

# COUPLAGE ENTRE ECOULEMENTS ET DISSOLUTION DANS LES ROCHES CARBONATEES : APPLICATION AUX PHENOMENES DE KARSTIFICATION

Pierre GENTHON<sup>1</sup>, Pierre ADLER<sup>2</sup>, Yannick ANGUI<sup>3</sup>, Guy/CABIOCH<sup>4</sup>, Stéphane  
/CALMANT<sup>4</sup>, Cédric MERCET<sup>3</sup>, Anne ORMOND<sup>1</sup>, Michel RABINOWICZ<sup>1</sup>, Jean Marie  
THOVERT<sup>5</sup>, GERARD VIGNOLES<sup>6</sup>

(1) Obs. Midi Pyrénées, 14 Ave. E. Belin 31400 Toulouse.

(2) IPGP, Géomagnétisme interne, Tour 24-25 2eme et., 4 Pl. Jussieu, Paris

(3) L.E.P.T.-ENSAM, UMR 8508, Espl. des Arts et Métiers, 33405 Talence

(4) IRD, centre de Nouméa, Nlle Calédonie

(5) Univ. Poitiers.

(6) LCTS/UMR5801 3600 Pessac

## INTRODUCTION

Il est notoire que la perméabilité des roches carbonatées est essentiellement acquise par dissolution. Il est connu aussi que les eaux de pluie sont agressives pour un carbonate, et ce d'autant plus qu'elles ont traversé une couche de sol humifère. Par contre très peu d'études existent sur les conditions qui gouvernent la localisation et l'extension des zones de vides. On sait qu'un épisode de karstification suit en général de peu un événement tectonique, que les directions préférentielles du réseau karstique suivent celles des contraintes principales, mais l'ensemble des paramètres et des mécanismes moteurs contraignant la distributions des vides dans un karst développé restent encore à évaluer.

Pourtant les aquifères en milieu karstiques sont vitaux pour l'alimentation en eau des pays péri-méditerranéens. En France l'alimentation d'une ville comme Cahors, par exemple dépend essentiellement de pompages en aquifères karstiques. De plus, la nature très localisée de la porosité dans ces aquifères les rend particulièrement vulnérables en cas de pollutions.

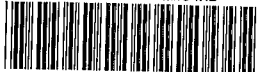
L'approche suivie a constitué à combiner des modélisations avec des observations directes sur site ou sur échantillons. Nous avons privilégiés deux sites complémentaires : l'une est un karst de montagne instrumenté par le CNRS depuis 1968 situé à Moulis (Ariège). Les données de type hydrologiques sont nombreuses, la carte géologique précise existe, et l'accessibilité du site est excellente. Le calcaire y est extrêmement massif, avec une porosité avant karstification uniquement fissurale. Par contre la densité d'affleurement est particulièrement faible.

L'autre site est difficilement accessible puisqu'il qu'il s'agit d'une île de la chaîne des Loyautés, au large de la Nouvelle Calédonie. Par contre puisque île est large de 200 à 500m au maximum et bordée par des falaise de 70 mètres, les condition d'affleurement sont exceptionnelles. Le calcaire corallien qui constitue cet îlot présente une porosité bien distribuée et importante.

## METHODES UTILISEES

Les méthodes utilisées sont celles de la modélisation numérique, en confrontation avec les données de terrain. Nos modélisations sont effectuées à l'échelle de la lame mince, à celle de l'échantillon de laboratoire, ainsi qu'à l'échelle du massif karstifié. Les données sont acquises à l'échelle de l'échantillon géologique par des techniques de porosimétrie au mercure, de traitement d'images sur photos ou images MEB. Des échantillons de grès ainsi que de calcaire corallien sont utilisés pour les modélisations numériques de prise de moyenne au cours de la diffusion et de l'advection d'espèces

Fonds Documentaire IRD



010021531

Fonds Documentaire IRD

Cote : B \* 21531 Ex : 1

12

réactives dans un poreux. A l'échelle du massif karstifié, nous utilisons l'observation directe ainsi que les techniques de la géologie structurale. Nous souhaitons dans ce cas obtenir des paramètres géométriques pour initialiser nos modèles de transport réactif à l'échelle du massif. De plus, sur le site de Moulis nous collaborons avec un projet de géophysique instrumentale pour l'hydrologie, pris en charge par ailleurs par le PNRH.

