



profondeur. A partir de la base du puits rayonnaient des galeries, parfois sur 3 étages superposés, de 4 à 5 m de large et 3 à 4 m de haut pour une longueur maximum de 40 m.

L'analyse des documents d'archives (déclarations de sinistres, cartes), et l'étude des photographies aériennes montrent un maximum d'effondrements suivant un couloir Nord-Sud, de 1,5 km de long pour 250 m de large, correspondant à l'alignement des exploitations à ciel ouvert. Les effondrements diminuent en s'écartant de ce couloir du fait que les exploitations souterraines profitaient certainement du rabattement de nappe dans les carrières à ciel ouvert pour se développer. L'arrêt des exploitations superficielles a entraîné une remontée de la nappe à l'origine, très certainement, des effondrements constatés à partir des années 30.

Les effondrements recensés sont de deux types : des effondrements d'un diamètre inférieur à 2 m et ceux d'un diamètre supérieur à 5 m. Les premiers pouvant atteindre de grandes profondeurs (jusqu'à 26 m) correspondent à d'anciens puits d'accès et les seconds d'une profondeur de 4 à 5 m à des chambres ou à des galeries d'exploitation.

A l'issue de cette première phase, une carte de densité des d'effondrements a pu être établie. Cependant, il subsistait de nombreuses incertitudes que les investigations géophysiques devaient tenter de lever.

## . L'étude géophysique

L'objectif de l'étude géophysique était, dans un premier temps de délimiter la zone de calcaire, formation où se situent les cavités et, ensuite d'investiguer les zones où subsistaient des doutes. Au préalable, une phase test a été effectuée sur une parcelle de la zone d'étude afin de déterminer les méthodes les plus adaptées dans ce cadre.

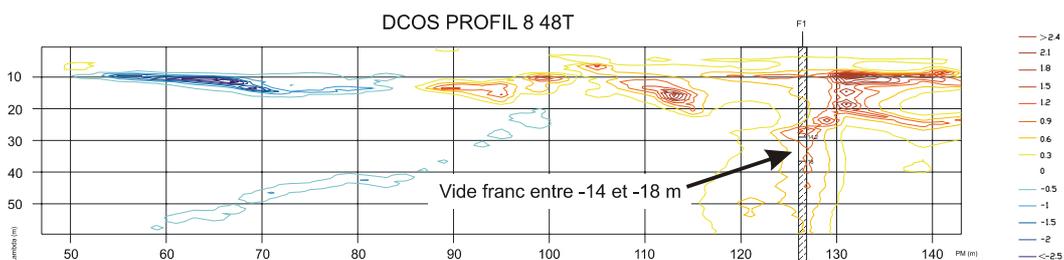
### Phase test

Quatre méthodes ont été mises en oeuvre pour ce test : le panneau électrique, le V.L.F, la microgravimétrie et la sismique par ondes de surface (méthode DCOS).

La première méthode donne une vision en coupe de la répartition en profondeur des matériaux dans le sol par l'intermédiaire de leur résistivité. Elle est bien adaptée compte tenu du contraste de résistivité marqué entre les formations calcaires et argileuses. Le VLF, comme la méthode précédente, apporte des informations sur la résistivité du sous-sol, mais ne donne pas de vision en coupe. Elle est intéressante pour localiser de grandes variations lithologiques (contacts entre les calcaires et les argiles par exemple), des accidents ou des axes de plus grande résistivité (alignement d'effondrements par exemple). La microgravimétrie basée sur la mesure de la variation de la pesanteur à la surface du sol due à des défauts ou à des excès de masse en profondeur et la méthode sismique DCOS (Détection de Cavités par mesure d'Onde de Surface) basée sur l'analyse de signaux sismiques créés par du bruit anthropique, devaient permettre de localiser des vides ou des zones décomprimées ( Durand et al, 2006, Mouton et al,2007).

Après une validation par sondages, deux méthodes ont été retenues : le panneau électrique effectué par la société Lithologic et la sismique DCOS réalisée par la société SismOcéan. La première méthode a fourni des informations sur la géologie et permis la cartographie à grande échelle de secteurs décomprimés à forte résistivité La seconde méthode a localisé avec précision (échelle métrique) des cavités et des zones décomprimées en profondeur (jusqu'à 14 m de profondeur).

La figure ci-dessous est la superposition d'un résultat DCOS avec la description d'un forage réalisé sur la zone test. La profondeur exprimée en longueur d'onde peut être estimée en profondeur « réelle » de façon empirique en divisant par 2 la longueur d'onde.

