

APPROCHE GEOSTATISTIQUE DU MILIEU KARSTIQUE

O. Jaquet
Colenco Power Consulting AG
CH-5405 Baden

P.Y. Jeannin
Centre d'Hydrogéologie
CH-1200 Neuchâtel

RESUME. Le milieu karstique, fortement hétérogène, est caractérisé par la présence d'un réseau de conduits qui influence fortement les écoulements. L'élaboration d'un modèle du karst est nécessaire pour la compréhension des écoulements karstiques. A partir de la densité des conduits, une approche géostatistique est proposée pour la modélisation du milieu karstique. Cette approche satisfait les contraintes imposées par les applications hydrogéologiques. Cependant des difficultés subsistent quant à la connectivité du modèle et exigent des développements supplémentaires.

ABSTRACT. Karstic medium is an heterogeneous medium, characterized by the presence of a network of conduits that strongly influences groundwater flow. The elaboration of a karst model is necessary for the understanding of karstic groundwater flow. Based on the density of conduits, a geostatistical approach is proposed for the modelling of karstic medium. This approach satisfies the constraints required by hydrogeological applications, but some difficulties related to the model connectivity need further evaluation.

1. INTRODUCTION

Du point de vue hydrogéologique, le milieu karstique, appelé également karst, est un milieu hétérogène constitué de roches peu perméables (matrice), de fractures plus ou moins perméables et de conduits - réseaux karstiques - très perméables. Dans la zone saturée des aquifères karstiques, le réseau de conduits draine les fissures et la matrice rocheuse vers un exutoire. La géométrie du réseau de drainage karstique, très perméable, influence considérablement le fonctionnement hydraulique et le transport de polluants au sein de l'ensemble de l'aquifère karstique.

La compréhension des écoulements, ne pouvant être appréhendée par l'emploi d'une perméabilité effective du milieu karstique (Kiraly, 1976), nécessite l'élaboration d'un modèle du milieu karstique. De par la complexité de la géométrie du réseau et du peu d'information généralement disponible, une approche probabiliste est choisie pour la modélisation du milieu karstique.

Une méthode empirique de simulation géostatistique est proposée permettant de générer des images de la disposition spatiale de conduits au sein d'un milieu karstique. La méthode est appliquée sur le site du Hölloch en Suisse, actuellement en cours d'investigation dans le cadre du projet Européen COST 65 de protection et de gestion des eaux souterraines en milieu karstique. De plus, cette note cherche à cadrer un travail de recherche de plusieurs années qui a pour but la modélisation du milieu karstique par des méthodes géostatistiques.

2. LE RESEAU KARSTIQUE DU HÖLLOCH

Le Hölloch, situé en Suisse, est actuellement le plus vaste réseau de grottes d'Europe occidentale. Avec 160 kilomètres de galeries connues à ce jour, il est le troisième plus long du monde. Ce réseau karstique est constitué d'un labyrinthe de couloirs généralement fossiles (non saturés) qui se développent le long

d'un plan, incliné vers le NNW (figure 1). Les conduits les plus anciens sont les plus élevés en altitude, ils se sont formés dans la zone saturée, alors que le niveau des vallées avoisinantes était plus élevé qu'actuellement. Au cours du temps, avec l'approfondissement des vallées, l'altitude des sources descendait et de nouvelles galeries se formaient de plus en plus bas. Suivant un plan incliné favorable à leur formation, les galeries, pour descendre, devaient migrer vers le NNW. Actuellement l'écoulement se fait de l'est vers l'ouest dans des conduits noyés situés dans une bande au NNW du réseau karstique, qui mesure environ un demi kilomètre de largeur en condition d'étiage. En période de crues l'eau remonte dans les couloirs de la partie inférieure du réseau karstique.

Dans un premier temps, l'analyse du réseau est limitée à un secteur constitué de galeries qui se sont formées dans des conditions comparables aux conditions actuelles dans la zone d'écoulement pérenne (écoulement dans des conduits noyés le long du "plan basal" sur lequel se développe le réseau). Cependant, le réseau analysé rassemble les conduits formés lors d'au moins trois systèmes d'écoulements successifs qui s'étagent sur environ 350 mètres de dénivellation.

