

---

# Analyse des déformations d'un tunnel ferroviaire (Somport, Pyrénées Atlantiques)

**Richard FABRE et Jean-François LATASTE**

Université Bordeaux 1, Centre de Développement des Géosciences Appliquées (ex-CDGA, GHYMAC), Avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex.

[r.fabre@cdga.u-bordeaux1.fr](mailto:r.fabre@cdga.u-bordeaux1.fr); [jf.lataste@cdga.u-bordeaux1.fr](mailto:jf.lataste@cdga.u-bordeaux1.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Dans ce travail on présente l'analyse des déformations d'un tunnel ferroviaire de la vallée d'Aspe et on montre que la cause des dommages en est l'instabilité du versant en liaison avec un glissement rocheux. L'investigation en profondeur des formations géologiques est faite à partir de profils géophysiques électriques suivant un dispositif pôle-pôle. Le long du tunnel ferroviaire on précise les zones les plus instables. Elles correspondent à des blocs structuraux reconnus en surface à partir de l'étude géologique.

**ABSTRACT:** In this work one presents the analysis of the deformations of a railway tunnel of the Aspe valley and one shows that the cause of the damage is the slope instability in relation with a rockslide. In-depth investigation of the geological terranes is established from geophysical electrical profiles according to a pole-pole disposition. Along the railway tunnel one shows the more unstable zones, corresponding to structural blocks identified by the field geological investigations.

**MOTS-CLÉS:** vallée d'Aspe, tunnel ferroviaire, paléozoïque, grès, schistes, plis, déformation, tomographie électrique, résistivité, glissement de terrain.

**KEYWORDS:** Aspe valley, railway tunnel, Palaeozoic, sandstones, shales, folds, deformation, electric tomography, resistivity, landslides

---

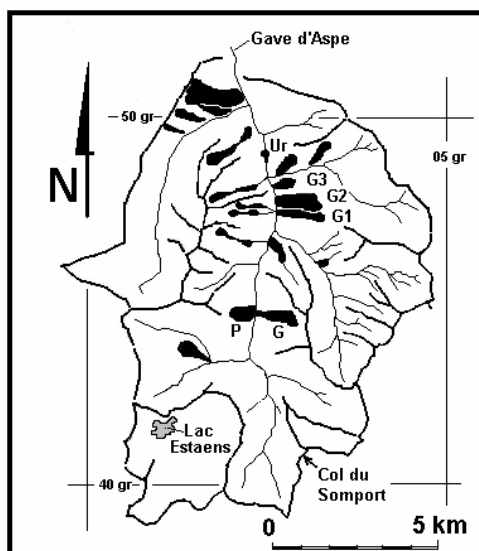
## 1. Introduction

La vallée d'Aspe est un itinéraire stratégique à l'échelle européenne avec l'actuel tunnel routier du Somport. Toutefois, un trajet ferroviaire existe depuis 1928, mais a été fermé en 1970 en raison d'un incident majeur. A cela s'ajoute les nombreux glissements de terrain et les chutes de blocs qui ont toujours provoqué des incidents mineurs mais fréquents [Fig. 1]. Le tunnel du Peillhou, dernier ouvrage du fond de la vallée avant le col du Somport n'échappe pas à la règle. Il a, de plus, la particularité d'être situé dans un versant instable et reconnu depuis 1922. Jusqu'ici l'état des dommages et des déformations du tunnel ferroviaire du Peillhou n'avaient pas été quantifiées ni mises en relation avec l'instabilité globale du versant. C'est ce travail de synthèse qui est fait ici par une approche pluridisciplinaire qui est maintenant devenu assez commune dans ce type d'analyse [Bogaard *et al.* 2000]. Elle combine