## RESULTATS OBTENUS ET PERSPECTIVES

### Echelle du pore.

Il s'agit ici de comprendre les processus mis en jeu à l'échelle du pore, d'identifier les paramètres pertinents de la micro-structure, et d'intégrer cette information dans les modèles macroscopiques couplant hydrodynamique et géochimie, en vue de permettre une meilleure modélisation aux échelles supérieures d'intérêt pour la gestion et la maîtrise des ressources en eaux (échelle locale, grandes échelles). Plus particulièrement, il s'agit de développer une approche permettant de mieux décrire la rétro-action de la diagenèse sur les propriétés de transport macroscopiques ; cette partie du couplage étant généralement prise en compte de manière très simplifiée dans les modèles macroscopiques couplant hydrodynamique et géochimie.

La technique retenue, la prise de moyenne volumique, fournit une approche très générale pour cette problématique. Cette technique permet d'obtenir, par prise de moyenne sur un Volume Élémentaire Représentatif (VER) des équations régissant le transport par advection / diffusion d'un fluide réactif à l'échelle du pore, la forme des équations transitoires gouvernant le phénomène à l'échelle locale.

La résolution numérique (différences finies et éléments finis 3D) sur un VER de "problèmes de fermeture" permet de calculer les coefficients de transport macroscopiques (tenseurs de dispersion, de diffusion, de perméabilité, etc.) apparaissant dans les équations locales, en fonction de l'ensemble des paramètres microscopiques pertinents.

Pour la classe de problèmes étudiés, la rétro-action de la diagenèse sur les coefficients de transport macroscopiques peut être prise en compte via les effets de l'évolution de la micro-structure. La figure 1 illustre les évolutions de micro-géométries obtenues pour le cas du transport diffusif d'un fluide contenant un soluté réagissant avec 3 classes de "minéraux" selon 3 cinétiques de 1<sup>er</sup> ordre de précipitation / dissolution  $k_{i=1,3}$ . Pour ce problème simplifié, on démontre que l'évolution de la micro-structure est essentiellement contrainte par la rétro-action du phénomène à l'échelle macroscopique sur l'échelle microscopique (voir légende figure 1). Les hétérogénéités structurales, à l'échelle du pore, sont complètement déterminées par les hétérogénéités du coefficient cinétique,  $k_{i=1,3}$ .

La suite des travaux consiste à appliquer le modèle aux récifs coralliens (figure 2.); 2<sup>ème</sup> site - Nouvelle-Calédonie. L'objectif est de prendre en compte les paramètres et les données empiriques identifiés par les partenaires géologues du projet (Institut de Recherche pour le Développement - IRD - Nlle Calédonie) en vue de simuler l'altération de récifs coralliens e.g., cimentation physico-chimique d'aragonite, dissolution des baguettes d'aragonite squelettiques, etc. Les paramètres structuraux pertinents à prendre en compte pour initialiser les simulations (géométries originelles) seront obtenus par analyse d'images (MEB, figure 2) et mesures pétrophysiques (courbes de pression capillaires, etc.). Ces applications nécessitent dans un 1<sup>er</sup> temps de généraliser les codes numériques illustrés sur la figure 1 au transport d'un liquide contenant  $N$  solutés réactifs dans un milieu poreux à  $M$  minéraux. Cette étape du travail, traitée dans le cadre de la thèse de Cédric Mercet (soutenance prévue en septembre 2000), est maintenant bien avancée.