Les données disponibles sur la géométrie des réseaux karstiques sont généralement lacunaires, voire inexistantes. Le site du Hölloch, bien informé, est donc particulièrement adapté pour l'élaboration et la mise en oeuvre de modèles du milieu karstique.

3. LES DONNEES DU HÖLLOCH

Les données disponibles du réseau karstique du Hölloch proviennent de l'ensemble des conduits karstiques explorables par les spéléologues (diamètre > 0.3 m). Cet ensemble de données constitue un sous-ensemble du réseau de drainage karstique qui est l'ensemble des conduits existants sans discrimination de taille. Dans un premier temps, les conduits de faibles diamètres ne sont pas pris en considération. Ceux-ci seront inclus ultérieurement dans le modèle, car ces conduits contribuent de façon significative aux écoulements. Les conduits karstiques explorés sont définis par des segments rectilignes de longueurs mesurées à l'aide d'un ruban métré, de directions mesurées avec une boussole, et de pentes mesurées avec un clinomètre. La précision des mesures est de l'ordre de 1 à 2 % de la longueur mesurée (Jeannin, 1992). A partir de l'ensemble des conduits reconnus, la cartographie du réseau karstique est réalisée (figure 1).

Le diamètre des conduits est également mesuré, cette variable requise pour la modélisation des écoulements n'a été dans un premier temps pas valorisée pour la caractérisation de la géométrie du réseau karstique.

Pour des raisons techniques, les données du Hölloch n'étant pas encore disponibles sous forme numérique, nous avons dû travailler directement sur la carte du réseau karstique. Cela implique de considérer une zone du réseau pour laquelle la densité des conduits selon la verticale peut être considérée comme approximativement homogène (figure 1: réseau en traits gras). La carte utilisée est une projection sur un plan horizontal d'un réseau se développant dans l'espace tridimensionnel. La densité apparente des conduits mesurée sur la carte est ainsi surestimée par rapport à la densité réelle des conduits dans l'espace.

4. LA DENSITE DE CONDUITS

La variabilité spatiale de la géométrie du réseau karstique est étudiée à l'aide de la variable régionalisée suivante: la somme totale des longueurs de conduits contenue dans un bloc carré de taille fixée. Cette variable bidimensionnelle décrit la densité de conduits pour un support donné:

$$d_v(x) = \sum_i l_{c_i} / v \quad (1)$$

$d_v(x)$: densité de conduits [m/m^2]

l_{c_i} : longueur du conduit i appartenant au bloc v .

Les caractéristiques structurales de la variable dépendent directement du choix de la taille du support de mesure. Celle-ci est choisie de façon à permettre l'acquisition d'un nombre de données suffisant tout en évitant une proportion trop élevée de valeurs nulles. Les dimensions du support choisies pour l'analyse du réseau karstique du Hölloch sont de 200 par 200 mètres. L'influence de la taille du support sur le comportement structural de la variable sera étudiée fondamentalement, une fois les données reçues sous forme numérique.

Pour faciliter l'échantillonnage de la densité de conduits à partir de la carte du réseau, celle-ci a été discrétisée selon des conduits de 50 mètres de longueur. La longueur des conduits étant fixée, à partir de la relation (1), le nombre de conduits par bloc est la variable échantillonnée:

$$ncb(x) = (d_v(x) \cdot v) / l_f \quad (2)$$

ncb(x): nombre de conduits par bloc v [-]
l_f: longueur du conduit.

Pour obtenir les valeurs du nombre de conduits par bloc, le support choisi est promené sur la carte du réseau karstique selon une maille régulière et le nombre de conduits (de 50 mètres) intersecté par le support en chacun des noeuds de la maille est compté manuellement.

4.1 Histogramme

L'histogramme du nombre de conduits par bloc - strictement du nombre de conduits de 50 mètres contenu dans le support v - montre une tendance asymétrique indicatrice d'une plus grande proportion de valeurs faibles que de valeurs élevées pour la variable étudiée (figure 2).

Au vu du statut provisoire des données utilisées (cf. paragraphe 3), une transformation de la variable (lognormale, anamorphose) permettant le conditionnement des résultats de simulation à l'histogramme des données n'a pas été poursuivi. Les variables caractérisant les conduits (longueur, direction, pente et diamètre) seront analysées en détail, une fois les données disponibles.

