

# Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE  
*Géosciences appliquées*



**Les stockages  
souterrains**

## Géologues

DIRECTEUR DE PUBLICATION :  
Sylvain CHARBONNIER

RÉDACTEUR EN CHEF :  
Marc BLAIZOT

CHARGÉ DE MISSIONS :  
Gérard SUSTRAC

COMITÉ DE RÉDACTION :

• SECTION GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR

Marc BRISEBARRE  
Marianne CHAHINE  
Denis FABRE

• SECTION EAU

Jean-Pierre FAILLAT  
Anthony LE BEUX  
Lahcen ZOUHRI

• SECTION GÉOPHYSIQUE

Antoine BOUVIER  
Christian HERRISSON  
Jean-Marc MIEHE

• SECTION SUBSTANCES MINÉRALES

Patrice CAUMARTIN  
Michel JÉBRAK  
Christian POLAK  
Véronique TOURNIS

• SECTION ÉNERGIE

Jean-Jacques JARRIGE  
Alain MASCLE  
Valérie VÉDRENNE

• SECTION ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE

Christian BECK  
Roselyne FRIEDENBERG  
Didier NECTOUX  
Cyril SCHAMPER

MISE EN PAGE ET COUVERTURE :  
COM'IN - 45000 ORLEANS

*Géologues est la revue officielle de la  
Société Géologique de France.*

*Géosciences Appliquées.*

*Association loi de 1901, fondée en 1830  
et reconnue d'utilité publique par  
Ordonnance du Roi du 3 avril 1832.*

SIÈGE SOCIAL :

77, rue Claude Bernard - 75005 PARIS

Téléphone : 01 43 31 77 35

Télécopie : 01 45 35 79 10

E mail : [accueil@geosoc.fr](mailto:accueil@geosoc.fr)

Site Internet : [www.geosoc.fr](http://www.geosoc.fr)

Imprimé en France par  
CHEVILLON IMPRIMEUR  
89101 SENS

Commission paritaire

CPPAP n°0120G82626

Tirage : 700 exemplaires

Dépôt légal à parution



Marc Blaizot<sup>1</sup>,  
Rédacteur en chef  
de « Géologues »



Aline Quenez<sup>2</sup>,  
(CFGJ)<sup>3</sup>



Jean Sulem<sup>4</sup>,  
(CFMR)<sup>5</sup>

Ce numéro sur les stockages souterrains est particulièrement d'actualité puisque ce type de solutions et/ou problématiques fait désormais régulièrement la une des journaux non seulement scientifiques mais aussi grand public. Le stockage est bien sûr connu depuis, au moins, le ... Néolithique et les premières sédentarisation, marquées par de profondes mutations peut-être plus profondes encore que les transitions que nous vivons aujourd'hui et qui sont principalement la conséquence de l'augmentation démographique humaine récente.

Du fait des nombreux facteurs corrélés à cette croissance exponentielle de la démographie (besoins énergétiques, conflits d'usage pour l'espace terrestre et marin, congestion des réseaux de transport en particulier automobile, urbanisme échevelé, besoins en eaux, génération extraordinaire de déchets de toutes sortes) associés à la volatilité des prix du marché des matières premières, le stockage devient une nécessité de plus en plus impérieuse. Parmi les solutions existantes, **le stockage souterrain possède de nombreux atouts** parmi lesquels, la possibilité de stocker de grandes quantités de ressources, une emprise limitée en surface, un confinement en principe maîtrisable d'où une meilleure sécurité pour l'homme et l'environnement. Les techniques de stockage des hydrocarbures dans le sous-sol sont déjà bien développées. Aujourd'hui ou dans un futur plus ou moins proche, les stockages d'autres produits, énergies (hydrogène ou air comprimé), eau (transfert d'énergie par pompage et stockage d'eau chaude/froide), déchets (radioactifs ou déblais d'aménagements, CO<sub>2</sub> après captage industriel) sont effectifs, en phase pilote ou en cours d'étude. **Et bien sûr, s'agissant d'interactions avec la subsurface, la géologie est toujours au cœur de ces projets de plus en plus nombreux et qui montrent une nouvelle fois, l'impact des sciences de la Terre et des matériaux sur notre futur.**

