



**HAL**  
open science

## La dissolution du gypse: quantifier les phénomènes

Xavier Daupley, Farid Laouafa, Joël Billiotte, Michel Quintard

► **To cite this version:**

Xavier Daupley, Farid Laouafa, Joël Billiotte, Michel Quintard. La dissolution du gypse: quantifier les phénomènes. Mines et carrières (Paris), 2015, 229 HS, pp.35-43. hal-03464509

**HAL Id: hal-03464509**

**<https://hal.science/hal-03464509v1>**

Submitted on 3 Dec 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 14658

**To cite this version** : Daupley, Xavier and Laouafa, Farid and Billiotte, Joël and Quintard, Michel *La dissolution du gypse: quantifier les phénomènes*. (2015) Mines & Carrières (n° 229 HS). pp. 35-43. ISSN 0994-2556

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# La dissolution du gypse : quantifier les phénomènes

Le gypse est une ressource minérale de premier plan en France et en particulier en Île-de-France où les importantes masses de gypse que renferme son sous-sol sont exploitées en carrières, à ciel ouvert et en souterrain. Matière première du plâtre, le gypse est une roche évaporitique soluble. Ainsi, dans un contexte naturel ou dans celui d'exploitations, cette spécificité occasionne au contact de l'eau la dissolution de la roche et peut créer, en fonction des configurations, des vides souterrains de dimensions plus ou moins importantes. Récemment, des recherches à l'Ineris en partenariat avec le Centre Géosciences Mines Paris-Tech et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse ont été entreprises afin d'améliorer la connaissance sur les mécanismes de dissolution et de développer des outils de modélisation permettant de quantifier l'évolution spatio-temporelle de systèmes de dissolution dans des environnements variés. Les enjeux qui sous-tendent ces recherches résident dans une meilleure prédiction des mouvements de terrain (et leurs impacts) induits par la dissolution de telles évaporites.

## Contextes et enjeux

Dans le cadre de l'analyse des risques liés à la présence de cavités souterraines, il est nécessaire de connaître ou, au minimum, d'estimer la présence de cavités, leur localisation et leurs formes géométriques. Pour les cavités anthropiques, ces deux para-

mètres (forme et localisation) sont souvent connus ou approchés (par des observations directes ou encore par l'existence de plans). Dans le cas des roches solubles, le caractère évolutif de la dissolution et la connaissance souvent imparfaite du milieu naturel où se met en place le phénomène sont deux

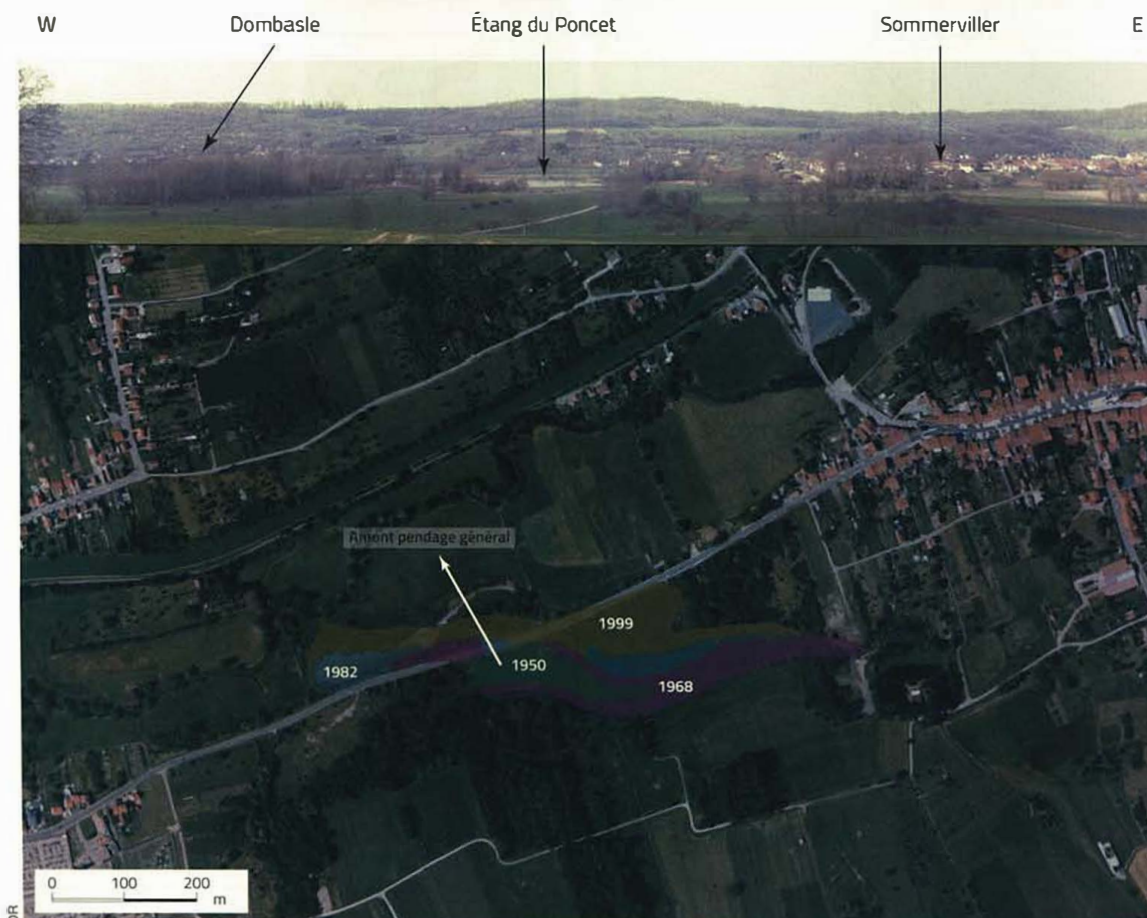
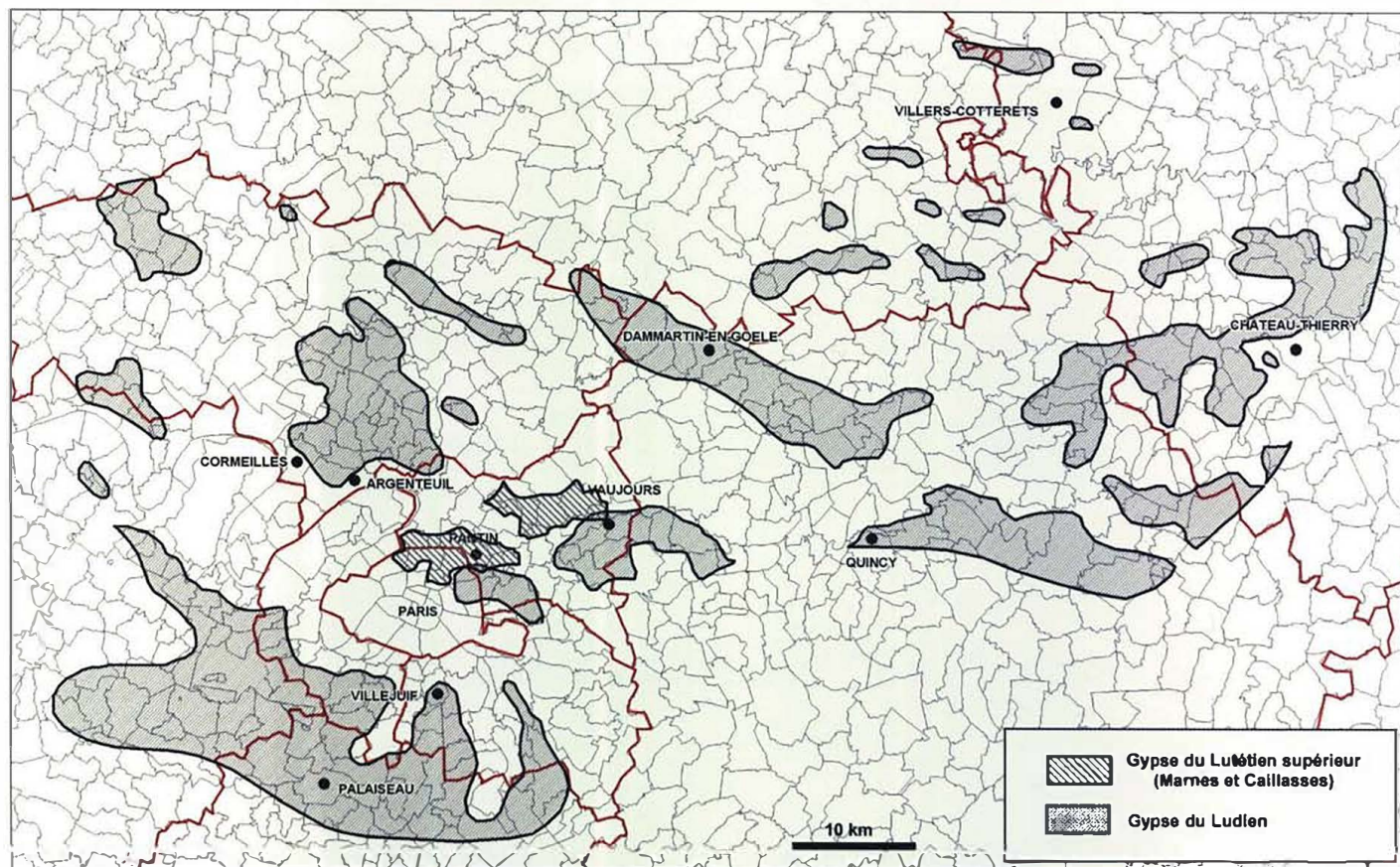