4.2 Variographie

Le comportement du variogramme expérimental (isotrope) du nombre de conduits par bloc montre que cette variable peut être considérée comme stationnaire (figure 2). Le variogramme expérimental est faiblement structuré. Les causes ayant pu provoquer cet effet sont les suivantes:

- la taille du support choisi (200*200 m) est trop grande, et
- suites aux manipulations subies (cf. paragraphe 4), préalablement à l'analyse variographique, les données ont vraisemblablement été déstructurées.

Afin d'avancer dans l'étude exploratoire, en attente de données plus précises, le variogramme expérimental est ajusté par un modèle exponentiel isotrope dont l'échelle de corrélation spatiale est de 450 mètres. L'effet de pépité choisi est approximativement de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure sur les longueurs de conduits.

5. APPROCHE GEOSTATISTIQUE

5.1 Contraintes du modèle

L'élaboration d'un modèle du milieu karstique adapté aux applications hydrogéologiques est soumise à diverses contraintes actuellement identifiées comme:

- le modèle respecte les observations géologiques disponibles,
- la géométrie du modèle est compatible avec les méthodes numériques de modélisation des écoulements,

- la géométrie du modèle est hybride (deux types d'éléments): présence d'un réseau d'éléments géométriques (conduits) entourés d'une matrice rocheuse, et
- possibilité d'extension de la géométrie bidimensionnelle du modèle (choisie par parcimonie) à trois dimensions.

La réunion de ces contraintes imposées permet de définir le modèle de karst choisi:

- un modèle bidimensionnel,
- calés sur les données géologiques et,
- à géométrie de type éléments finis.

5.2 Modèle du karst

Le modèle permet de simuler des images du réseau karstique présentant les caractéristiques statistiques observées (moyenne, variance et échelle de corrélation). Pour obtenir une simulation du réseau karstique, deux étapes sont nécessaires.

a. Nombre de conduits

La simulation du nombre de conduits par bloc est effectuée par la méthode des bandes tournantes (Chilès, 1977) à l'aide du programme TUBA (Zimmerman et al.1990). Le nombre de conduits par bloc, variable stationnaire, est simulé aux centres des blocs formant un pavage régulier d'une extension comparable au réseau réel. La taille des blocs est égale au support de la variable. Pour chaque bloc de l'image karstique, un nombre de conduits de longueur égale à 100 mètres (choisie par parcimonie) est obtenu après transformation des valeurs simulées en nombres entiers, variant de zéro à douze.

b. Géométrie

Il reste à implanter les conduits dans les blocs du réseau. Le nombre de conduits par bloc ayant été déterminé par simulation, la position des conduits au sein de chaque bloc du réseau est tirée selon une équiprobabilité (figure 3).

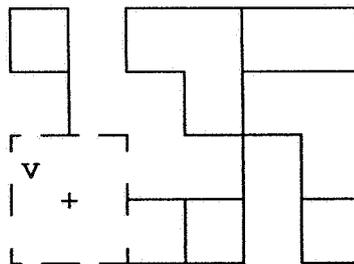


Figure 3: conduits du réseau (traits pleins)

L'image du karst réalisée est ainsi constituée de deux ensembles:

- le réseau karstique réunissant l'ensemble des conduits, et
- la matrice rocheuse regroupant les blocs entourant le réseau karstique.

Afin de limiter le nombre d'éléments géométriques (conduits et blocs) constituant le modèle du milieu karstique, seules deux orientations (N-S et E-W) et douze positions sont possibles pour les conduits de chaque bloc. Ce choix a pour but d'éviter des temps de calculs prohibitifs, lors de la modélisation des écoulements par la méthode numérique des éléments finis.

Le modèle du milieu karstique élaboré s'apparente à un schéma de type booléen à densité régionalisée aléatoire (processus ponctuel de Cox) dont les grains primaires sont constitués par les conduits du réseau (Lantuéjoul, 1993). Ce modèle se distingue du booléen par les contraintes imposées sur les positions et les orientations des conduits au sein du milieu. Les conséquences de ces contraintes sur la formulation théorique de ce modèle d'ensemble aléatoire doivent encore être établies.

