

Modèle probabiliste de réseaux karstiques : équation de Langevin et gaz sur réseau

Olivier JAQUET

Colenco Power Consulting Ltd, Mellingerstrasse 207, 5405 Baden, Suisse

Résumé. Les formations sédimentaires karstiques constituent des aquifères dont les réserves en eau sont considérables. Ces aquifères sont caractérisés par une hétérogénéité spatiale extrême : des réseaux de conduits fortement perméables entourés d'un milieu peu perméable. Un modèle de la géométrie de tels réseaux permet l'application des méthodes de simulation numériques des écoulement et du transport de polluants au sein des aquifères karstiques. Les réseaux karstiques sont modélisés à l'aide d'un simulateur de type gaz sur réseau. Celui-ci permet de résoudre numériquement l'équation différentielle stochastique de Langevin caractérisant les mécanismes physiques principaux conduisant à la formation de réseaux karstiques. Ce nouveau type de modèle probabiliste spatio-temporel est conditionnel. Initialement, l'information géologique disponible est introduite sous forme de simulations géostatistiques.

Abstract. Sedimentary rock karstic formations constitute aquifers with important water reserves. These aquifers are characterized by extreme heterogeneity : highly permeable networks of conduits embedded in low permeable medium. A model of the geometry of such networks allows the application of numerical simulation methods to the modelling of flow and contaminant transport within karstic aquifers. Karstic networks are modelled via a lattice gas simulator. This enables the numerical solution of the stochastic differential equation of Langevin, which characterizes the main physical mechanisms leading to the formation of karstic networks. This new type of spatio-temporal probabilistic model is conditional. Initially, the available geological information is introduced by mean of geostatistical simulations.

Table des Matières

1 — INTRODUCTION	70
2 — MODÈLE CONCEPTUEL DU KARST	70
3 — ÉQUATION GÉNÉRALISÉE DE LA DISPERSION	71
4 — ÉQUATION DE LANGEVIN	73
5 — GAZ SUR RÉSEAU	74
6 — CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	77

1. INTRODUCTION

Le karst se définit comme une géomorphologie désordonnée et irrégulière montrant des caractéristiques hydrologiques particulières (réseau hydrographique très lâche, infiltrations ponctuelles, très importantes émergences, ...) résultant de la présence de roches fortement solubles (e.g. roches sédimentaires carbonatées) présentant une porosité secondaire bien développée.

De par le monde, les formations sédimentaires karstiques constituent des aquifères dont les réserves en eau sont considérables. Des estimations montrent que 25 % de la population mondiale est approvisionnée en eau souterraine provenant d'aquifères karstiques (Ford & Williams, 1989). Du point de vue hydrogéologique, les aquifères karstiques se caractérisent par une hétérogénéité spatiale extrême due à la présence de réseaux de conduits fortement perméables. Le fonctionnement hydraulique ainsi que le transport de polluants au sein de l'ensemble de l'aquifère karstique sont fortement influencés par la géométrie du réseau de drainage karstique. La structure spatiale spécifique des aquifères karstiques les rend particulièrement vulnérables vis-à-vis de la pollution (Jeannin et al., 1993).

La gestion et la protection des aquifères karstiques nécessitent la mise en oeuvre de méthodes numériques de modélisation des phénomènes d'écoulement et de transport. Parmi les informations nécessaires à l'application de ces méthodes, la connaissance de la géométrie du réseau de conduits karstiques de l'aquifère est essentielle. De par la complexité de la géométrie des réseaux (voir figure 1) et du peu d'information généralement disponible, une approche probabiliste est choisie pour la modélisation des réseaux de conduits karstiques.

L'approche présentée fut initiée par un projet européen et, est poursuivie scientifiquement dans le cadre d'une thèse à l'Université de Lausanne. Un simulateur par gaz sur réseau a été développé pour modéliser les géométries karstiques. Ce nouveau type de modèle probabiliste permet l'intégration des processus spatiaux et temporels associés à la formation des réseaux karstiques. Le modèle de gaz sur réseau proposé peut être conditionné à partir de l'information géologique disponible, sous forme de simulations géostatistiques.