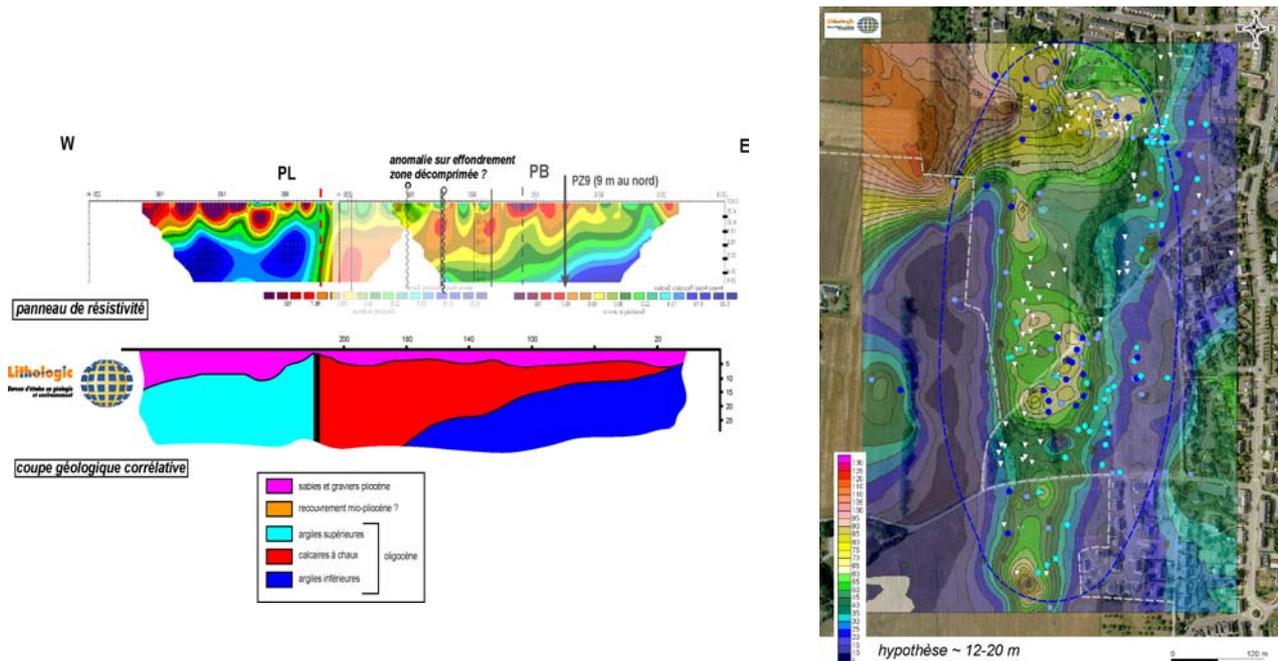


Le vide franc situé entre 14 et 18 mètres correspond à une anomalie DCOS de forte amplitude.

## Prospection étendue

La prospection géophysique a été étendue à l'ensemble de la zone d'étude avec, dans un premier temps, des mesures par panneaux électriques (44 panneaux en dipole-dipole de 64 électrodes). Les mesures de résistivité apparente obtenues ont, ensuite, été inversées (res2Dinv) pour remonter à un modèle de répartition de la résistivité en profondeur. Sur les cartes de résistivité apparente (voir figure suivante), apparaît une zone centrale plus résistante (80 ohm.m en moyenne) de calcaire (confirmé par sondages) bordée de zones plus conductrices (15 ohm.m en moyenne) d'argiles, avec ponctuellement des secteurs de plus forte résistivité (140 ohm.m en moyenne) correspondant à des recouvrements sablo-graveleux ou de faluns.

C'est dans l'axe de cette bande calcaire orientée NNE/SSW que se situe la majorité des effondrements recensés en étude bibliographique.

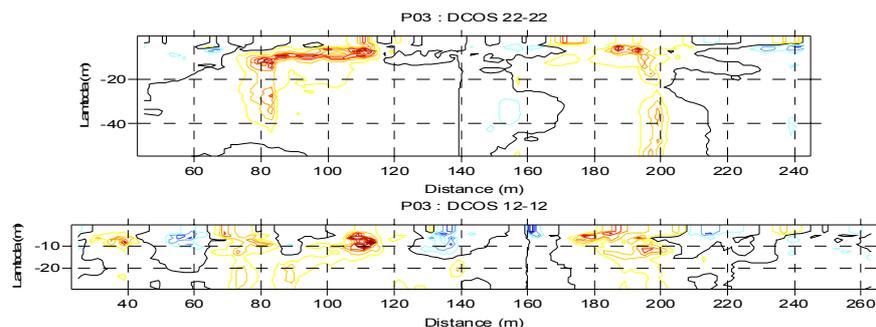


Exemple de coupe de panneaux après inversion (modèle de résistivités vraies) et de carte d'iso-valeurs de résistivités apparentes (de 12 à 20 m de profondeur).