5.3 Images du karst

A l'aide du modèle quatre images ou réalisations du réseau karstique du Hölloch - zone rectangulaire de 6 par 3 kilomètres - sont générées (figure 4). Lors de la simulation, du nombre de conduits par bloc, seule la partie structurée du variogramme est prise en compte, l'effet de pépite interprété comme étant dû aux erreurs de mesure n'est pas simulé: la superposition d'une composante pépitique à la partie structurée n'ajouterait que du bruit aux images obtenues.

Les quatre réalisations se distinguent de la carte du réseau (figure 1) par une plus grande homogénéité apparente de la densité de conduits dans l'espace. Cette différence est certainement due aux manipulations de lissage (cf. paragraphe 4) subies par les données lors de leur saisie.

Les images du réseau montrent également la présence de groupes de conduits isolés, non connectés au réseau, qui en principe n'existent pas dans la réalité. La superficie occupée par le réseau - formant l'ensemble des conduits connectés - est très variable d'une réalisation à l'autre (figure 5).

La connectivité des réalisations est influencée par la densité de conduits karstiques, ainsi que par l'échelle du phénomène régionalisé (Allard, 1992). Ces seules caractéristiques ne suffisent pas à déterminer la connectivité, qui est une conséquence de la loi de distribution du modèle d'ensemble aléatoire choisi. Un modèle d'ensemble aléatoire adapté au karst devrait comporter un paramètre de connectivité, estimé à partir des données. Parallèlement, la connectivité des images pourrait être améliorée par la prise en compte de la corrélation spatiale de l'orientation des conduits dans le modèle.

La méthode de simulation proposée n'est pas conditionnelle. Par rapport au milieu karstique, les simulations se doivent d'être conditionnelles: la quantité d'information relative à la géométrie des conduits est généralement faible, par contre les directions d'écoulement sont relativement bien connues et naturellement les points d'exutoires (sources). A partir des données du réseau et des connaissances géologiques du lieu, l'hydrogéologue est à même d'élaborer une première ébauche du réseau karstique étudié. A partir de cette information, une méthode de simulation conditionnelle avec dérive externe serait concevable: le réseau karstique serait simulé conditionnellement aux données géométriques et à l'ébauche du réseau, utilisée comme dérive externe. Cette nouvelle approche est actuellement en cours d'étude.

6. CONCLUSIONS PRELIMINAIRES ET PERSPECTIVES

La méthode de simulation géostatistique proposée est une première approche de modélisation du milieu karstique et de nombreux développements supplémentaires sont encore à entreprendre.

Cette méthode présente l'avantage de satisfaire les contraintes requises par les applications hydrogéologiques et de plus son extension dans l'espace tridimensionnel est réalisable. La variable régionalisée analysée, la densité de conduits, est adaptée à la caractérisation de la variabilité spatiale de la densité du réseau karstique.

Par contre, cette approche ne permet pas d'appréhender directement la connectivité du réseau réel: les paramètres du modèle l'influencent, mais ne la déterminent pas de façon absolue. Des développements supplémentaires sont nécessaires: la conditionnalisation des simulations réalisées conduirait à une amélioration de la connectivité du modèle. Néanmoins, un modèle du réseau karstique comportant intrinsèquement la notion de connectivité permettrait une meilleure description de la réalité observée.

En attendant d'appliquer cette méthode sur les données brutes, d'autres approches de modélisation du karst sont activement recherchées.

7. REMERCIEMENTS

Nous remercions les spéléologues de l'AGH (Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung) qui cartographient les grottes et archivent soigneusement les documents mis à notre disposition. Cette note s'inscrit dans le cadre du projet "simulation des écoulements couplés en milieu fissuré et karstique" (subside No 20-230305.90) du fonds national de la recherche scientifique.

8. REFERENCES

- Allard, D. (1992) On the connectivity of two random set models: the truncated gaussian and the boolean, proceedings of the 4th international geostatistics conference, Troia, Portugal.
- Chilès, J.P. (1977) Géostatistique des phénomènes non stationnaires (dans le plan), université de Nancy, thèse, 1-152p.
- Jeannin, P.Y. (1992) Géométrie des réseaux de drainage karstique: approche structurale, statistique et fractale, annales scientifiques de l'Université de Besançon, mémoire hors série, no 11, 1-8p.
- Kiraly, L. (1976) Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques, bulletin du centre d'hydrogéologie, Neuchâtel, vol. no 1, 37-60p.
- Lantuéjoul, C. (1993) Ensembles aléatoires, centre de géostatistique, Fontainebleau, France, 1-33p.
- Rouiller, P. & Auf der Maur (1986) Übersichtplan des Höllochs 1:25000, Stalactite No 36, 28-29p.
- Zimmerman, D.A. & Wilson, J.L. (1990) Description of and user's manual for TUBA: a computer code for generating two-dimensional random fields via the turning bands method, Seasoft, Albuquerque, 1-155 p.