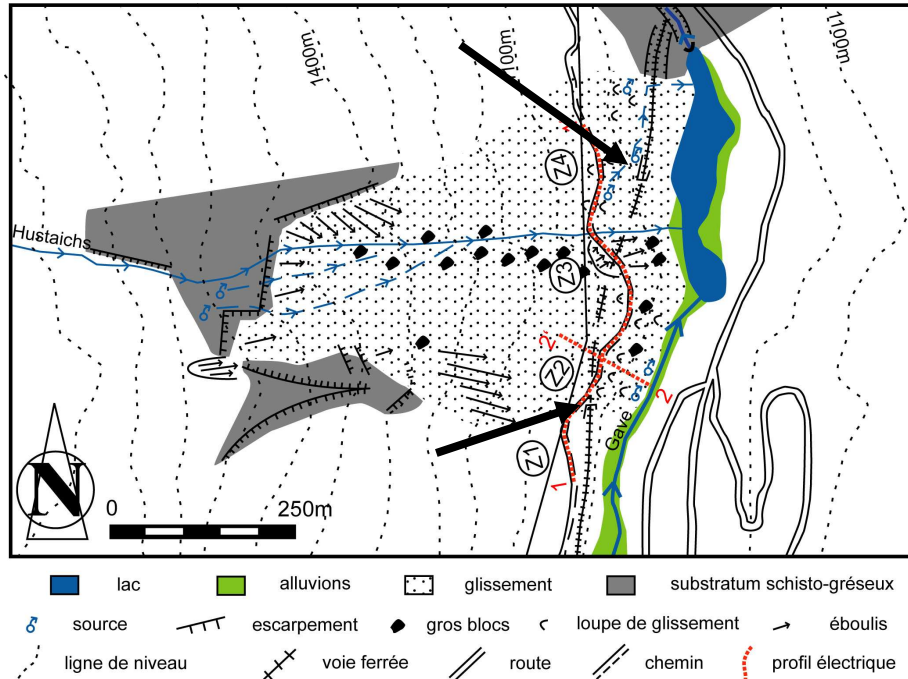
ici géologie, géophysique et génie civil. Elle a pour objectif de savoir si le massif est susceptible d'induire la ruine progressive de l'ouvrage ferroviaire.

## 2. Géologie et géomorphologie du site d'étude.

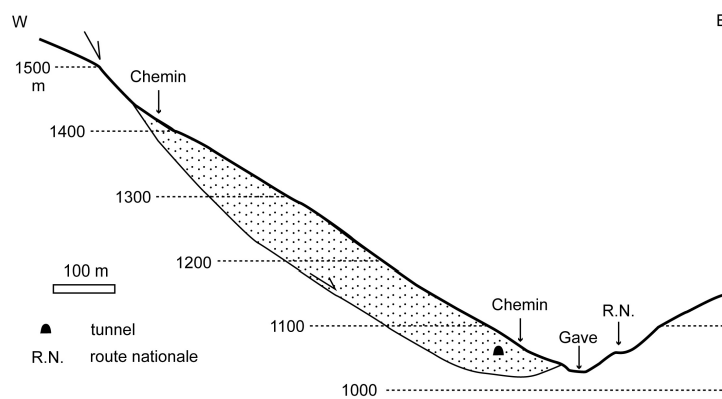
La zone d'étude se situe en rive gauche du Gave d'Aspe et à 5 km en amont du village d'Urdos [Ur] sur un ancien glissement de terrain noté P [Fig. 1]. Cet ancien glissement de terrain est complexe puisqu'il affecte à la fois le substratum rocheux du Paléozoïque et la couverture morainique du Quaternaire [Lebourg *et al.* 99 ; Fabre *et al.* 2003]. Sur le site d'étude on constate que la partie basse du versant instable remobilise la moraine dans laquelle le tunnel est en grande partie creusé, alors qu'en partie haute l'instabilité du versant affecte essentiellement le socle Paléozoïque de nature schisto-gréseuse [Fig. 2]. C'est dans le substratum schisto-gréseux que débute l'escarpement principal du glissement de terrain du Peilhou [Fig. 2]. La zone glissée du site d'étude montre dans sa partie centrale (zone 3) un substratum totalement glissé et déstructuré, sous forme de gros blocs gréseux métriques. C'est dans cette zone située au-dessus du tunnel que l'on observe le plus de glissements superficiels, indices de mouvements plus profonds. De part et d'autre de la zone 3 on trouve de la moraine de 5 à 30 m d'épaisseur recouverte d'éboulis, et reposant sur le substratum Paléozoïque glissé. Précisons que le socle Paléozoïque de la vallée est affecté par des plis orientés N90° à N130° [Mirouse 1966, Al'Safar 1993], plis non visibles sur la coupe du site d'étude qui leur est parallèle [Fig. 3].



**Figure 1.** Carte de localisation (en noir) des principaux glissements de terrain [G, G1, G2, G3] en Vallée d'Aspe dont celui du site d'étude noté **P** (glissement du Peilhou). Légende : trait gras : lignes de crête ; trait fin : principaux torrents du Gave d'Aspe.