Figure 1 – Évolution de l'extension de l'étang du Poncet dans le bassin salifère de Dombasle au cours des cinquante dernières années déduite de l'interprétation des photographies aériennes (photo en bas). En haut, vue de l'étang du Poncet depuis la colline de Flainval située au sud.

importantes variables supplémentaires. Quel que soit le contexte où la dissolution se développe et la connaissance de la configuration du vide à un instant donné, il est nécessaire d'estimer à quelle vitesse peuvent se créer ou s'agrandir les vides souterrains et dans quelle direction ils sont susceptibles de se propager. Dans un contexte naturel et pour des matériaux solubles à cinétique de dissolution relativement rapide, comme l'halite par exemple, la vitesse d'évolution et le développement du front de dissolution peuvent prendre des proportions importantes avec des effets visibles à court terme (figure 1). L'intérêt de disposer d'outils permettant de quantifier dans le temps et dans l'espace l'évolution d'un tel système de dissolution s'avère indispensable, notamment lorsque des enjeux peuvent être concernés. Concernant le gypse, des phénomènes de dissolution naturelle sont rencontrés au sein des formations éocènes d'Île-de-France (figure 2) ou encore dans les terrains triasiques de la ceinture alpine et préalpine (Isère, Savoie et Haute-Savoie, Alpes-Maritimes). Dans ces contextes, des mouvements de terrain lents et progressifs peuvent être observés mais, plus fréquemment, ce sont des effondrements localisés de type « fontis » qui sont rencontrés. Le caractère brutal et soudain d'apparition de ces derniers constitue une difficulté supplémentaire en termes de prévention des risques, en particulier dans des contextes très urbains comme celui de l'Île-de-France. Plusieurs désordres parfois spectaculaires résultant de la rupture au droit des cavités issues de la dissolution dans le gypse présent dans la formation des

Marnes et Caillasses (Lutétien) sont apparus à Paris et en proche banlieue au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Aubervilliers, Sevran, Porte de la Chapelle, Paris rue Réaumur et Gare de l'Est). Il semble admis que ces événements ont été fortement influencés par des écoulements d'eau liés aux pompages industriels ainsi qu'à des rabattements de nappe consécutifs aux grands travaux souterrains (Toulemont, 1981, 1987). On citera également le cas de la cavité découverte lors de reconnaissances géologiques pour le passage en souterrain des lignes de banlieue de la Gare-du-Nord (figure 3). Sa formation serait attribuée au pompage exercé pendant plus d'un siècle dans la nappe pour l'alimentation en eau des locomotives à vapeur (Labbé et Duffaut, 2006). On citera enfin des fontis plus récents, apparus à Sevran et Villepinte en Seine-Saint-Denis, résultant de la rupture de cavités de dissolution dans les gypses des Marnes et Caillasses du Lutétien ou encore de celles des masses de gypses résiduelles du Bartonien (Ludien). Ceci indique, qu'en dehors de sollicitations anthropiques significatives tels que des pompages industriels, des systèmes de dissolution apparaissent toujours actifs en Île-de-France. Le cas du Bois de la Tussion à Villepinte en est un bon exemple (Charmoille et al, dans ce numéro, Charmoille al, 2012). Il demeure aujourd'hui cependant une grande incertitude sur la vitesse à laquelle ces systèmes se développent, créent ou agrandissent des vides souterrains qui occasionneront d'éventuels désordres en surface du sol. Autrement dit, dans les cas précités, sommes nous en présence de cavités qui se sont déve-

Figure 2 –  
Périmètres exposés  
au risque de dissolution  
du gypse du Lutétien supérieur  
(d'après Jourdan, 1976  
et Toulemont 1987)  
et extension du gisement  
gypseux du Ludien.



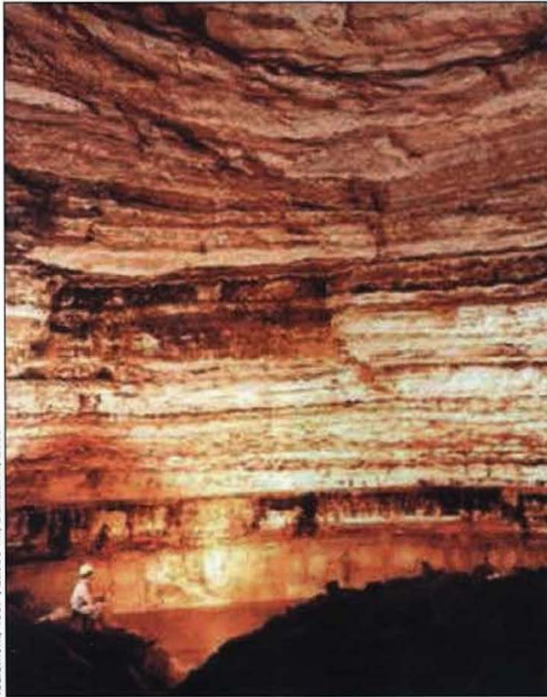


Figure 3 –  
Vue de la cavité  
de la Gare du Nord  
découverte en 1975  
et interprétation  
de son évolution.

loppées à court terme ou alors à très long terme (i.e. sur des durées qui dépassent largement celles des sollicitations anthropiques). Dans le premier cas, c'est la dissolution qui a permis de créer des cavités suffisamment grandes pour être instables dans un temps relativement court. Dans le second cas, les sollicitations récentes ont eu seulement pour effet de déstabiliser la cavité qui était déjà proche de sa limite de stabilité mécanique. Cette déstabilisation est alors liée à une évolution modérée par dissolution de la géométrie de la cavité et/ou à la modification de l'état de contrainte imposé par la sollicitation anthropique (rabattement significatif de la nappe par exemple).