2. MODÈLE CONCEPTUEL DU KARST

Le modèle conceptuel a pour but de fournir une image synthétique de la réalité caractérisant une structure qui soit compatible avec le comportement hydraulique et les phénomènes de transport observés dans le karst. Celui-ci a été élaboré par les chercheurs du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel à partir de l'étude des phénomènes géomorphologiques et hydrauliques conduite depuis de nombreuses années dans les régions karstiques helvétiques. Les recherches actuelles entreprises dans le cadre de l'action européenne COST 65 (Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique), portant sur les aspects hydrogéologiques de la protection des eaux souterraines dans les zones karstiques, ont permis d'aboutir à une meilleure caractérisation des aquifères karstiques à partir des nombreuses observations effectuées sur le terrain.

Le modèle conceptuel actuel du karst se résume comme suit (Doerfliger & Zwahlen, 1995): un réseau de conduits horizontaux à sub-horizontaux - réseau karstique - très

perméable et de faible volume connecté à un exutoire (source) est entouré d'un milieu peu perméable de grand volume.

La présente recherche a pour but d'élaborer un modèle de la géométrie du réseau karstique et nécessite une conceptualisation de la formation du réseau de conduits karstiques. Le massif rocheux est parsemé de discontinuités (fissures, fractures, ...) au sein desquels siègent des circulations d'eau souterraine. Les circulations vont commencer à avoir lieu préférentiellement le long de petits cheminements issus de l'intersection de discontinuités voisines et peu à peu sous l'influence des phénomènes de dissolution, des conduits vont se créer. Avec le temps, si les conditions hydrogéologiques sont favorables, un réseau karstique pourra émerger à l'échelle régionale. Dans le modèle proposé, pour décrire les phénomènes influençant la dissolution, le fluide est supposé contenir des particules - i.e. des corpuscules fictifs représentatifs des processus physico-chimiques de dissolution - qui possèdent la faculté d'ingérer la roche traversée. Sous l'influence du champ d'écoulement, ces particules gloutonnes vont se disperser préférentiellement au sein de la phase liquide en suivant les discontinuités les plus perméables du milieu: les zones les plus fissurées de la roche seront attaquées en premier. Les conduits s'y formant plus rapidement, ils seront de plus grande taille et les particules suivantes auront tendance à y passer plus facilement. Ainsi, pour un conduit donné, son diamètre sera directement fonction du nombre de particules qu'il aura vu défiler, car les particules vont progressivement manger la roche selon des cheminements préférentiels et former un réseau hétérogène de conduits karstiques, le long desquels les écoulements vont se concentrer.

3. EQUATION GÉNÉRALISÉE DE LA DISPERSION

La formation d'un réseau karstique par transport de particules dissoutes au sein de la phase liquide d'un milieu fracturé comprend trois mécanismes principaux: l'advection, la dispersion et la dissolution. Ces phénomènes physiques peuvent se décrire à l'aide de l'équation différentielle généralisée de la dispersion. La forme de cette équation de transfert de masse appliquée notamment par Kiraly & Müller (1979); de Marsily (1981) est la suivante:

$$\omega \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{q} \nabla C + \text{div}(-D \nabla C) - Q_c = 0 \quad (1)$$

advection dispersion source

avec:

ω :	porosité totale	[-]
C :	concentration	[kg · m ⁻³]
$\vec{q}$:	flux de Darcy (vitesse de filtration)	[m ³ · s ⁻¹ · m ⁻²]
D :	dispersion hydrodynamique	[m ² · s ⁻¹]
Q_c :	source	[kg · m ⁻³ · s ⁻¹]

Les deuxième et troisième termes du membre de gauche de l'équation (1) représentent respectivement les composantes advective et dispersive du transport. L'advection est l'entraînement des particules en solution provoqué par le fluide en mouvement (écoulement

laminaire). La dispersion regroupe les phénomènes physiques suivants:

- la diffusion moléculaire due à un gradient de concentration dans la solution, et
- la dispersion cinématique provoquée par la variabilité spatiale du champ des vitesses du fluide induite par les hétérogénéités au sein du milieu.