La transition, à l'ouest de la zone d'étude, entre les calcaires et les argiles est relativement brutale (contact par faille...) comme le montrent les panneaux électriques et le confirment les sondages effectués sur cette zone. Par contre à l'est, la formation calcaire semble s'amincir vers l'est avant un passage progressif aux formations argileuses. A noter, le recouvrement par des formations plus résistantes à l'ouest, de sables, galets et faluns.

Les panneaux ont, ensuite, été complétés par trois séries de deux profils sismiques parallèles (680 points de mesures) recoupant des anomalies électriques et des zones d'incertitudes, notamment dans le secteur est de la zone où le calcaire s'amincit.

Des anomalies de deux types ont été mises en évidence par la sismique DCOS : des anomalies « allongées » à 4-5 m de profondeur et des anomalies verticales s'enfonçant de 3 à 15 m.



Exemple de profil DCOS - pour 2 « profondeurs » d'analyse

## *Forages de reconnaissance*

Quatorze forages de reconnaissance ont été effectués pour caler les résultats des investigations géophysiques.

Ils confirment, en particulier, l'amincissement de la formation calcaire vers l'est, de 30 m à environ 10 m d'épaisseur, mis en évidence par les panneaux électriques. Les forages placés sur les anomalies géophysiques DCOS ont rencontré des zones correspondant à des galeries en partie effondrées ou à des zones décomprimées (anomalies allongées) et à des zones de remblai (anomalies verticales).

3 forages ont traversé, localement, des recouvrements sableux et graveleux expliquant des anomalies de surface plus résistantes et les 2 forages placés hors des anomalies n'ont pas rencontré d'indices de cavités souterraines.

## **. Conclusion**

En complément de l'étude bibliographique, la prospection géophysique a permis :

- de cartographier précisément la géologie de la zone d'étude et notamment les limites du calcaire en contact, sub-vertical à l'ouest et progressif à l'est, avec les formations argileuses. L'amincissement de la formation calcaire s'accompagnant d'un passage à des exploitations superficielles (épaisseur inférieure à 10 m).
- de localiser des cavités ou des zones décomprimées dans des secteurs sans indice de surface en mettant en évidence une extension des exploitations souterraines vers l'est de la zone à forte densité d'effondrements, définie en étude bibliographique.

Compte tenu des éléments fournis par l'étude bibliographique complétée par l'étude géophysique trois niveaux d'aléas correspondant à une probabilité d'occurrence d'effondrements faible, moyen à fort ont été définis, avec :

**Aléa Faible** : jamais d'effondrement constaté ou recensé, contexte géologique défavorable à l'extraction de calcaire (argiles), zone éloignée de plus de 250 m des carrières (hors du rayon d'influence du rabattement de nappe des carrières superficielles), niveau calcaire  $\leq 10$  m.

**Aléa Moyen** : zones sans indice de surface mais présentant des anomalies géophysiques, dans un contexte géologique favorable (niveau calcaire  $> 10$  m).

**Aléa Fort** : effondrements répertoriés dans un secteur de forte densité de puits et de galeries et dans un secteur géologique extrêmement favorable, avec des niveaux calcaires jusqu'à 30 m, zone proche des carrières à ciel ouvert.

Le respect de ces critères a, ensuite, conduit à l'élaboration d'une carte d'aléas d'effondrement, s'accompagnant de dispositions techniques constructives, qui devrait être soumise à enquête publique en fin d'année.

Remerciements :

Nous remercions Rennes-Métropole qui a financé ce projet et les communes de Chartres de Bretagne et Bruz pour leur collaboration.

Références :

- Durand D., Mouton E., Grandserf P., Nieberidze S. (2006) – Détection d'anomalies dans le sous-sol à partir d'ondes de surface. Méthode DCOS, AGAP Qualité- GEOFCAN Besançon 2006, pp. 44-47
- Mouton E., Durand D., Clement A. Mériaux P. (2007) - Recherche d'anomalies dans les digues par ondes de surface (MASW et DCOS) : application sur le site expérimental de l'Agly (66) - GEOFCAN – AGAP qualité, Géophysique des sols et des Formations Superficielles, 6<sup>ème</sup> colloque, Bondy, France, 25 et 26 Sept 2007