Afin de répondre aux questions scientifiques posées nous donnons et illustrons ci-après quelques exemples de résultats permettant d'éclaircir cette réflexion sur les facteurs prépondérants qui conditionnent l'évolution des systèmes de dissolution.

### Détermination des cinétiques de dissolution

Les travaux portant sur la caractérisation de la dissolution du gypse ont été réalisés au Centre de Géosciences de Mines ParisTech à Fontainebleau sur des matériaux prélevés dans la 3<sup>e</sup> masse de gypse (Bartonien) dans les carrières de Vaujours et Baillet-en-France.

Le gypse est un minéral (dihydrate de sulfate de calcium) moyennement soluble. Sa solubilité varie avec la température et présente un optimum à 40 °C (2,67 g/l). Entre 0 et 20 °C, elle varie quasi linéairement (de 2,15 à 2,53 g/l). La dissolution du minéral produit à la fois des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  qui vont modifier la composition de la solution dont l'influence est souvent négligée. Comme, à l'équilibre chimique, la composition de la solution est déterminée par ses concentrations ioniques en calcium et sulfate, la solubilité est alors souvent exprimée en moles ou en masse de sulfate de calcium dissout.

Hormis la température, d'autres facteurs peuvent influencer la solubilité du gypse (salinité, pH,  $\text{pCO}_2$ ). La salinité a une influence directe sur la solubilité du gypse. Ainsi mis en contact avec une eau saturée en chlorure de sodium, la solubilité du gypse augmente de 250 % ; cette augmentation est d'environ 100 % pour une eau ayant la même salinité que l'eau de mer. Le pH et la pression partielle de  $\text{CO}_2$ , en augmentant la dissolution de la calcite vont influencer indirectement celle du gypse du fait de la variation induite sur la concentration en calcium de la solution.

La dissolution d'une roche soluble se caractérise par un taux de dissolution exprimant la quantité de masse mise en solution par unité de temps et de surface de contact avec le fluide. Son unité usuelle est  $\text{g/m}^2/\text{s}$  ( $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ ). Ainsi, à la température de 20 °C, le taux de dissolution du sel gemme dans de l'eau pure est d'environ 3  $\text{g/m}^2/\text{s}$ . En introduisant la masse volumique de la roche ( $\text{g/m}^3$ ), le taux de dissolution s'exprime alors en m/s, mais l'unité usuelle est  $\mu\text{m/s}$  afin de conserver une valeur proche de l'unité : soit 1,4  $\mu\text{m/s}$  dans le cas du sel gemme. Comme son unité est identique à celle d'une vitesse, il est alors dénommé taux ou vitesse de récession.

Le taux de dissolution est fonction de la concentration de la solution. Sa valeur est d'autant plus faible que la concentration de la solution en ions issus de la roche dissoute est importante et elle est nulle pour une concentration correspondant à la solubilité de la roche. Dans les cas les plus simples, le sel gemme par exemple, le taux de dissolution,  $\tau$ , s'exprime par un modèle de cinétique du premier ordre. Pour s'affranchir de l'unité de la concentration (mol/l, kg/l ou kg/kg), ce modèle utilise la concentration relative,  $C_{rel}$  :

$$\tau(C_{rel}) = \tau_0(1 - C_{rel}) \quad (1)$$

avec :

- $C_{rel}$  la concentration relative égale à  $C/C_{sat}$  [sans unité] ;
- $C_{sat}$  la concentration de la solution en roche dissoute à la limite de solubilité ;
- $\tau_0$  le taux de dissolution de la roche dans l'eau pure [g/m<sup>2</sup>/s].

Dans le cas du gypse, les constantes de dissolution au niveau de l'interface solide-solution et celles du transport des espèces en solution sont peu différentes, aussi le taux effectif de dissolution du gypse est très souvent décrit avec un modèle de cinétique mixte réaction-transport (Jescke & al. 2001), sous la forme :

$$\tau(C_{rel}) = \tau_0(1 - C_{rel})^n \quad (2)$$

avec  $n$  un exposant supérieur à l'unité ;

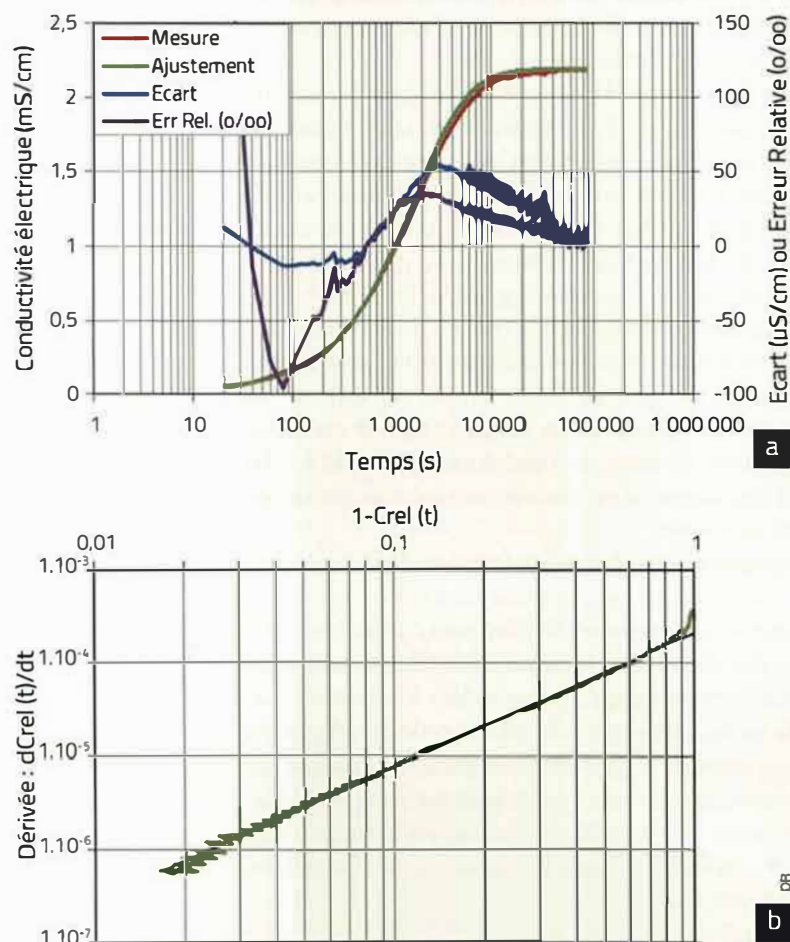
Il s'en suit que les valeurs effectives du taux de dissolution sont très dépendantes des conditions locales et globales de l'écoulement de la solution par rapport au minéral. En l'absence d'un formalisme rigoureux, seule une approche expérimentale permet de caractériser la cinétique de dissolution d'un gypse.

