



# Le radon-222 et les ondes de marée : un outil d'aide à la compréhension de la dynamique des systèmes géologiques

L'analyse fréquentielle de longs enregistrements du radon-222 mesurés dans l'air des sols ou dans l'air confiné des cavités souterraines, peut nous apporter de précieuses informations sur le fonctionnement et les caractéristiques intrinsèques de ces différents milieux. C'est par l'extraction des ondes de marées barométriques, diurnes et semi-diurnes, dissimulées dans les signaux radon-222, que nous pouvons entrevoir l'évolution de phénomènes difficilement observables par d'autres méthodes. C'est une manière indirecte et très sensible d'observation des lois de diffusion, d'advection, d'émanation et de transfert des gaz en milieux poreux, fracturés et saturés en eau de façon variable. Cette méthode, d'une grande sensibilité, nous ouvre la voie vers la détection des ondes de marée gravimétrique, beaucoup plus difficiles à mettre en évidence dans les signaux radon, mais qui permettrait de pouvoir relier une variation d'activité en radon-222 à une sollicitation mécanique connue. En effet, l'onde de marée gravimétrique  $M_2$  est en rapport direct avec l'étude des précurseurs de séismes.

P. Richon • E. Pili CEA - DAM Île-de-France

## La mesure du Radon

Le radon-222 est un gaz radioactif naturel, de période 3,8 jours, issu de la désintégration du radium-226, dans la chaîne de décroissance radioactive de l'uranium-238. Dans l'air, l'eau et les roches, les concentrations naturelles en radon sont en général extrêmement faibles. Exprimée dans une unité fort répandue en chimie de la pollution atmosphérique, une activité volumique habituelle de  $37 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  ne représente qu'un milliardième de ppb volumique ( $10^9$  ppbV) dans l'atmosphère. Pourtant de telles concentrations en radon restent très faciles à mesurer, tant la désintégration  $\alpha$  constitue un phénomène énergétique : elle rend théoriquement possible la détection d'un atome individuel de radon, performance tout à fait inaccessible aux méthodes d'analyse chimique. C'est cette particularité qui rend le radon si intéressant pour le traçage des phénomènes naturels [1].

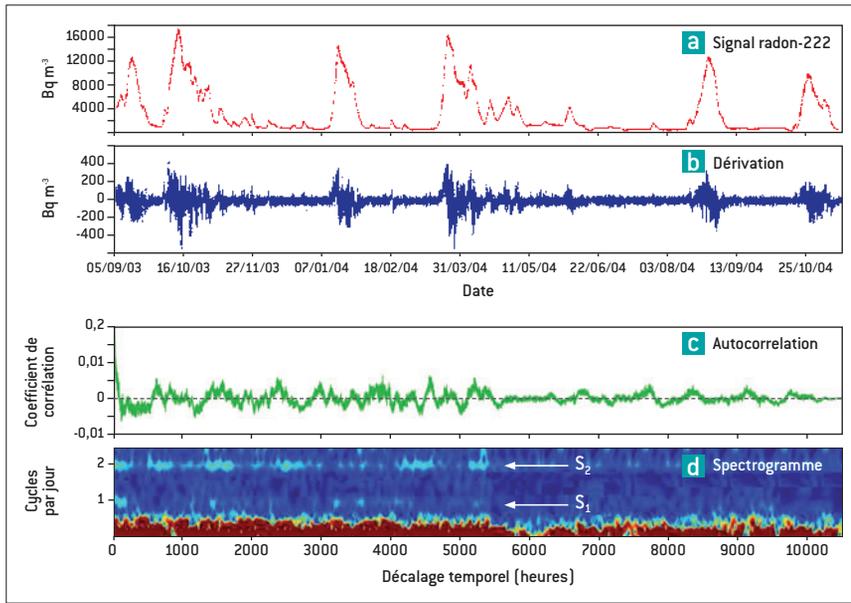
## Applications aux sciences de la Terre

Utilisée depuis le début des années 60 pour la compréhension et la prévision des grands événements géologiques comme les séismes ou les éruptions volcaniques, la mesure du radon-222 n'est pas encore un outil de prévision opérationnel, et ne commencera à le devenir qu'à la condition de savoir déchiffrer et interpréter précisément la moindre de ses variations sur des enregistrements de plusieurs années. Aux variations de grandes amplitudes du signal, souvent associées aux cycles saisonniers et à la météorologie locale, s'ajoute des variations beaucoup plus

petites, mais significatives, noyées dans le « bruit » du signal, et générées par les ondes de marée (barométrique, gravimétrique ou thermique). La présence non systématique de ces ondes et leurs variations temporelles mesurées dans une cavité souterraine ou dans un sol [2], peuvent nous aider à comprendre les différentes sollicitations externes exercées sur les milieux géologiques [3, 4], ou nous donner indirectement des informations sur leurs propriétés physiques : porosité, perméabilité, connectivité à l'atmosphère ou sensibilité aux contraintes tectoniques.

