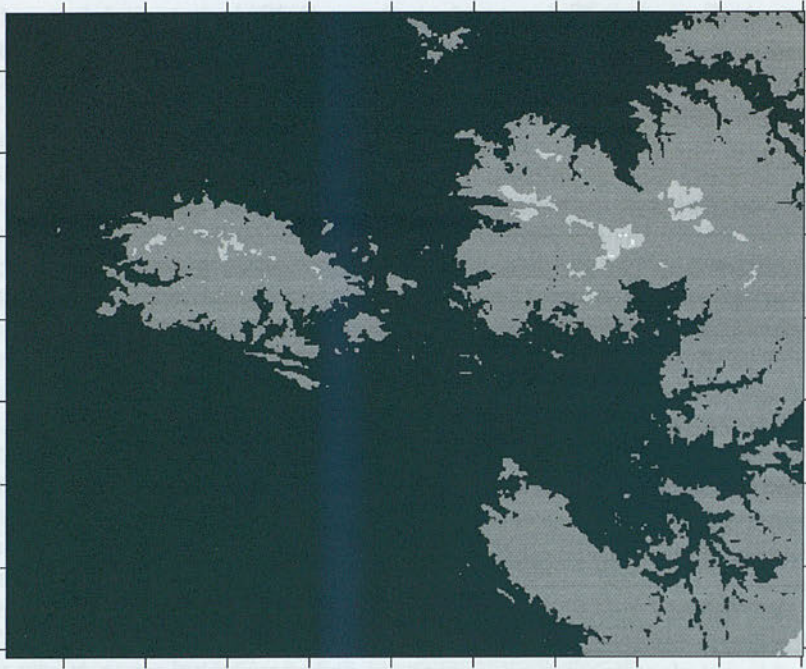


Figure 5. Grâce à un artefact de calcul nous avons, sur le modèle numérique de terrain du Massif Armoricain supprimé toutes les altitudes inférieures à 30 mètres. Ceci met bien en évidence la zone haute qui s'étend du Léon à l'embouchure de la Loire (en gris) recoupée par une zone basse en forme de croissant (en noir) qui passe par le Cotentin, la Baie du Mont-Saint-Michel, le bassin de Rennes, les marais de Redon et la Grande Brière.

Ceci explique pourquoi certaines régions de Bretagne s'affaissent légèrement (en gros l'Est s'affaisse sous l'effet des compressions alpines) alors que d'autres se soulèvent (en gros l'Ouest se soulève sous l'effet d'un réajustement isostatique non encore achevé). La figure 5 qui montre un modèle numérique de terrain de la Bretagne modifié montre en blanc et en grisés les reliefs les plus élevés et en noir ceux dont l'altitude est inférieure à 30 mètres. Cette carte met parfaitement en évidence l'intersection qui existe entre la zone haute orientée nord  $130^\circ$  et la zone basse en forme de croissant qui s'étend entre le Cotentin et l'embouchure de la Loire. Cette carte est parfaitement superposable à la carte des ondulations du MOHO (figures 1 et 4).



## Orientations bibliographiques

- Lefort J.P. et Agarwal, B.N.P. (1996) « Gravity evidence for a Alpine buckling of the crust beneath the Paris Basin », Amsterdam, Tectonophysics, 258, p. 1-14.
- Lefort J.P. et Agarwal B.N.P. (2000) « Gravity and geomorphological evidence for a large crustal bulge cutting across Brittany ( France): A tectonic response to the closure of Biscay Bay », Amsterdam, Tectonophysics, 323, p. 149-162.
- Lefort J.P. et Agarwal B.N.P. (2002) « Topography of the Moho undulations in France from gravity data: their age and origin », Amsterdam, Tectonophysics, 350 (3), p. 193-213.
- Lefort J.P. et Agarwal B.N.P. « A comparative assessment between the Moho undulations, the depths of the Curie isotherm, the topography and the heat flow in and around France: A new insight on its deep structures », (Soumis à Tectonophysics).