Le terme source Q_c correspond à tous les processus (chimiques, biologiques, anthropogènes,...) susceptibles de modifier la concentration de la substance dissoute. Dans les aquifères karstiques, l'interaction eau-roche provoquant la dissolution des carbonates, est la principale source de matières dissoutes. Le terme source, équivalent au flux de substance dissoute par unité de volume de roche, peut s'exprimer sous la forme suivante (Király et Müller, 1979):

$$Q_c = \frac{S_p}{V_r} D_a (C_s - C) \quad (2)$$

avec:

S_p :	surface de contact eau-roche	$[m^2]$
V_r :	volume de roche	$[m^3]$
D_a :	coefficient de diffusion apparent	$[m \cdot s^{-1}]$
C_s :	concentration de saturation	$[kg \cdot m^{-3}]$

Le terme source est ainsi influencé par:

- la géométrie du milieu karstique au travers du rapport S_p/V_r ;
- la vitesse d'écoulement dont le coefficient D_a est dépendant;
- la concentration de saturation qui varie en fonction de différents paramètres physico-chimiques (pression partielle en CO_2 , température, pH, ...) et une série de réactions chimiques secondaires.

L'équation (1) montre que les phénomènes d'advection, de dispersion et de dissolution dépendent principalement de paramètres liés à la géométrie du milieu (porosité, perméabilité) et aux écoulements (flux hydraulique). Une spécificité particulière aux roches karstiques est l'existence d'effets couplés, dus aux interactions entre les écoulements et la géométrie du milieu par le biais de la dissolution. Il s'agit de la notion de boucle de retour (Király, 1978):

- la vitesse d'écoulement dépend de la perméabilité et du gradient hydraulique;
- la perméabilité est fonction de la géométrie des vides (ouverture des fissures, diamètre des conduits, ...);
- la direction et la grandeur du vecteur vitesse influencent cette géométrie par l'intermédiaire des phénomènes de dissolution.

A l'aide de l'équation de dispersion, caractérisant le transfert de particules dissoutes, une description des phénomènes conduisant à la formation de réseaux de conduits karstiques à partir du champ des écoulements au sein d'un milieu fracturé peut être obtenue.

Au vu de la connaissance limitée du champ des écoulements, de la complexité de la variabilité tant spatiale que temporelle du terme source et de l'existence des effets couplés écoulements-géométrie, une approche probabiliste est choisie pour la modélisation de la géométrie des réseaux de conduits karstiques.

4. EQUATION DE LANGEVIN

La résolution de l'équation différentielle généralisée de la dispersion peut s'obtenir par des méthodes déterministes ou probabilistes, qui d'un point de vue formel sont équivalentes (Kolmogoroff, 1931). La modélisation du transfert de particules peut s'effectuer à l'aide d'un processus de marche aléatoire. Pour appliquer le processus de marche aléatoire à la construction de réseaux karstiques, une approche Lagrangienne est nécessaire pour décrire le mouvement de chaque particule en fonction du temps. Dans le cadre Lagrangien, une description du mouvement des particules peut être obtenue à l'aide de l'équation de Langevin.

Les premiers développements relatifs à l'application de processus de marche aléatoire à la modélisation de phénomènes physiques datent du début du siècle. Le mouvement Brownien, correspondant au déplacement désordonné de particules en suspension dans un fluide provoqué par les collisions entre particules voisines, fut notamment étudié par Langevin (1908). L'équation différentielle stochastique obtenue par Langevin peut s'exprimer sous la forme générale suivante (Gardiner, 1990):

$$\frac{dX(t)}{dt} = v(X(t), t) + \Theta(X(t), t) \xi(t) \quad (3)$$

avec:

$X(t)$:	fonction aléatoire de position de la particule	[m]
$v(X(t), t)$:	vitesse du fluide à la position $X(t)$ et au temps t	[m · s ⁻¹]
$\Theta(X(t), t)$:	coefficient de fluctuation (dispersion géométrique)	[m]
$\xi(t)$:	bruit blanc	[s ⁻¹]

L'équation de Langevin décrit l'influence de deux forces sur le mouvement d'une particule en suspension dans un fluide. La première, de nature externe induisant le déplacement du fluide, est modélisée de façon déterministe. La seconde, décrivant les interactions entre particules aboutissant à leur dispersion au sein du fluide, est décrite de manière probabiliste à l'aide d'un processus de bruit blanc.