## Extraction des ondes de marées

C'est par des méthodes avancées de traitement du signal [5] que nous procédons à l'extraction de ces ondes de marées et que nous progressons dans la compréhension des interactions qui existent entre les atomes de radon-222 présents dans les pores de la roche et les mécanismes en jeu lors de la préparation des grands événements sismiques ou volcaniques. Cette opération est réalisée à l'aide d'outils statistiques et regroupe l'utilisation de fonctions de dérivation, de transformée de Fourier et de fonctions d'autocorrélations ; le résultat final est présenté sous la forme d'un spectrogramme (figure 1). La difficulté principale est d'identifier, puis d'extraire des ondes de faible amplitude dissimulées dans un signal de forte dynamique. Ce n'est qu'à ce stade que l'analyse temporelle du phénomène est possible. Les applications sont nombreuses ; nous pouvons par exemple étudier l'évolution de la perméabilité à l'air d'un sol par l'extraction de l'onde de marée



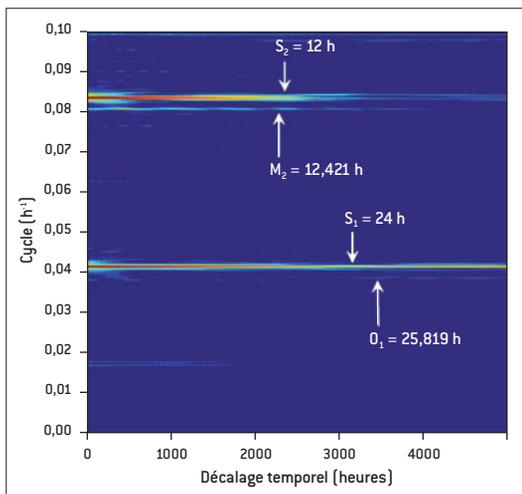
**Figure 1.** Exemple d'analyse fréquentielle appliquée à une série temporelle de radon-222 mesurée dans le laboratoire souterrain de Roselend.  
 (a) Données brutes mesurées ;  
 (b) Application de la fonction dérivée ;  
 (c) Application de l'autocorrélation (une itération) ;  
 (d) Spectrogramme final démontrant la présence des ondes barométriques diurne et semi-diurne  $S_1$  (24 h) et  $S_2$  (12 h) indétectables par l'application d'une simple transformée de Fourier. Aucune onde gravimétrique n'est détectée dans cette série malgré plusieurs autocorrélations successives.

barométrique  $S_2$  (12 h de période). En effet, plus un sol est saturé en eau, plus l'air de ses pores sera « étanche » aux variations de pression atmosphérique. Cette information est contenue dans une longue série temporelle du radon enregistrée dans l'air du sol et peut donc en être extraite par cette méthode. Par cette même approche, il est aussi possible d'étudier la zone endommagée d'un tunnel (EDZ). Le forçage barométrique de l'onde  $S_2$  sur les fractures de l'EDZ et les pores de la roche peut influencer significativement la concentration en radon mesurée dans l'air du tunnel [5]. Le processus de dégazage diffus des volcans peut lui aussi être abordé de la même façon,

le radon suivant particulièrement bien les variations des flux de  $CO_2$  d'origine volcanique, eux-même sensibles au forçage de la pression barométrique.

### Conclusions

Même si la mesure de ce gaz radioactif naturel n'est pas encore un outil opérationnel pour les sismologues et les volcanologues, il n'en demeure pas moins que la maîtrise de cette métrologie bien particulière et du traitement du signal qui lui est obligatoirement associé, peut nous donner un accès indirect à des phénomènes imperceptibles se produisant dans les roches ou les sols. Cette approche statistique sur le bruit du signal radon semble apporter de nombreuses solutions aux problématiques posées en sciences de la Terre (figure 2). L'application aux stockages souterrains, à la séquestration du  $CO_2$  et plus précisément à la migration des gaz en milieu fracturé est un des axes de recherche développé au CEA - DAM depuis plusieurs années au Laboratoire Naturel de Roselend.



**Figure 2.** Spectrogramme final de l'activité en radon mesurée dans une cavité souterraine.  
 Nous distinguons clairement les ondes de pression barométriques  $S_1$  (24 h) et  $S_2$  (12 h) mais aussi les ondes de marée gravimétriques semi-diurne  $M_2$  (12,42 h) et diurne  $O_1$  (25,81 h), ondes très rarement mises en évidence sur des enregistrements radon.

### RÉFÉRENCES

[1] P. RICHON *et al.* "Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994)", *Geophys. Res. Lett.*, doi:1410.1029/2003GL016902, 012003 (2009).  
 [2] F. PERRIER, P. RICHON, J.-C. SABROUX, "Temporal variations of radon concentration in the saturated soil of Alpine grassland: The role of groundwater flow", *Sci. Total Environ.*, 407(7), p. 2361-2371 (2009).  
 [3] M. TRIQUE *et al.* "Radon emanation and electric potential variations associated with transient deformation near reservoir lakes", *Nature*, 399, p. 137-141 (1999).  
 [4] E. PILI, F. PERRIER, P. RICHON, "Dual porosity mechanism for transient groundwater and gas anomalies induced by external forcing", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 227(3-4), p. 473-480 (2004).  
 [5] P. RICHON, F. PERRIER, E. PILI, J.-C. SABROUX, "Detectability and significance of 12 hr barometric tide in radon-222 signal, dripwater flow rate, air temperature and carbon dioxide concentration in an underground tunnel", *Geophys. J. Int.*, 176, p. 683-694 (2009).