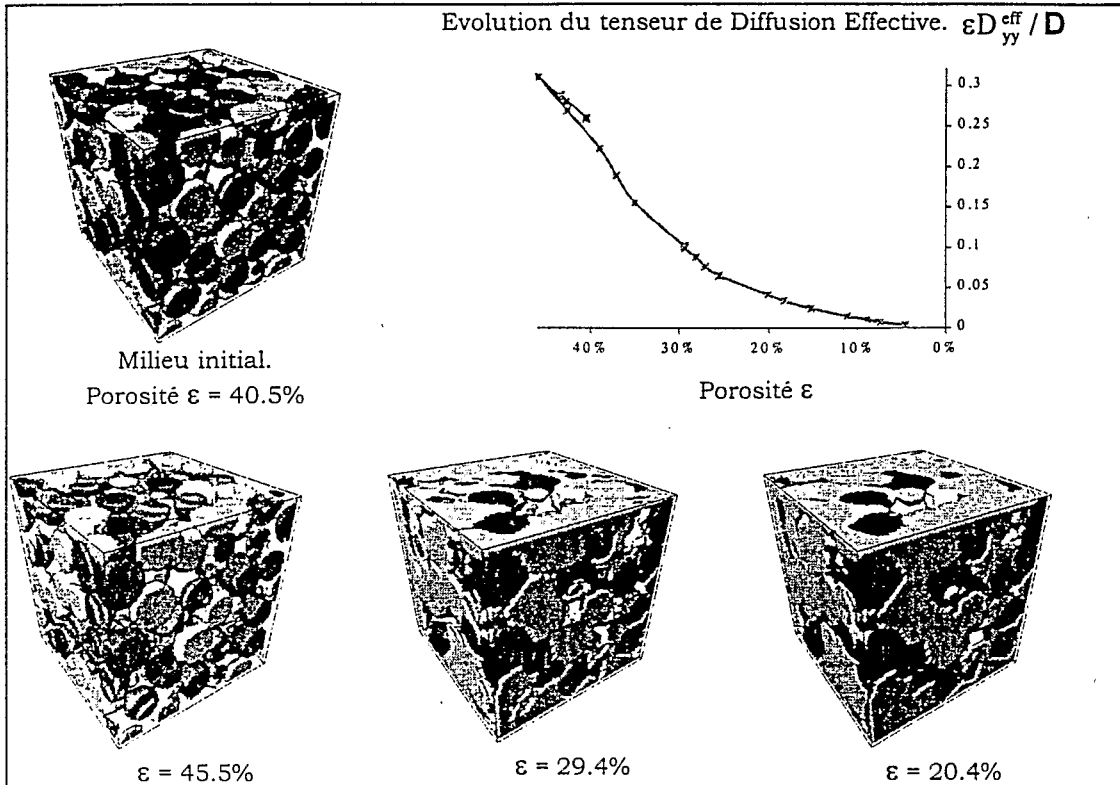


Figure 1: Evolution d'un agrégat aléatoire sous l'effet du transport diffusif d'un soluté  $A$  réagissant avec les 3 classes de grains de la matrice solide selon des cinétiques  $k_{i=1,3}$  de 1<sup>er</sup> ordre de précipitation et/ou de dissolution (les grains de niveau de gris intermédiaire sont dissous). La détermination numérique des champs de variables microscopiques  $f$  et  $s$ , solution des "problèmes de fermeture", permet d'exprimer le flux réactif en chaque point de l'interface solide / fluide  $A_{\beta\sigma i=1,3}$  contraignant l'évolution de la micro-structure comme la somme de 3 contributions :