L'étude expérimentale réalisée a été conduite avec des échantillons prélevés dans les carrières souterraines de gypse (sur les sites d'exploitation en carrière souterraine de Placoplatre à Vaujours et Baillet-en-France). Il s'agit de gypses saccharoïdes faiblement poreux (2 à 5 %) et contenant plus de 97 % de gypse ; le complément étant des insolubles (1 à 3 %) : calcite, quartz et argiles.

Figure 4 – Évolution de la conductivité électrique en fonction du temps et méthodes d'interprétation (gypse de Vaujours)

a : Interprétation utilisant un ajustement

b : Interprétation utilisant la dérivée



Pour caractériser la dissolution, il a d'abord été utilisé une méthode gravimétrique qui consiste à mesurer la perte de masse d'échantillons immergés dans une solution de concentration connue pendant une durée connue. La valeur du rapport de la perte de masse sur la durée d'immersion divisée par la surface de l'échantillon donne une bonne approximation du taux de dissolution à la concentration de la solution. Cette méthodologie (Barton & al. 1971) a été utilisée avec des disques polis de 50 mm de diamètre immergés dans de l'eau pure et tournant à la vitesse de 50 tr/min afin d'obtenir des conditions locales d'écoulement parfaitement contrôlées. Malgré l'utilisation d'un volume de solution égal à 4 litres, la durée d'immersion était limitée à 60 minutes afin que la variation relative de la concentration de la solution soit inférieure à 3 %. Pour une solution d'eau pure et à la température de 21 °C, la valeur déterminée du taux de dissolution a été estimée à  $33 \pm 3$  mg/m<sup>2</sup>/s qui correspond à une vitesse de récession égale à  $1,4 \cdot 10^{-2}$  μm/s (avec une densité du gypse égale à  $2,35 \cdot 10^6$  g/m<sup>3</sup>).

Cette méthode simple s'est avérée en fait très lourde car il est nécessaire de sécher, à faible température, les échantillons après chaque immersion afin d'éliminer l'influence de la solution absorbée par capillarité dans la porosité. Il lui a donc été préféré une méthode indirecte consistant à mesurer en continu l'évolution de la composition de la solution par conductivité électrique (Raines & al, 1997). En raison de la faible teneur en insolubles, l'évolution de la conductivité est proportionnelle à celle de la concentration de la solution au contact du gypse. Les mesures ont été effectuées avec un bécher contenant initialement de l'eau pure (de 50 à 100 ml) dans lequel était plongé un petit bloc de gypse d'une masse (de 10 à 30 g environ) et d'une surface en contact avec la solution connue. Une agitation, peu importante, est nécessaire pour assurer une homogénéisation de la concentration dans le bécher.

Comme pour la concentration, il est possible de définir une conductivité relative,  $\sigma_{rel}$ , égale au rapport de la conductivité mesurée et de celle d'une solution saturée en gypse et dont la valeur est aussi égale à celle de la concentration relative. L'évolution de la conductivité dans le bécher est définie par la relation :

$$\frac{d\sigma_{rel}(t)}{dt} = \frac{S}{V} \frac{1}{C_{sat}} \tau_0 (1 - \sigma_{rel}(t))^n = a (1 - \sigma_{rel}(t))^n \quad (3)$$

avec :

- $V$  le volume de la solution dans laquelle est immergé l'échantillon de gypse ;
  - $S$  la surface de gypse en contact avec la solution.
- A partir de la courbe d'évolution de la conductivité relative dans le bécher et des valeurs des grandeurs  $S$  et  $V$ , il est possible de déterminer celles de l'exposant  $n$  et de  $\tau_0$  de la loi cinétique (figure 4).

L'interprétation utilisant un ajustement a fourni le jeu de valeurs suivant :

$C_{\text{sat}} = 2,19 \text{ g/l}$ ,  $\tau_0 = 46 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ ,  $n = 1,39$   
 Tandis que celle utilisant la dérivée a fourni :

$C_{\text{sat}} = 2,21 \text{ g/L}$ ,  $\tau_0 = 39 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ ,  $n = 1,32$   
 Les valeurs du taux initial déterminées par cette méthode se situent dans l'intervalle 40-45  $\text{mg/m}^2/\text{s}$ , à comparer à celle de 33  $\text{mg/m}^2/\text{s}$  obtenue par la méthode des pesées.

Pour des conditions expérimentales données, la **figure 5** présente l'évolution de la concentration relative en fonction du temps pour le gypse avec les paramètres déduits des courbes ci-dessus et celle qui aurait été mesurée avec du sel gemme. La valeur de l'exposant, 1,35 environ, de la cinétique mixte implique que le temps nécessaire pour atteindre la saturation est beaucoup plus long dans le cas du gypse que dans celui du sel gemme. Par contre pour les temps courts, c'est-à-dire avec une eau pure ou peu saturée, les deux courbes ont une évolution similaire et donc pour ces deux roches les quantités mises en solution diffèrent surtout en raison de leur différence de solubilité, mais pas leur cinétique relative.

### Modélisation de la dissolution

La dissolution se traduit par un transport de masse et la création de vide au sein du milieu. Nous nous sommes principalement intéressés au lessivage qui correspond à une dissolution de surface plus qu'à une dissolution matricielle qui, elle, affecte la matrice du solide poreux.

### Formalismes et modèles numériques

La modélisation numérique de l'évolution spatio-temporelle de la géométrie des cavités formées par dissolution est complexe. Les processus physico-chimiques en présence sont nombreux et interagissent. Le problème est multi-échelles et multi-physiques. Les réactions chimiques sont régies par les lois d'équilibre définies dans le cadre de la thermodynamique et de la cinétique chimique. La dissolution étant conditionnée par la nature du fluide, il est nécessaire de reproduire correctement la concentration des espèces et son évolution au sein du fluide. Il est donc indispensable de décrire précisément les écoulements et le transport des espèces dissoutes dans le milieu. Le principal défi scientifique relatif à la formalisation du problème, réside dans la prise en compte simultanément des couplages thermo-hydro-chimiques et l'évolution de la géométrie du domaine. Nous avons étudié des systèmes bi-phases (fluide-solide) (Luo et al., 2012) et des systèmes triphasiques (gaz-liquide-solide) (Luo et al., 2014).