**Figure 2.** Carte géomorphologique du site d'étude noté P [Fig. 1], avec le positionnement de la voie ferrée, des formations géologiques, des profils électriques et des zones d'entrée et de sortie du tunnel du Peilhou [flèches noires].



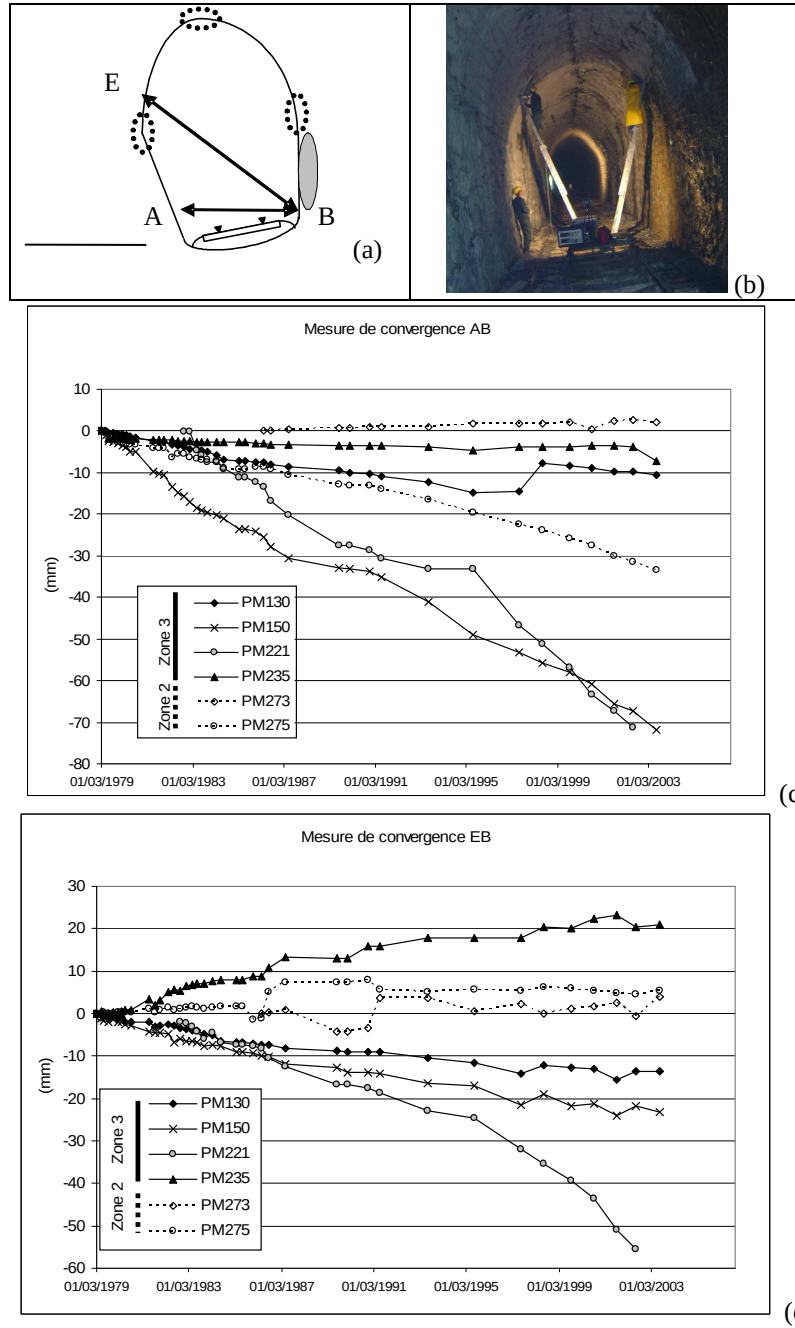
**Figure 3.** Coupe géomorphologique schématisique Est-Ouest du site d'étude avec la position estimée de la zone instable (en pointillé) et celle du tunnel dans la partie basse du versant.