Classiquement en hydrogéologie, l'équation de Langevin est appliquée à la modélisation des phénomènes d'advection et de dispersion (Uffink, 1990) relatifs à des problèmes de pollution d'aquifères en milieux poreux. La vitesse du fluide est la vitesse d'écoulement au sein de l'aquifère et le coefficient de fluctuation correspond à la dispersion hydrodynamique représentative des hétérogénéités spatiales du milieu.

Pour la modélisation de la genèse de réseaux de conduits karstiques, la vitesse du fluide représente la vitesse d'écoulement des eaux karstiques, et le coefficient de fluctuation - ou de dispersion géométrique - du terme probabiliste doit pouvoir décrire simultanément les hétérogénéités spatiales du milieu et les effets de la dissolution. Le terme source est principalement influencé par le rapport S_p/V_r , (eq. 2), dépendant de la géométrie du milieu karstique. Son domaine de variabilité peut facilement s'étendre sur plusieurs ordre de grandeur (Kiraly & Müller, 1979). En conséquence, l'ouverture des fissures et des conduits karstiques est choisie comme paramètre principal et intervient directement dans le coefficient de dispersion géométrique. Ce coefficient est dynamique, car sa variabilité est à la fois spatiale et temporelle. En un point donné, sa valeur est fonction de l'ouverture initiale de la fissure et du nombre de particules ayant défilés au travers. Ce nombre de particules représente les effets de la dissolution et correspond au terme source de l'équation (1). L'effet de l'hétérogénéité spatiale est modélisé en dirigeant préférentiellement de manière probabiliste les particules dans les plus gros conduits selon une fonctionnelle de leur diamètre. Au fur et à mesure de l'augmentation du diamètre des conduits, un plus grand nombre de particules auront tendance à transiter au travers de ces conduits avec pour conséquence un accroissement de leur diamètre (dissolution), les rendant encore plus attracteur de particules. Ces effets couplés permettent de modéliser la notion de boucle de retour décrite précédemment.

Due à la dépendance spatiale et temporelle du coefficient de dispersion géométrique l'équation de Langevin devient non linéaire, proscrivant tout usage de méthodes analytiques pour sa résolution. La dispersion géométrique étant fonction de l'historique du processus de marche aléatoire - une particule donnée a la possibilité de suivre la même trajectoire que celle qui l'a précédée - signifie que les particules possèdent une certaine mémoire des trajectoires antérieures (processus non-Markovien). En conséquence, pour la résolution de l'équation de Langevin appliquée à la modélisation des réseaux karstiques, une méthode numérique a été choisie: un simulateur de type gaz sur réseau.

5. GAZ SUR RÉSEAU

5.1 SIMULATEUR

Les gaz sur réseau sont des simulateurs discrets - relativement au temps, à l'espace et au nombre de particules - généralement appliqués à la modélisation des phénomènes hydrodynamiques (Doolen et al., 1990). Les particules sont dispersées au sein d'un réseau selon des règles locales permettant la modélisation d'effets à conséquences régionales. Le gaz sur réseau présente l'avantage d'intégrer les processus spatiaux et temporels requis pour appréhender la géométrie des réseaux karstiques. Des géométries et des conditions aux limites complexes peuvent être reproduites à l'aide de ces simulateurs. L'élimination des erreurs d'arrondi, due au fait que le gaz sur réseau n'utilise que des nombres entiers, garantit l'absence d'instabilités numériques.

Le modèle de gaz sur réseau choisi présente un réseau carré à deux dimensions de maille unitaire représentant un milieu fracturé homogène au sein duquel des particules vont pouvoir se déplacer selon l'équation de Langevin. Celle-ci peut s'écrire sous la forme différentielle stochastique d'Ito (Gardiner, 1990):

$$dX(t) = v(X(t), t) dt + \Theta(X(t), t) dW(t) \quad (4)$$

avec:

$W(t)$: processus de Wiener.

ce qui permet de l'exprimer sous sa forme discrète:

$$X(t_{i+1}) - X(t_i) = v(X(t_i), t_i) (t_{i+1} - t_i) + \Theta(X(t_i), t_i) (W(t_{i+1}) - W(t_i)) \quad (5)$$

ou plus simplement en notation abrégée et en discrétisant l'espace à deux dimensions:

$$\Delta X_i^{1,k} = v(X_i^{1,k}, t_i) \Delta t_i + \Theta(X_i^{1,k}, t_i) \Delta W_i \quad (6)$$

Les particules entrent par le bord gauche du réseau - le long duquel elles sont distribuées uniformément correspondant à une zone d'alimentation homogène - selon un débit constant par pas de temps. Chaque particule se déplace en deux étapes par pas de temps avec les caractéristiques suivantes:

- advection de la particule à vitesse constante selon la direction horizontale, excepté en présence de bifurcations latérales présentant des conduits de plus gros diamètre.