Le formalisme mathématique de la dissolution est basé sur une approche thermodynamique, contrôlée par la condition d'équilibre à la surface. Le passage d'une description microscopique (échelle du pore) à une description macroscopique (échelle d'un certain volume) de milieu poreux intégrant un grand nombre de pores s'effectue par homogénéisation (théorie de la moyenne). La résolution du problème de transport avec évolution de l'interface

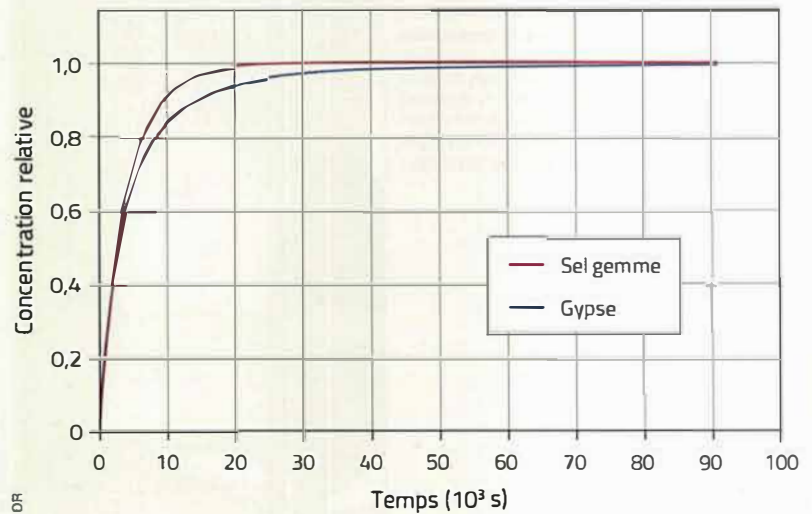


Figure 5 - Comparaison de l'évolution de la concentration relative du gypse B et du sel gemme.

a été traitée en utilisant deux méthodes d'interface : franche (Arbitrary Lagrangian Eulerian) et diffuse (Diffuse Interface Method). La prise en compte des effets densitaires induits par la dissolution crée des instabilités hydrodynamiques (instabilités de Rayleigh) et sont reproduites précisément par notre modèle.

Pour optimiser le temps de calcul, une méthode de raffinement adaptatif du maillage a été développée. La méthode de champ de phase introduite il y a une vingtaine d'années pour décrire la solidification de mélanges polyphasiques permet de s'affranchir de la difficulté du suivi du front de dissolution, en créant une interface spatialement diffuse d'épaisseur finie. On passe alors d'un modèle discontinu à un modèle continu. L'interface diffuse est créée par l'intermédiaire de variables scalaires (variable de champ de phase, ici la porosité  $\xi_\beta$ ). Cette variable est constante dans la zone solide et décroît rapidement au sein de l'interface. Cette approche est capable de modéliser l'évolution de morphologies arbitraires et de microstructures complexes.

### Exemples d'application

Les figures présentées ci-après montrent quelques modes de dissolution en 3D. S'agissant de configurations simplifiées de cas réels de dissolution, on retiendra les ordres de grandeurs des temps de dissolution et les tendances d'évolution spatiale des cavités. Les configurations présentées correspondent à :

- un cas de dissolution d'un pilier de gypse ennoyé d'une carrière souterraine avec écoulement du fluide de dissolution ;
- un cas de dissolution d'une lentille de gypse se situant dans un milieu poreux saturé avec écoulement de l'eau ;
- une comparaison des cinétiques et des géométries pour deux évaporites (gypse et sel) soumises aux mêmes conditions hydrodynamiques.

Ce « catalogue » de cas de dissolution montre les potentialités de notre approche numérique à décrire des dissolutions ayant des cinétiques différentes mais également des configurations très différentes.

Figure 6 – Vues d'un même pilier dans la carrière abandonnée de Rocquevaire (Bouches-du-Rhône) avec deux niveaux d'envoyage différent (en 1996 à droite et en 2010 ci-dessous). Les observations faites depuis une vingtaine d'années ne montrent pas d'évolutions significatives liées à la dissolution.



#### Cas d'un pilier de gypse dans une carrière

L'exploitation du gypse en carrière souterraine est réalisée, le plus souvent, par des méthodes d'exploitation partielle de type chambres et piliers. Dans le contexte de l'abandon de ces exploitations, sur le long terme, se pose la question de la dissolution des piliers si ceux-ci se trouvent au contact de l'eau de façon permanente ou transitoire. Ceci est illustré par les photos de la figure 6 prises dans la carrière abandonnée de Rocquevaire (Bouches-du-Rhône). Plusieurs effondrements en masse sont apparus dans les années 1990, le dernier ayant eu lieu en 2005. Ces effondrements sont principalement liés au dimensionnement de l'exploitation (notamment l'élançement des piliers). L'envoyage progressif d'une partie des vides souterrains a mis en contact les piliers avec une eau dont le taux de renouvellement est très faible. L'eau d'envoyage est saturée en gypse et aucune évolution significative liée à la dissolution n'a été observée depuis une vingtaine d'années. Dans un cas comme celui-ci ou dans d'autres cas similaires, se pose la question de ce que pourrait être l'évolution de la géométrie des piliers si une dissolution active se mettait en place.

Les simulations présentées ci-après illustrent, pour un cas similaire à celui de Rocquevaire, l'effet de la dissolution sur un pilier (de dimension 5 x 5 x 5 m) de gypse lorsqu'une eau pure circule en continu et à son contact (figure 7). Dans ce cas, le pilier est entièrement noyé et le fluide circule à une vitesse de  $10^{-6}$  m/s ( $1 \mu\text{m/s}$ ). Sur une période de temps similaire aux

observations faites à Rocquevaire, on voit ici l'importance des conditions hydrodynamiques et de la nature du fluide pour qu'une dissolution significative du pilier soit effective. Ici, avec une vitesse de fluide faible, comparable à un écoulement dans un milieu semi-perméable, c'est la mise en contact permanente d'une eau douce avec le gypse qui conditionne la vitesse de dissolution du pilier.

L'écoulement se fait entre deux horizons supposés imperméables. On observe la symétrie de la dissolution qui montre que le gradient densitaire est si faible qu'il ne dissymétrise pas (par rapport à un plan horizontal) la dissolution. On observe comme attendu une dissolution plus prononcée à l'amont et quasi-nulle à l'aval du pilier.

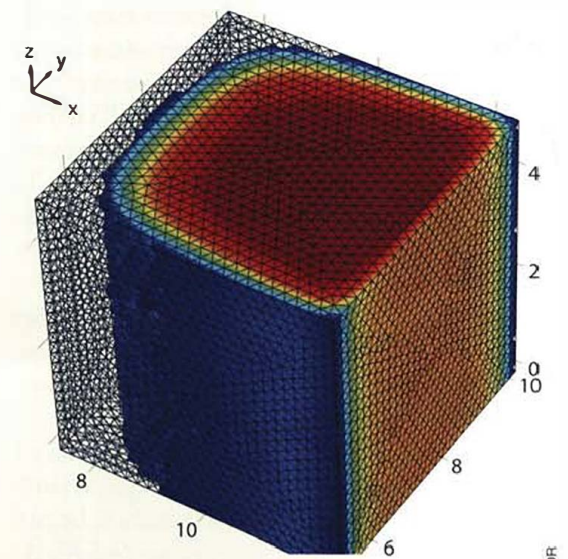
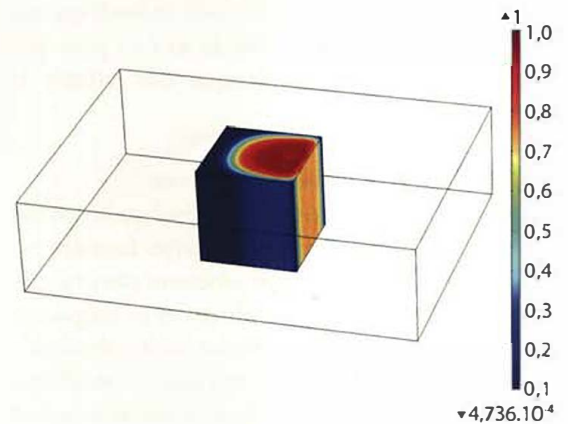
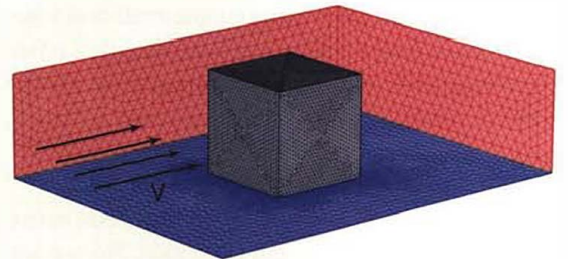