### 3. Le tunnel du Peillhou : historique des déformations et synthèse des mesures.

Le tunnel ferroviaire étudié a 335 m de longueur avec une section en voûte de 5 m de large pour 6 m de hauteur. Il présente un alignement des têtes aval et amont, et une courbe à gauche de la partie centrale épousant la forme du versant du Peillhou en rive gauche du Gave d'Aspe. Les piédroits et la voûte sont constitués de moellons de calcaire « urgonien » lités-assisés de 30 à 50 cm d'épaisseur, avec chemises en pierres sèches aboutissant à des barbacanes en base de piédroits. Le radier est fait en maçonnerie ordinaire de mortier de chaux et de béton. Le tunnel du Peillhou, construit entre 1912 et 1922, a subi des déformations dès le début de sa construction. Nous présentons ici l'historique des désordres et les raisons des dommages en liaison avec l'instabilité du versant montagneux :

- 1912-1918 : construction du tunnel ferroviaire à une voie : le premier tracé superficiel a dû être abandonné en raison de l'instabilité du terrain.
- 1919-1922 : des travaux ont été réalisés afin de contrer les importantes infiltrations, les mouvements de terrain et la fissuration de la voûte.
- 1946-1956 : travaux de reconsolidation suite à des désordres constatés (la chute de moellons, de nombreuses venues d'eau et un mouvement de maçonnerie en voûte). Les travaux consistèrent en un rejointement partiel (piédroits et voûte), des injections de coulis de mortier de ciment, et la reconstruction de 25 m<sup>2</sup> de voûte.
- 1970 : arrêt du trafic entre Bedous (France) et Canfranc (Espagne).
- 1973-1976 : des visites mettent en évidence des déformations importantes (>10 cm) avec ogivation de la forme du tunnel par pincement de la voûte, déversement lent de l'ensemble du tunnel vers la rivière. Il fut décidé la mise en place d'un système de surveillance, avec mesures de convergence, photos profils et campagne de sondages.

La surveillance du tunnel du Peillhou a débuté en 1979. Elle consiste en une visite de l'ouvrage pour y relever les différents désordres qui sont reportés sur un fond de plan. Cette visite est complétée par des mesures de déformations (extensométrie) réalisées sur certains profils suivant le principe d'une mesure de distance entre deux points fixes sur un profil donné du tunnel [Fig. 4a]. Ces mesures de convergences ont été faites dans les zones 2 et 3 du tunnel du Peillhou [Fig. 2], là où les déformations sont les plus importantes [Fig. 5]. Les dommages du tunnel se caractérisent soit par des fissures très légères affectant les joints des moellons en calcaire, soit par d'importantes fractures scindant les blocs calcaires en fragments décimétriques à centimétriques. On peut aussi observer un effondrement de la voûte du tunnel (zone 3). Les mesures de déformation dans le tunnel (zones 2 et 3) où elles sont les plus importantes, seront complétées avec l'interprétation des profils électriques [Fig. 5]. Les mesures géophysiques ont en effet permis de distinguer plusieurs zones homogènes sur lesquelles on peut, par hypothèse, généraliser les déformations mesurées sur quelques profils. Dans la suite de ce travail les analyses des déformations et des profils électriques se feront effectivement suivant les quatre zones précisées figure 5.



**Figure 4.** Mesures de convergence sur la section du tunnel du Peilhou [a, b] entre trois points [A, B, E] [trait= 5], avec c et d : mesures entre AB et EB de 1979 à 2003 pour les zones 2 et 3, les plus déformées.