- dispersion de la particule jusqu'à un site voisin, selon l'une des quatre directions possibles avec une probabilité de passage proportionnelle au cube du diamètre du conduit dans cette direction. Ce choix est motivé par la relation entre la transmissivité et l'ouverture des fractures faisant intervenir une fonctionnelle de type cubique (Bear et al., 1993). Le coefficient de dispersion géométrique peut s'écrire:

$$\Theta(X_i^{1,k}, t_i) = c^3 [(\theta_i^{1,k+1})^3 + (\theta_i^{1-1,k})^3 + (\theta_i^{1,k-1})^3 + (\theta_i^{1+1,k})^3] \quad (7)$$

avec:

c : paramètre géométrique $[m^2]$
 θ_i : diamètre des conduits voisins $[m]$.

La détermination probabiliste de la direction est effectuée, dès l'acceptation de l'une des quatre conditions prise séquentiellement dans l'ordre suivant:

$$\begin{aligned} \Theta(X_i^{1,k}, t_i) \Delta W_i^{1,k} &< c^3 [(\theta_i^{1,k+1})^3] : \text{déplacement} \rightarrow \\ \Theta(X_i^{1,k}, t_i) \Delta W_i^{1,k} &< c^3 [(\theta_i^{1,k+1})^3 + (\theta_i^{1-1,k})^3] : \text{déplacement} \uparrow \\ \Theta(X_i^{1,k}, t_i) \Delta W_i^{1,k} &< c^3 [(\theta_i^{1,k+1})^3 + (\theta_i^{1-1,k})^3 + (\theta_i^{1,k-1})^3] : \text{déplacement} \leftarrow \\ \Theta(X_i^{1,k}, t_i) \Delta W_i^{1,k} &\leq c^3 [(\theta_i^{1,k+1})^3 + (\theta_i^{1-1,k})^3 + (\theta_i^{1,k-1})^3 + (\theta_i^{1+1,k})^3] : \text{déplacement} \downarrow \end{aligned} \quad (8)$$

Initialement le diamètre des conduits est égal à l'unité, ensuite celui-ci augmente linéairement

avec le nombre de passage des particules. Ce type de dispersion géométrique est une première approche permettant la modélisation des effets des hétérogénéités spatiales et de la dissolution dans les roches karstiques.

5.2 SIMULATIONS

Un logiciel de simulation par gaz sur réseau à deux dimensions, basé sur les équations (6), (7) et (8), a été développé pour la modélisation des réseaux de conduits karstiques. A l'aide de cette méthode de simulation spatio-temporelle la construction d'un réseau karstique est obtenue en marquant les particules; au cours du temps le suivi des trajectoires des particules, dès leur entrée jusqu'à leur sortie du modèle est assuré (voir figure 2). Les trajectoires dessinées par le passage des particules dans le modèle vont constituer un réseau de conduits applicable à la modélisation de la géométrie des réseaux karstiques. Les hypothèses suivantes sont considérées dans le modèle:

- le réseau à deux dimensions est horizontal;
- le réseau initial est homogène;
- la zone d'alimentation homogène (bord gauche) est à débit permanent;
- la vitesse d'advection des particules est constante;
- l'augmentation du diamètre des conduits due à la dissolution est linéaire (aucun effet de diminution de la dissolution dû à la concentration de saturation);
- le bord droit constitue la zone d'exutoire.

Les conditions aux limites latérales sont de type périodique: une particule sortant par le bord supérieur est remplacée par une particule entrant par le bord inférieur et inversement. Le modèle de gaz sur réseau comprend trois paramètres: le débit d'entrée des particules, leur vitesse d'advection et le paramètre géométrique. En variant, par exemple, le paramètre géométrique d'une simulation à l'autre (voir figure 3), des images de réseaux karstiques présentant des structures fort différentes peuvent être obtenues. Le lien entre les paramètres du modèle et les observations disponibles (carte du réseau des conduits: voir figure 1) reste à établir.