1.  $k_i f \cdot \nabla < c_A >^\beta$  : flux microscopique exprimant l'influence de la micro-structure sur le champ de concentration de  $A$ ,  $c_A$  ( $< c_A >^\beta$  : concentration moyenne de  $A$  à l'échelle locale).
2.  $k_i s < c_A >^\beta$  : flux microscopique exprimant l'influence de l'interaction entre la micro-géométrie et la réactivité du milieu sur le champ de concentration  $c_A$ .
3.  $k_i < c_A >^\beta$  : flux macroscopique exprimant la rétro-action du phénomène à l'échelle locale sur l'échelle microscopique. Pour la classe de problèmes illustrée, c'est cette composante du flux qui détermine l'évolution de la micro-géométrie i.e., l'évolution des coefficients de transport reportée ci-dessus. Les hétérogénéités à l'échelle du pore sont complètement déterminées et expliquées par les hétérogénéités du coefficients cinétique  $k$ .

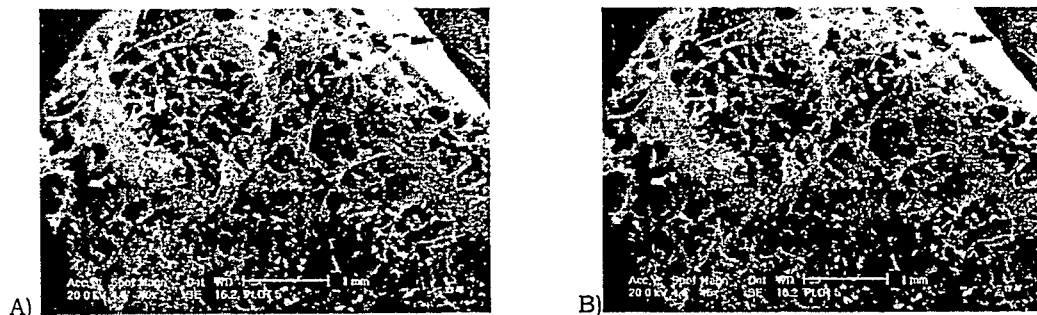


Figure 2: A) Echantillon de récif corallien. Porosité originelle (loges coralliennes). B) Détail de la vue de gauche.

### Instabilité d'infiltration:

Cette instabilité prend naissance à l'injection d'un fluide agressif dans un milieu poreux. Les parties dissoutes, correspondant à une meilleure perméabilité, focalisent le fluide agressif et donc font l'objet d'une dissolution préférentielle. Il se forme alors des figures de dissolution dites en doigts de gants. Anne Ormond, en collaboration avec Peter Ortoleva de l'université de Bloomington a entrepris des modélisations numériques de l'instabilité d'infiltration à l'échelle d'une carotte. Elle a particulièrement travaillé sur la prise en compte de différentes lois d'écoulement, à l'intérieur du poreux ou dans une cavité naissante, ainsi que sur la texture initiale de la roche, homogène ou bien comportant des grains insolubles ou bien des hétérogénéités aléatoires de perméabilité. Les conséquences sur la largeur et la longueur des doigts de dissolution sont extensivement exposées dans Ormond et Ortoleva (2000), Liu et al. (1996) et Ormond (1998). Nous insistons ici sur le résultat essentiel obtenu dans le cas des roches carbonatées à nombres de Péclet et de Dahnköhler élevés, qui correspond assez bien aux conditions naturelles de karstification. Le système se caractérise dans un premier temps par plusieurs doigts de dissolution dans la croissance est progressivement stoppée au profit d'un seul doigt capturant tout le fluide agressif et constituant l'état final du système (figure 3). Les résultats de ces modélisations numériques sont en accord avec les expériences menées par Brigitte Bazin à l'Institut Français du pétrole dans le cadre d'études sur l'attaque acide des réservoirs pétroliers.

Nous avons comparé ces résultats avec les observations préliminaires de porosité secondaire obtenues le long des falaises de îlot Walpole obtenues d'après photos et directement quand la falaise était accessible. Il se trouve que dans les falaises bordant la partie étroite de île, de nombreuses fractures subverticales élargies par dissolution sont observées. Par contre, là où île s'élargit, les fractures agrandies sont moins présentes et l'on observe quelques cavités d'échelle pluridécimétriques pouvant représenter les sorties de chenaux de plus grande taille (voir figure 4). Ceci pourrait s'interpréter en considérant que des que les contraintes géométriques autorisent des doigts longs à se développer, ceux-ci prennent le pas sur toutes les autres structures de dissolution.