Figure 7 – Dissolution d'un pilier de carrière envoyée de gypse. État après 30 ans d'une dissolution entretenue par l'écoulement d'une eau pure (vitesse  $V = 10^{-6}$  m/s) (dimensions 5 x 5 x 5 m). De gauche à droite, configuration du système pilier-écoulement, isovaleurs de la saturation en gypse et représentation 3D du pilier dissous.



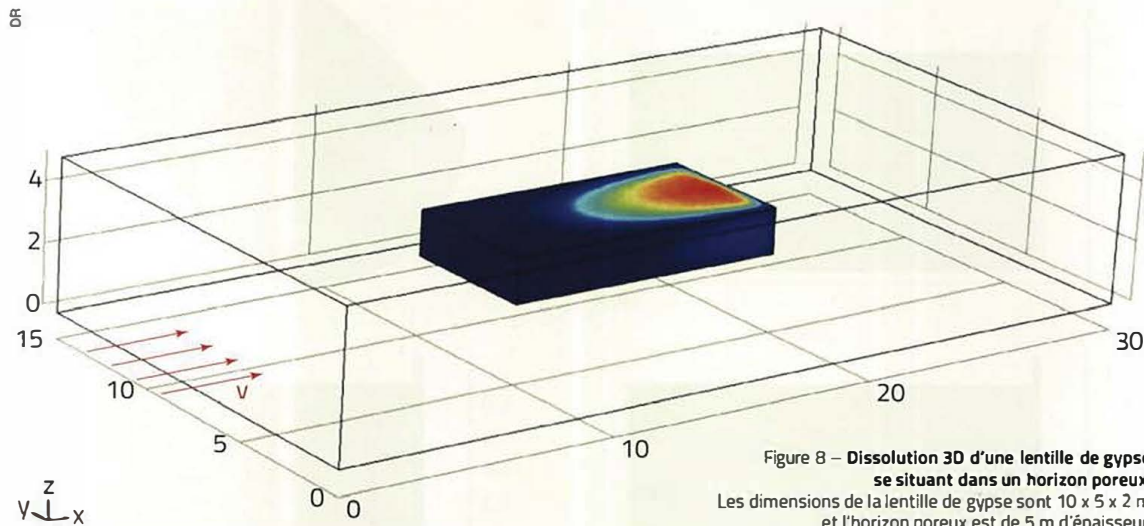


Figure 8 – Dissolution 3D d'une lentille de gypse se situant dans un horizon poreux. Les dimensions de la lentille de gypse sont 10 x 5 x 2 m et l'horizon poreux est de 5 m d'épaisseur. La dissolution est entretenue par l'écoulement (vitesse  $V = 10^{-6}$  m/s)

### Lentille de gypse

Les simulations présentées ci-après illustrent le cas d'une lentille de gypse soumise à un écoulement d'une eau pure à son pourtour, dans la matrice poreuse des terrains encaissants. Cette situation peut se rapprocher des conditions géologiques rencontrées dans la formation des Marnes et Caillasses du Lutétien en Île-de-France. Là encore, la vitesse du fluide imposée est caractéristique d'écoulement dans un milieu semi-perméable (faible perméabilité). La vitesse de dissolution est principalement contrôlée par la mise en contact permanente d'une eau douce avec le gypse.

Les figures 8, 9 et 10 montrent respectivement, la localisation de la lentille de gypse située dans une

couche poreuse et la nature de l'écoulement, le maillage utilisé dans nos modélisations et enfin trois formes de la lentille à trois instants différents.

Le problème étant symétrique avec mur et toit imperméables, on n'a retenu qu'un demi modèle (figure 9).

La figure 10 montre la reconstruction (par symétrie) de la forme de la lentille de gypse initialement parallélépipédique (10 x 5 x 2 m) à trois instants (3, 15 et 30 ans).

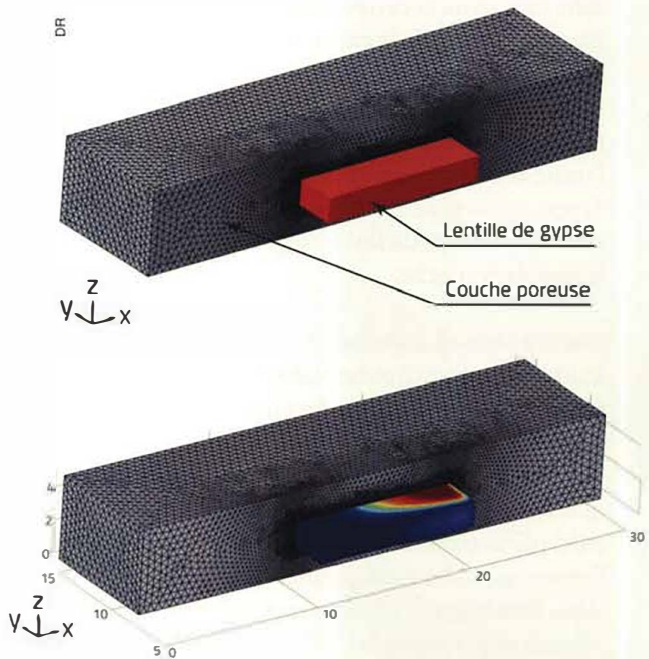


Figure 9 – Pour des raisons de symétrie par rapport au plan vertical médian, seul 1/2 modèle (partie maillée) est considéré (figure du haut). La figure (du bas) représente le maillage (domaine d'étude) et la localisation de la lentille. La couleur bleue correspond au gypse dissous et le rouge au gypse encore intact. État après 30 ans d'écoulement.