Des simulations par gaz sur réseau conditionnelles peuvent également être obtenues. Les discontinuités géologiques (fractures, failles, ...) observées par le géologue peuvent être introduites dans le réseau initial. Dans le modèle, ces hétérogénéités conditionnent la localisation des conduits: les particules se déplacent préférentiellement de manière probabiliste - selon l'équation (8) - à l'intérieur de ces discontinuités, du fait de leur plus grande ouverture. Une autre alternative est l'utilisation de modèles géostatistiques d'ensembles aléatoires adaptés aux milieux fracturés, tel le schéma Booléen à densité régionalisée aléatoire (Lantuéjoul, 1993). Par parcimonie et dans un but synthétique, un modèle gaussien seuillé est choisi. Ce modèle est obtenu à partir d'une simulation multigaussienne anisotrope, $Y(x)$, (avec un rapport d'anisotropie des portées du variogramme sphérique égal à 3) obtenue à

- Doerfliger, N. & Zwahlen F.** (1995) COST 65: National report from Switzerland, Center of Hydrogeology, University of Neuchâtel, pp.1-26
- Doolen, G.D., Frisch, U., Hasslacher, B., Orszag, S & Wolfram, S.** (1990) Lattice gas methods for partial differential equations, Addison-Wesley publishing company, New York, pp.1-555
- Ford, D.C. & Williams, P.W.** (1989) Karst geomorphology and hydrology, Unwin Hyman, London, pp.1-601
- Gardiner, C.W.** (1990) Handbook of stochastic methods for physics, chemistry and the natural sciences, second edition, Springer Verlag, pp.1-442
- Kolmogoroff, A.N.** (1931) Über die analytischen Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Math, Ann., Vol.104, pp.415-458
- Marsily, G. de** (1981) Hydrogéologie quantitative, Masson, Paris, pp.1-215
- Jaquet, O. & Jeannin, P.Y.** (1994) Modelling the karstic medium: a geostatistical approach, Geostatistical simulations, Kluwer Academic Publisher, London, pp.185-195
- Jeannin, P.Y., Kiraly, L. & Doerfliger, N.** (1993) Concept de vulnérabilité des aquifères karstiques, Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel, pp.1-27
- Kiraly, L.** (1978) La notion d'unité hydrogéologique essai de définition, Bulletin du centre d'hydrogéologie, No 2, Neuchâtel, pp.83-221
- Kiraly, L. & Müller, I.** (1979) Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques, Bulletin du centre d'hydrogéologie No 3, Neuchâtel, pp.237-285
- Langevin, P.** (1908) Sur la théorie du mouvement brownien, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol.146, pp.530-533
- Lantuéjoul C.** (1994) Non conditional simulation of stationary isotropic multigaussian random functions, Geostatistical simulations, Kluwer Academic Publisher, London, pp.147-177
- Lantuéjoul, C.** (1993) Ensembles aléatoires, centre de géostatistique, Fontainebleau, France, pp.1-33
- Rouiller, P. & Auf der Maur** (1986) Übersichtplan des Höllochs 1:25000, Stalactite No 36, pp.28-29.
- Uffink, J.M.G.** (1990) Analysis of dispersion by the random walk method, thèse, Université de Delft, pp.1-150