Cela nécessite, dans des gammes de profondeur et des domaines lithologiques variés, l'aménagement ou la réalisation de cavités (par creusement, lessivage ou par reconversion d'anciens vides souterrains, mines ou carrières) ou l'utilisation d'aquifères profonds ou de gisements d'hydrocarbures déplétés. Le recours à chacun de ces types de stockage dépend à la fois, des besoins (aussi bien régionaux que nationaux et sur des périodes de temps très variables qui, pour certains stockages, se mesurent en siècles, voire en millénaires) aussi bien que des caractéristiques géologiques du sous-sol : présence de sel ou d'argiles imperméables et plastiques, de roches dures, de réservoirs profonds, de failles ou fissures... Les géologues, hydrogéologues, géotechniciens, géochimistes et géophysiciens sont donc en première ligne **pour déterminer et caractériser ces lieux de stockages, pour les réaliser, en assurer l'exploitation, la surveillance et la sécurité, en particulier en maîtriser l'étanchéité.** En effet, il faudra, à chaque fois, surmonter des défis liés notamment aux risques géologiques et technologiques mais surtout aux impacts environnementaux et sociétaux spécifiques.

Le coût de réalisation et d'exploitation d'un stockage souterrain est également un élément important du fait des équipements de surface et souterrains nécessaires. Ces coûts devraient cependant diminuer progressivement au fur et à mesure des réalisations et de l'augmentation consécutive de la demande. C'est l'ensemble de ces problématiques, géologiques en premier lieu, qui vous sont décrites dans ce numéro, pour lequel entreprises, organismes de recherche et universités ont largement collaboré : que tous les auteurs en soient remerciés car ils ont fait œuvre didactique pour présenter en grande transparence, **les dernières avancées de leurs projets et de leur art, mais aussi leurs questionnements et leurs incertitudes.** Bonne lecture à toutes et tous !

1. Courriel : [marc.blaizot@laposte.net](mailto:marc.blaizot@laposte.net)

2. Courriel : [quenez.a@free.fr](mailto:quenez.a@free.fr)

3. Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.

4. Courriel : [jean.sulem@enpc.fr](mailto:jean.sulem@enpc.fr)

5. Comité Français de Mécanique des Roches.

## 4 STOCKAGES SOUTERRAINS : UNE REVUE GÉNÉRALE

Historique et panorama des stockages souterrains actuels en France et dans le monde .....	4
<i>Philippe Gombert et Mehdi Ghoreychi</i>	
Inventaire et cartographie des stockages souterrains d'énergie en France .....	10
<i>Anne Gaëlle Bader</i>	
L'étanchéité des stockages. Le cas des cavernes dans le sel .....	14
<i>Pierre Berest, Benoît Brouard et Arnaud Réveillère</i>	
Le POLE AVENIA, un pôle de compétitivité en soutien aux projets R&D sur le stockage géologique .....	20
<i>Emmanuelle Piron</i>	
FluidSTORY : Stockage souterrain massif et réversible de vecteurs énergétiques fluides (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ) .....	21
<i>Behrooz Bazargan-Sabet</i>	
BIG MAC. Approches microfluidiques pour l'étude de la conversion biogéologique du CO <sub>2</sub> en aquifère profond .....	22
<i>Samuel Marre, Anaïs Cario, Cyrielle Fauveau, Maxence Perroux, Carole Lecoutre, Olivier Nguyen et Yves Garrabos</i>	
Projet SIGARRR : Simulations de l'Impact des Gaz Annexes (SO <sub>x</sub> , N <sub>y</sub> O <sub>x</sub> , O <sub>2</sub> co-injectés avec le CO <sub>2</sub> lors de son stockage géologique) sur la Réactivité des Roches-Réservoirs .....	23
<i>J. Corvisier, E. El Ahmar, C. Coquelet, J. Sterpenich, R. Privat, J.-N. Jaubert, K. Ballerat-Busserolles, J.-Y. Coxam, P. Cézac, F. Contamine, J.-P. Serin, V. Lachet, B. Creton, M. Parmentier, P. Blanc, L. André, L. de Lary, E.C. Gaucher</i>	
Le projet RINGS .....	24
<i>Anthony Ranchou-Peyruse et Pierre Cézac</i>	
« Surveillance CO <sub>2</sub> ». Surveillance, en environnement proche surface, des sites de stockage géologique de CO <sub>2</sub> . Impact environnemental des fuites en contexte de puits .....	25
<i>A. Cerepi, C. Loisy, K. Rhino, B. Garcia, V. Rouchon, O. Le Roux, S. Noirez, Ph. Delaplace, O. Willequet, C. Bertrand, H. Bertin, B. Lavielle, D. Broseta, B. Marsaud, R. Michel</i>	
Géodnergies, un institut de recherche et innovation pour accélérer le déploiement des filières du sous-sol pour la transition énergétique .....	26
<i>Christophe Rigollet</i>	