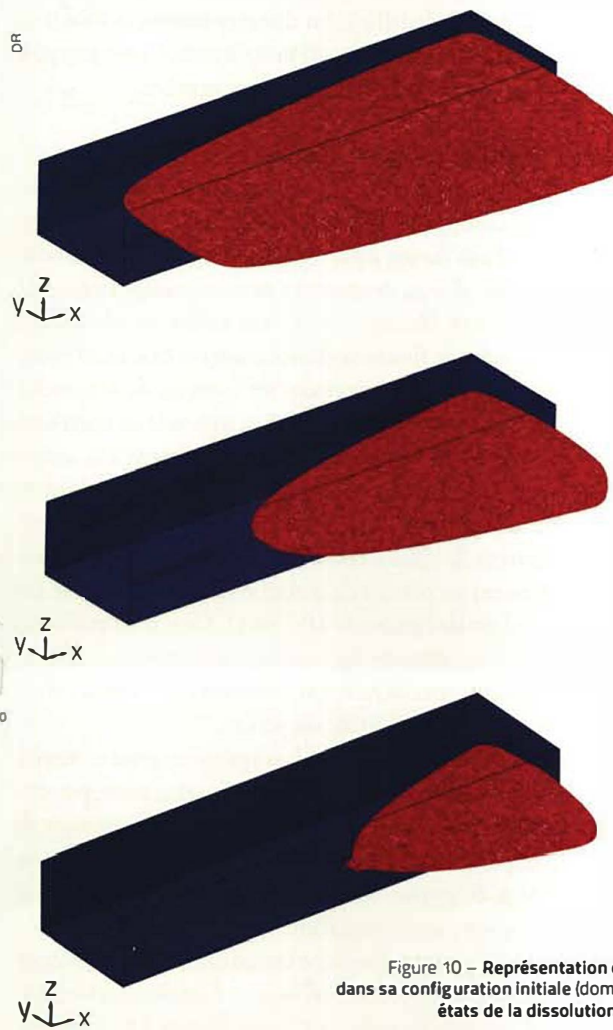


Figure 10 – Représentation de la lentille de gypse dans sa configuration initiale (domaine maillé en bleu) et états de la dissolution successifs (en rouge) à 3, 15 et 30 ans.

Figure 11 –  
Gypse : demi-vues en plan  
de la cavité (bordeaux)  
et en 3D (symétrie de révolution)  
après 3 ans d'injection  
d'une eau pure  
à la vitesse de 8 cm/s  
(hauteur de la couche  
de 6,6 m).

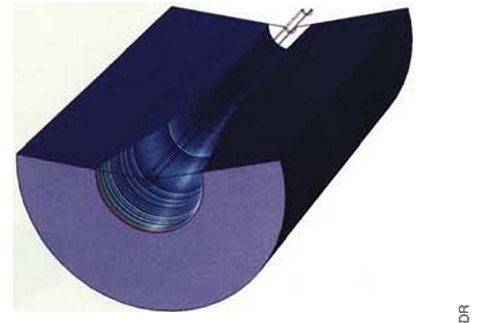
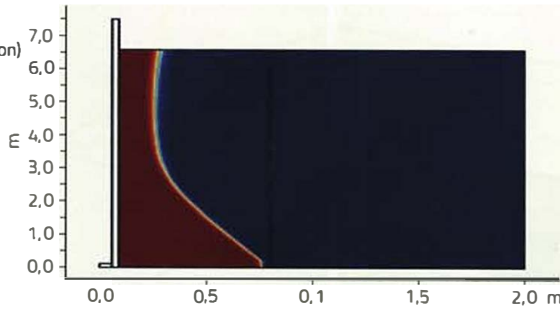
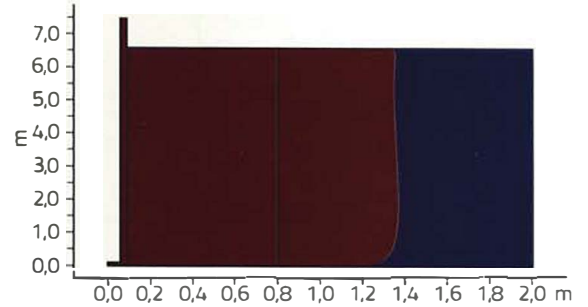
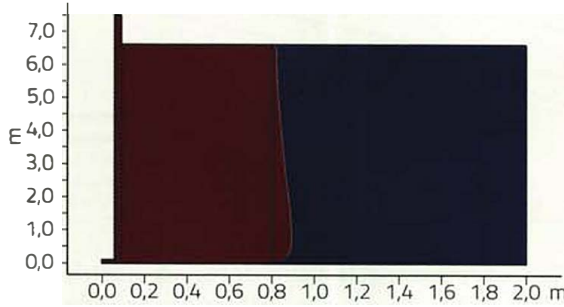


Figure 12 –  
Sel : demi-vues en plan  
de la cavité ( bordeaux)  
(symétrie de révolution)  
obtenues après 4 jours  
(à gauche)  
et 12 jours (à droite)  
(hauteur de la couche  
d'environ 6,6 m)



On observera la vitesse de récession de la lentille et donc de la formation de la cavité. Le taux d'accroissement de la cavité semble relativement plus élevé que celui du taux de diminution du pilier. Deux différences remarquables entre ces deux modèles sont à préciser. La première concerne l'épaisseur du pilier et celle de la lentille (deux fois plus faible). La deuxième, plus importante, concerne le nombre de faces "latérales" léchées par le fluide (3 pour le pilier et 5 pour la lentille). En d'autres termes la valeur de la surface réactive est, en proportion, beaucoup plus grande pour la lentille que pour le pilier.

#### Comparaison gypse-halite

Les représentations suivantes correspondent à des simulations de dissolution provoquée par une injection d'eau douce à partir d'un forage dans une roche soluble. Deux évaporites ont été considérées, du gypse et de l'halite. L'injection s'effectue à la base de la couche, le fluide de dissolution est évacué à l'extrados du forage d'injection, au sommet de la couche. La vitesse du fluide d'injection imposée en entrée est ici élevée ( $8 \cdot 10^{-2}$  m/s) comparativement aux autres configurations étudiées ( $10^{-6}$  m/s). Cependant, le fluide circulant dans une cavité s'agrandissant continuellement, la vitesse réelle du fluide décroît considérablement au niveau de la roche soluble (la vitesse à la paroi est de l'ordre de  $10^{-7}$  m/s). Ceci n'est pas le cas pour les autres configurations où la vitesse du fluide imposée est relativement constante à la surface de la masse soluble (lentille ou pilier).

Cette configuration est classiquement mise en œuvre dans le contexte d'exploitation de sel gemme par dissolution (lessivage de cavités). Il est ici intéressant de comparer avec une situation d'injection dans une masse de gypse, simulant par exemple, l'effet d'un pompage continu ou d'une fuite d'eau à fort débit.

Dans le cas du gypse, une cavité dont le rayon moyen reste très largement inférieur à 1 m s'est formée sur une période de temps de 3 ans (figure 11). En com-

paraison, quelques jours suffisent pour créer une cavité d'un mètre de rayon dans le sel gemme (figure 12). On retrouve ici un écart en termes de vitesse de dissolution de deux ordres de grandeur environ qui correspond à celui des taux de dissolution obtenus expérimentalement au laboratoire entre le gypse ( $\tau \approx 33$  à  $50$  mg/m<sup>2</sup>/s ou  $1,4 \cdot 10^{-2}$  à  $2,15 \cdot 10^{-2}$  μm/s) et l'halite (3 g/m<sup>2</sup>/s ou  $1,4$  μm/s). Les géométries très contrastées des cavités s'expliquent par le fort différentiel de densité du fluide issu de la dissolution du gypse et du sel gemme. Dans ce dernier cas, il se met en place une circulation complexe du fluide à laquelle se surimpose, au fluide en mouvement lié à l'injection, un écoulement densitaire au sein de la cavité et dont l'effet est plus prononcé à la paroi de la cavité. Ceci a pour effet, dans la configuration étudiée, de « régulariser/verticaliser » la paroi de la cavité. Au contraire, la densité du fluide de dissolution du gypse restant proche de l'unité et relativement homogène dans la cavité, la forme de la cavité reste influencée essentiellement par la circulation du fluide imposée par l'injection à la base de la couche.