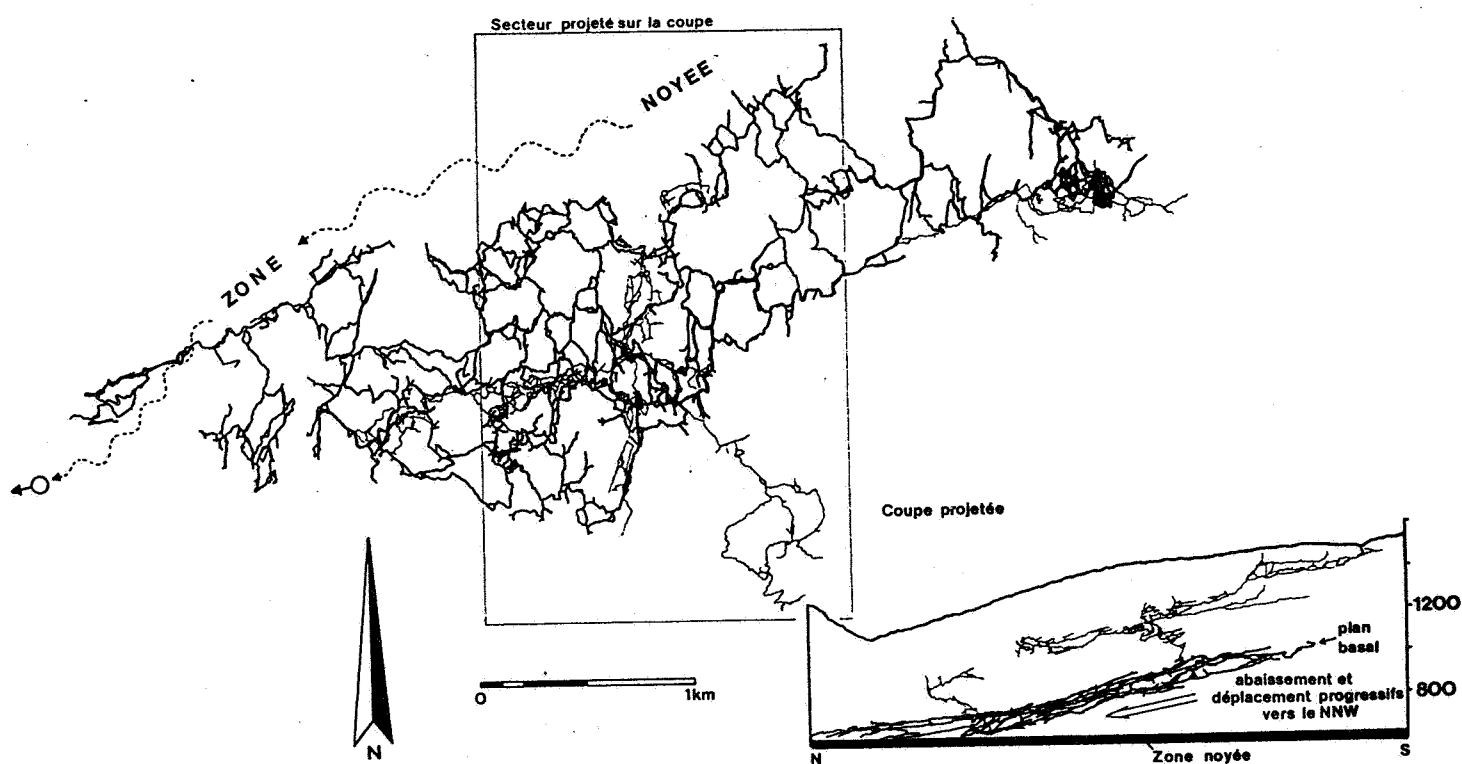


Figure 1 Carte du réseau karstique exploré du Hölloch (Rouiller & Auf der Maur, 1986)

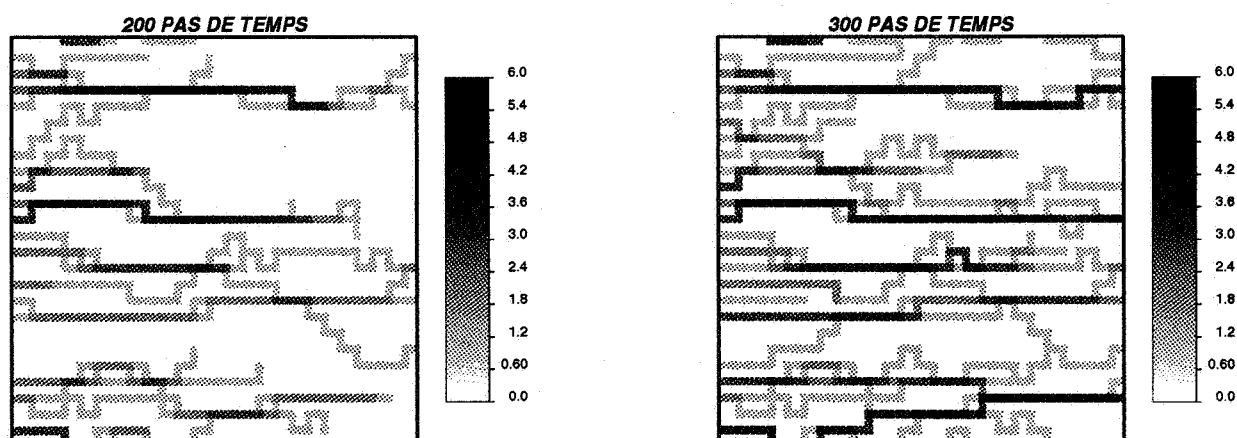


Figure 2 Simulation d'un réseau karstique par gaz sur réseau (diamètre des conduits en grisé)