## 30 STRATÉGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIES

Les stockages souterrains d'énergie dans le contexte de la transition énergétique .....	30
<i>Philippe Gombert, Mehdi Ghoreychi, Franz Lahaie, Romuald Salmon et Alain Thoraval</i>	
Surveillance piézométrique des stockages souterrains de Lussagnet (40) et Izaute (32) .....	38
<i>Gaëtan Chevalier-Lemire et Pierre Chiquet</i>	
Les cavités minées : historique et évolution d'un concept de stockage d'hydrocarbures en souterrain .....	42
<i>Phillipe Vaskou</i>	

L'optimisation des stockages de gaz en cavité saline par modélisation thermodynamique .....	46
<i>Louis Londe, Mehdi Karimi-Jafari</i>	
Le stockage dynamique par changement d'état : la grande et la petite histoire du projet GEB ? .....	50
<i>Antoine Jeannou</i>	
Le stockage souterrain d'air comprimé et d'hydrogène .....	54
<i>Louis Londe et Arnaud Réveillère</i>	
Sélection d'un site et conception d'un stockage expérimental d'énergie thermique en carrière souterraine abandonnée en Picardie (Hauts-de-France) .....	58
<i>Philippe Gombert, Abdoulaye Gueye, Lionel Guillemot, Denis Montagne</i>	
Utilisation de mines et carrières pour le développement de systèmes de stockage d'énergie par pompage-turbinage : études hydrogéologiques en Région wallonne .....	66
<i>Angélique Poulain, Pascal Goderniaux, Estanislaio Pujades, Alain Dassargues, Philippe Urban</i>	
Le stockage de chaleur en aquifère profond	
Synthèse des facteurs de performance .....	72
<i>Bernard Bourbiaux</i>	

## 76 STRATÉGIE DE STOCKAGES DU CO<sub>2</sub>

Les principales techniques de captage du CO <sub>2</sub> : opportunités et difficultés .....	76
<i>Régis Farret et Philippe Gombert</i>	
Le stockage de CO <sub>2</sub> de Rouse réalisé lors du pilote de démonstration de captage-stockage de CO <sub>2</sub> de Lacq .....	81
<i>Sylvain Thibeau</i>	
Émissions et stockage géologique du CO <sub>2</sub> en France – le Club CO <sub>2</sub> .....	86
<i>Interview de Didier Bonijoly</i>	
Coupler stockage de CO <sub>2</sub> dissous et géothermie : une nouvelle opportunité pour améliorer le bilan carbone des petits émetteurs industriels .....	89
<i>Christophe Kervévan</i>	

## 96 STRATÉGIE DE STOCKAGE DE DÉCHETS

Les stockages géologiques de déchets radioactifs : le projet CIGEO en France et ceux des autres pays .....	96
<i>Emilia Huret</i>	
L'évolution chimique des stockages de déchets radioactifs : apport des modèles numériques .....	101
<i>Benoît Cochevin et Isabelle Munier</i>	
Déstockage partiel du stockage souterrain de StocaMine .....	106
<i>Milko Haddad</i>	