#### 4. Géophysique : méthodologie

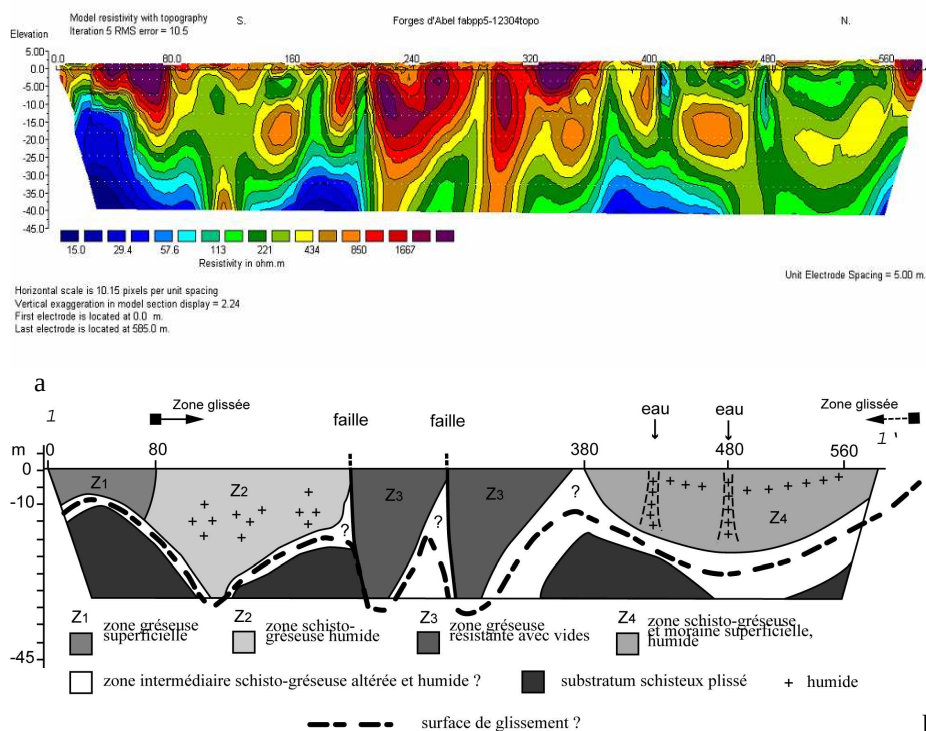
La géophysique par tomographie électrique a permis d'évaluer l'extension en profondeur des différentes formations géologiques observées en surface. Deux profils électriques, perpendiculaires entre eux, ont été réalisés dans le versant suivant le dispositif pôle-pôle [profils 1 et 2, figure 2]. Le premier profil électrique [Fig. 2] se compose en fait de trois profils électriques de 48 électrodes espacées de 5 m, qui donnent un profil recomposé de 485 m de long [Fig. 5], avec une profondeur d'investigation d'environ 40-50 m. Le profil suit le tracé du sentier évoluant à flanc de coteau entre 1080 et 1100 m d'altitude [Fig. 2]. Le deuxième profil électrique noté 2, perpendiculaire au précédent est constitué de 32 électrodes espacées de 5 m chacune, et fait entre 1050 et 1150 m d'altitude. Long de 150 m il suit la pente de la zone glissée et passe au-dessus du tunnel du Peilhou [Fig. 2]. Les mesures de résistance sont réalisées avec le résistivimètre IRIS Syscal R1<sup>+</sup> et inversées avec le logiciel RES2DInv [Loke 1999], [Fig. 5]. Les mesures indiquent des gammes de résistivités comprises entre 10 et 60 ohm.m, d'une part, pour les zones de moraines saturées en eau en surface (chenalisation) [Lebourg 2001], et d'autre part, pour le substratum rocheux schisto-gréseux plissé et saturé en eau en profondeur. Les valeurs élevées de résistivités [ $> 800$  ohm.m] sont celles de la moraine sans eau et/ou des zones de formations gréseuses sèches [Fig. 5a et b].

#### 5. Interprétation et synthèse des données.

Les mesures géophysiques sont faites le long du tracé noté 1 [Fig. 2], passant au-dessus du tunnel du Peilhou. Suivant ce tracé on distingue 4 blocs structuraux hectométriques déplacés les uns par rapport aux autres de part et d'autres de failles subverticales vues sur le terrain [Fig. 5] et détectées en profondeur par la géophysique. Globalement on reconnaît ([Fig. 2 et 5]:

- une zone 1 stable, constituée de moraine et d'éboulis de surface à gros blocs de grès emballés dans une matrice sablo-graveleuse [5 à 20 mètres d'épaisseur]. Ces formations donnent des résistivités élevées en surface (800-2000 ohm.m) qui deviennent rapidement faibles en profondeur (substratum saturé en eau) ;
- une zone 2 instable en surface (végétation rase, loupes d'arrachement) et dans le tunnel avec une forme en ogive de la voûte par poinçonnement de la clé et un raccourcissement suivant la largeur [Fig. 4a, b]. On note un écaillage des piédroits par de longues fissures ouvertes sur les parements par extension, aboutissant à la chute de moellons et au basculement du tunnel vers la pente du versant [Fig. 4a, b]. Les mesures de convergence indiquent tout au plus 3,5 cm de déplacement cumulés en 23 ans [Fig. 5; Zone 2-AB, PM275]. Dans cette zone le substratum est démantelé et glissé en une formation dite schisto-gréseuse altérée à blocs, localement humide, avec des résistivités élevées allant de 500 à 1000 ohm.m voire plus [Fig. 5]. Le substratum schisto-gréseux saturé, en place, apparaît plus profondément que dans la zone 1 et vers 30 mètres de profondeur, avec de faibles résistivités [15 à 60 ohm.m] ;