PARAMETRE GEOMETRIQUE=1.0

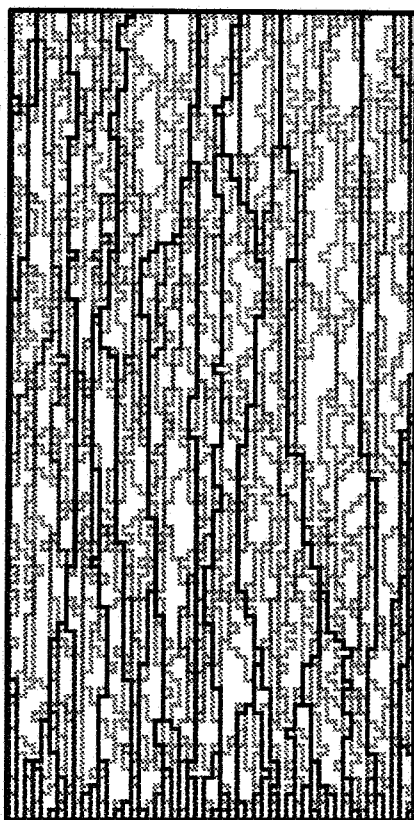


Figure 3 Gaz sur réseau: influence du paramètre géométrique

PARAMETRE GEOMETRIQUE=3.5

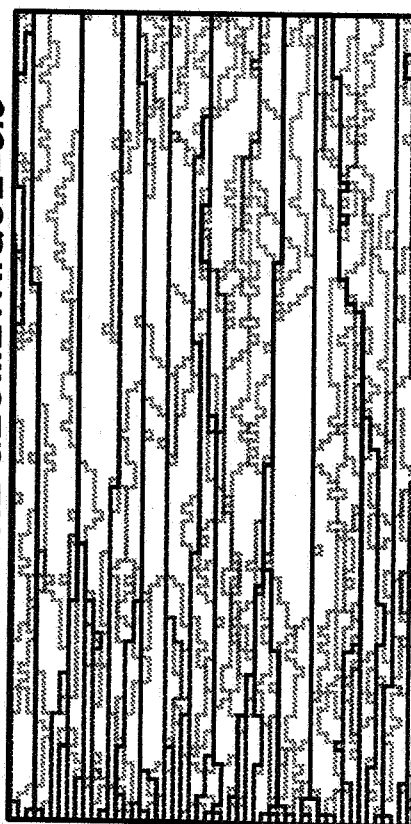


Figure 5 Simulation par gaz sur réseau conditionnelle

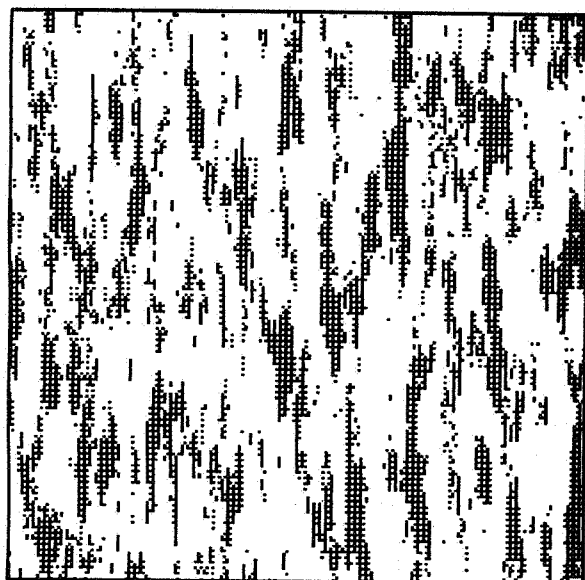


Figure 4 Simulation géostatistique de zones fracturées