Nous comptons continuer nos travaux par des modélisations à l'échelle du massif karstifié, en nous appuyant sur les données disponibles sur nos deux sites de terrain. Les modélisations concernant Walpole partiront d'une porosité bien répartie et donc utiliseront le même type de codes que ceux utilisés à l'échelle de la carotte. En ce qui concerne le site fracturé de Moulis, les modélisations sont en cours en collaboration avec Pierre Adler et Olivier Thovet et utilisent une nouvelle génération de code calculant les dissolutions dans un milieu où chaque fracture est prise en compte explicitement. La mise au point du code et maintenant terminée et nous travaillons à intégrer les observations de fractures effectuées sur le terrain par Pierre Genthon et Elie Debros

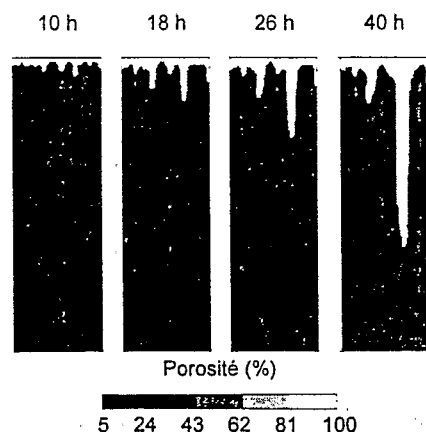


Figure 3. Infiltration dans une carotte de 20x6cm. Durant les 20 premières heures, plusieurs doigts de dissolution se développent simultanément, tandis qu'à la fin de l'expérience, un seul chenal capturant tout le fluide réactif se développe.

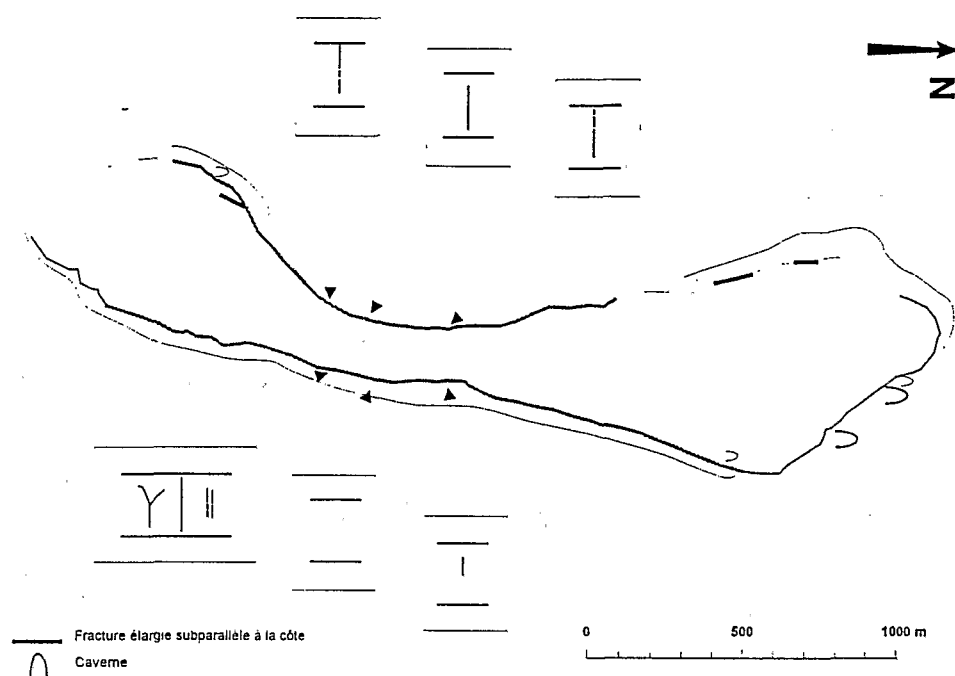


Figure 4 Carte de l'ilot Walpole. Les cavernes et autres structures de porosité décimétriques sont indiquées. Les schémas le long de la partie centrale de l'île figurent la trace des zones de fissures d'ouverture métrique.