- une zone 3, la plus instable, constituée comme la zone 2 d'une formation rocheuse à dominante gréseuse correspondant à d'anciens bancs décimétriques de grès déplacés et déstructurés du substratum Carbonifère. Les résistivités y sont élevées [800 à 2000 ohm.m]. Cette zone est partagée en au moins deux blocs par des failles subverticales représentées figures 5a et 5b. La zone 3 glissée, a fortement déformé le tunnel, avec : chutes de moellons, circulations d'eau à la limite de moellons le long de fractures ouvertes, fissurations d'écaillage traversant les moellons, effondrement du rein amont de l'ouvrage et présence de fontis. On observe sur toute la zone des précipités de calcite traduisant une activité hydraulique passée dans la roche. Les mesures de convergence traduisent des mouvements des parois, soit en compression sur la diagonale et la base [Fig. 4a ; tracé pointillé] avec de -5,5 cm à -7 cm en 23 ans [figure 4, Zone 3-AB et EB, PM221], soit en extension [en grisé] de 2 cm en 23 ans [Fig. 4 c, d ; PM235].
- enfin, une zone 4 peu instable, constituée d'une moraine sablo-graveleuse à blocs décimétriques, avec d'assez fortes résistivités en surface [600 à 900 ohm.m], devenant faibles [60 ohm.m], d'une part dans les zones humides de la moraine (présence de sources), et d'autre part dans le substratum schisteux plissé situé vers 30 mètres de profondeur [Fig. 5a et b].



**Figure 5.** Profil de tomographie électrique des résistivités le long du profil 1 [[a] et son interprétation géologique [b].

## 6. Conclusion

Les différentes informations sur les mouvements du tunnel ferroviaire du Peilhou traduisent une déformation en masse du versant montagneux entre 900 et 1400 mètres d'altitude. Le glissement correspond à un tassement d'ensemble du versant avec gonflement en pied (bourrelet frontal). L'érosion continue en pied de versant par le Gave, entretient cette instabilité. Les vitesses de déformation des parois de l'ouvrage sont de l'ordre de 0,3 cm/an depuis plus de 20 ans dans la partie centrale du glissement [zone 3]. Les mouvements d'ensemble cumulés du versant sont d'au moins 200 mètres d'après la forme convexe bombée du bourrelet frontal du glissement, sur une période du millénaire voire plus. Ces mouvements ne sont pas uniformes entre la partie centrale et ces bordures, cela se traduit par des zones plus préservées et peu déformées du tunnel. En l'état actuel des connaissances, tout semble indiquer que le mouvement n'évoluera vraisemblablement pas vers une rupture catastrophique. Les vitesses devraient rester faibles et liées au régime hydrique du versant. Le plan de rupture du glissement fluctue entre 20 et 45 mètres de profondeur dans la partie centrale. Un profil électrique parallèle à la pente du versant [profil 2, figure 2] confirme ces observations et indiquerait des plans de rupture multiples. Dans ce travail l'approche pluridisciplinaire de l'endommagement d'un ouvrage d'art en région montagneuse, permet d'expliquer les causes du phénomène, ses limites, et prépare les solutions de remise en état du tunnel si la ligne ferroviaire Oloron-Canfranc est rouverte.

## Références

- Al'Safar M.M. Géométrie et modélisation numérique des structures anticlinales. Exemples : Atlas Saharien (Algérie), Rides Sud Rifaines (Maroc) et Pyrénées (France-Espagne). Thèse de l'Université de Toulouse, 1993.
- Bogaard T.A., Antoine P., Desvarreux P., Giraud A., Van Asch T.W.J. The slope movements within the Mondorès graben (Drôme, France): the interaction between geology, hydrogeology, and typology, *Engineering Geology*, 55, 2000, pp. 297-312.
- Fabre R., Texier J.P., Clément B. et Lebourg T. Méthode de localisation des moraines de convergence dans une ancienne vallée glaciaire (Pyrénées, France) : conséquences sur les instabilités des moraines et reconstruction des glaciers au Würm. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 2003, pp. 419-434.
- Lebourg T., Frappa M. et Sirieix C. Reconnaissance des surfaces de rupture dans les formations superficielles instables par mesures électriques. *Pangea*, 1999, n°31-32, pp.
- Lebourg T. et Frappa M. Mesures géophysiques pour l'analyse des glissements de terrain. *Revue Française de Géotechnique*. N° 95/96, 2001, pp. 33-40.
- Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Practical guide to 2D and 3D surveys*, 1999, 57 p.
- Mirouse R. 1966. Recherches géologiques dans la partie occidentale de la zone primaire axiale des Pyrénées. Thèse de l'Université de Toulouse, France. 451p.