#### Discussion et conclusion

Les travaux de recherche réalisés au laboratoire ont permis la détermination des cinétiques de dissolution du gypse dans certaines conditions et la formalisation du phénomène. Cette dernière a permis le développement d'outils numériques (code de calculs) permettant de quantifier dans le temps et dans l'espace, pour des configurations variées, les dissolutions dans le gypse (ou d'autres évaporites comme le sel gemme par exemple).

Au travers des résultats présentés, il est intéressant de retenir les tendances principales et quelques ordres de grandeur relatifs à la dissolution du gypse. On s'appuie d'ailleurs pour cela sur des comparaisons avec le sel gemme (halite), matériaux au sein desquels des cavités peuvent se développer très rapi-

dement. Ceci est d'ailleurs mis à profit pour exploiter industriellement le sel gemme par dissolution.

Au laboratoire, le taux de dissolution du gypse de deux faciès rencontrés en Île-de-France (masses de gypse du Ludien à Vaujours et Baillet-en-France) dans de l'eau pure s'établit entre 30 et 50 mg/m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs sont à comparer au sel gemme pour lequel un taux de deux ordres de grandeur supérieur est généralement mesuré dans des conditions expérimentales similaires. Par ailleurs, la comparaison des lois cinétiques de ces deux matériaux montre que lorsqu'une eau pure ou peu saturée est en contact avec la roche soluble, les cinétiques sont très proches. En d'autres termes, pour ces conditions, l'évolution relative d'une cavité dans ces deux matériaux varie dans un rapport qui est celui de leur solubilité, soit de l'ordre de deux ordres de grandeur ; pour des conditions hydrodynamiques identiques, une cavité dans le gypse se développera cent fois moins vite que dans le sel gemme.

Dans les situations réelles, les problèmes posés sont complexes et très souvent en 3D et l'importance, dans le développement de la dissolution, de la prise en compte des conditions hydrodynamiques, de la nature du fluide et de leur spatialisation nécessite le recours à la modélisation numérique. Les exemples de modélisations présentés montrent les potentialités des approches développées pour quantifier l'évolution spatiale et temporelle de la dissolution dans des environnements variés.

Dans le cas d'un pilier de gypse ou encore d'une lentille de gypse, une évolution significative de la dissolution (i.e supérieur au mètre) n'est visible qu'après quelques années d'écoulement d'une eau douce (pure) constamment renouvelée. Dans le cas de la lentille de gypse, une évolution décimétrique d'une cavité peut être observée après une trentaine d'années. Ces exemples correspondent à des majorants de la dissolution car les conditions imposées ne sont pas réalistes, sauf situations très exceptionnelles. En effet, les fluides circulant au contact de masses solubles se saturent et la vitesse de dissolution au contact de fluides concentrés diminue très fortement si un écoulement n'est pas entretenu.

## Références

- Barton A.-F., Wild N.-M. (1971) Dissolution Rates of Polycrystalline Samples of Gypsum and Orthorhombic Forms of Calcium Sulphate by a Rotating Disc Method -, Trans. Faraday Soc., Vol. 67, p 3590-3597.
- Charmolle A., Lecomte A., Daupley X. (2012) Prévenir les désordres liés à la dissolution des évaporites : une expérience test menée par l'Ineris sur le bois de la Tussion (93). Géologues. Numéro 174, septembre 2012, p.82-86.
- Jeschke A., Vosbeck K., Dreybrodt W. (2001) Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 65, No. 1, p. 27-34.
- Labbe M., Duffaut P. (2006) Contribution du sous-sol au métabolisme urbain. Tunnels et ouvrages souterrains – N° 197 – Sept, Oct. 2006.
- Luo, H., Laouafa, F., Guo, J., Quintard, M. (2014) Numerical modeling of three-phase dissolution of underground cavities using a diffuse interface model. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* DOI 10.1002/nag.2274.
- Luo, H., Quintard, M., Debenest, G., Laouafa, F. (2012) Properties of a diffuse interface model based on a porous medium theory for solid-liquid dissolution problems. *Computational Geosciences* 16(4), p. 913-932.
- Raines M.-A., Dewers T.-A. (1997) Mixed transport-reaction control of gypsum dissolution kinetics in aqueous solutions and initiation of gypsum karst, *Chemical Geology*, Vol. 140, p. 29-48.
- Toulemont M. (1987) Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Prévision en cartographie. *Bull. de liaison P et Ch.*, n° 150/151, réf. 3192, p. 109-116.
- Toulemont M. (1981) Évolution actuelle des massifs gypseux par lessivage. Cas des gypses Lutétiens de la région parisienne, France. *Bulletin de liaison. Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien, France.*

Une situation particulière correspondant à un écoulement forcé au sein d'une cavité a été simulée. Dans ce cas, l'eau douce est injectée avec une vitesse élevée (8 cm/s). Le développement de la cavité reste limité après quelques années. Le rayon de développement de la cavité autour du point d'injection reste très inférieur au mètre. L'effet limité du développement de la cavité est lié au fait que pour un débit (ou une vitesse d'injection) constante, la vitesse réelle du fluide dans la cavité diminue constamment alors que la cavité s'agrandit (inférieure à 10<sup>-7</sup>m/s). La vitesse du fluide au contact de la paroi devient alors très faible. Cette simulation a été réalisée également dans le cas du sel gemme. Les résultats obtenus confirment les conclusions issues des résultats expérimentaux montrant l'écart de deux ordres de grandeur en termes de vitesse d'évolution des cavités.

Au travers de ces quelques résultats présentés, on retiendra que le développement de grandes cavités de dissolution dans le gypse apparaît difficile à envisager sur des durées relativement courtes (quelques années à dizaines d'années) en dehors de situations particulières. A cet égard, les cas décrits par EDF de création de cavités dans le gypse à l'extrados de conduites forcées hydroélectriques peuvent correspondre à ce type de situation exceptionnelle. Dans cette configuration, il est toutefois difficile de faire la part de la dissolution effective de celle d'entraînement des grains de gypse érodés par le fluide en mouvement. Ce facteur est souvent négligé dans l'analyse en retour d'expérience de l'évolution et de l'effondrement des cavités de dissolution dans le gypse.

*Xavier Daupley et Farid Laouafa, Ineris,  
Joël Billiotte, Mines ParisTech  
Michel Quintard, INPT/UPS/CNRS/IMFT  
(Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse)*

## Remerciements

Les auteurs remercient la société Placoplatre pour les facilités accordées pour le prélèvement et l'utilisation du gypse des carrières souterraines de Baillet-en-France et Vaujours.