## REFERENCES

- Békri S., Thovert J.-F. & Adler P.M., 1995, Dissolution of porous media, *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 2765.
- Anguy Y., Bernard D. & Ehrlich R., 1996, Towards realistic flow modelling. Creation and evaluation of two-dimensional simulated porous media: an image analysis approach, *Surveys in Geophysics*, **17**(3), 265-287.
- Liu, Ormond A., Li Y., Bartko K. & Ortoleva P., 1996. Application of a reaction transport model to matrix acidizing, *special issue, J. P. Sci. Eng.*
- Bekri S., Thovert, J.F. & Adler P.M., 1997, Dissolution and deposition in fractures, *Eng. Geol.*, **48**, 283-308.
- Genthon, P., Schott J.L., & Dandurand J.L., 1997, Carbonate diagenesis during thermoconvection : application to secondary porosity generation in calstic reservoirs. *Chemical geology*, **142**, 41-61.
- Shapiro M. & Adler P.M., 1997, Coupled transport of multicomponent species in porous media, *J. Engineering Mathematics*, **31**, 357.
- Berkowicz B & Adler P.M., 1998, Stereological analysis of fracture network structure in geological formations, *J. Geophys. Res.*, **103**, 15339.
- Koudina N., Gonzales-Garcia, Thovert J.F. & Adler P.M., 1998, Permeability of three-dimensional fracture networks, *Phys. Rev.*, **E57**, 4466-4479.
- Adler P.M., Huseby O. & Thovert J.-F., 1999, A general analysis of transports infracture networks, in *Advances in Fractures*, ed. M.H. Aliabadi, Fracture of Rock, 261, WIT Press.
- Anguy Y., Belin S., Bernard D., Fritz B. & Fern J.B., 1999, Modelling physical properties of sandstone reservoirs by blending 2D image analysis data with 3D capillary pressure data, *Physics and Chemistry of the Earth Part A.*, **24** (7), 581-586.
- Belin S., Anguy Y., Bernard D., Fritz B. & Fern J.B., 1999, Influence de l'illite diagénétique sur la perméabilité d'un réservoir gréseux de Mer du Nord. Caractérisation de la micro-géométrie par analyse d'images, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **170**, 367-377.
- Mercet C., Anguy Y., Bernard D. & Vignoles G., 1999, Modélisation 3D du processus de diffusion-précipitation-dissolution en milieu poreux – 14<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Toulouse, 30 août-3 sept., 6pp., ISBN 2 - 84088 - 040 - 7
- Anguy Y., Ehrlich R. & Mercet C., 2000, Is it possible to characterize the geometry of a real porous medium by a direct measurement on a finite section? (1) The phase-retrieval problem, *Mathematical Geology*, à paraître.
- Ormond A. & Ortoleva P., 2000, Numerical modeling of reaction-induced cavities in porous rocks, *J. Geophys. Res.*, accepté.
- Genthon P., Cabioch G., Calmant S. & Ormond A., 2000, Distribution des cavités de l'atoll soulevé de Walpole. Implications sur le processus de karstification par les eaux météoriques, *CRAS*, soumis.



INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

CNRS/SPI

INRA

IRD

LCPC

METEO-FRANCE



*Colloque*  
**PNRH 2000**

**PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE**

Centre International de Conférences/METEO-FRANCE  
42, avenue Coriolis - 31 057 Toulouse Cedex

16-17 Mai 2000