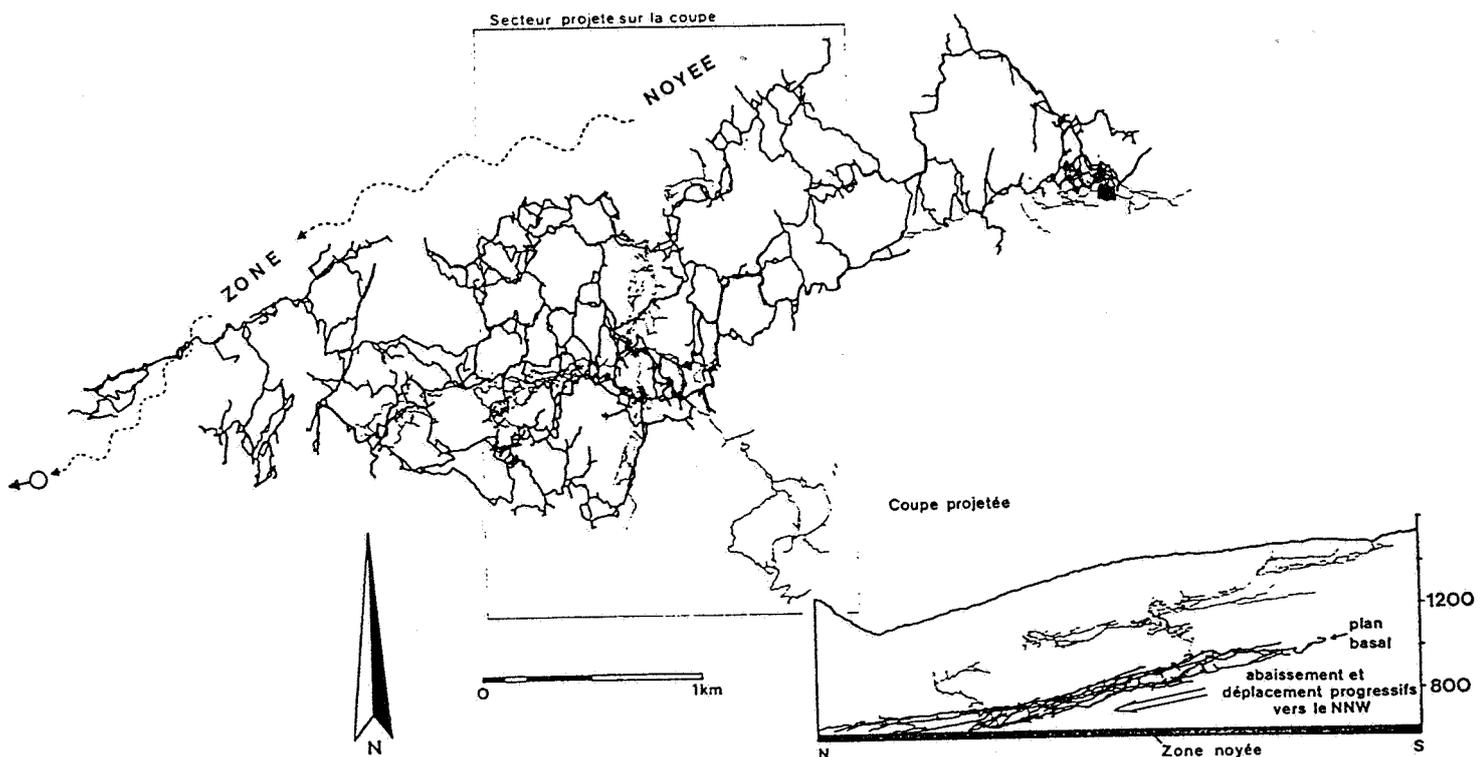


Figure 1 Carte du karst du Hölloch (Rouiller & Auf der Maur, 1986)

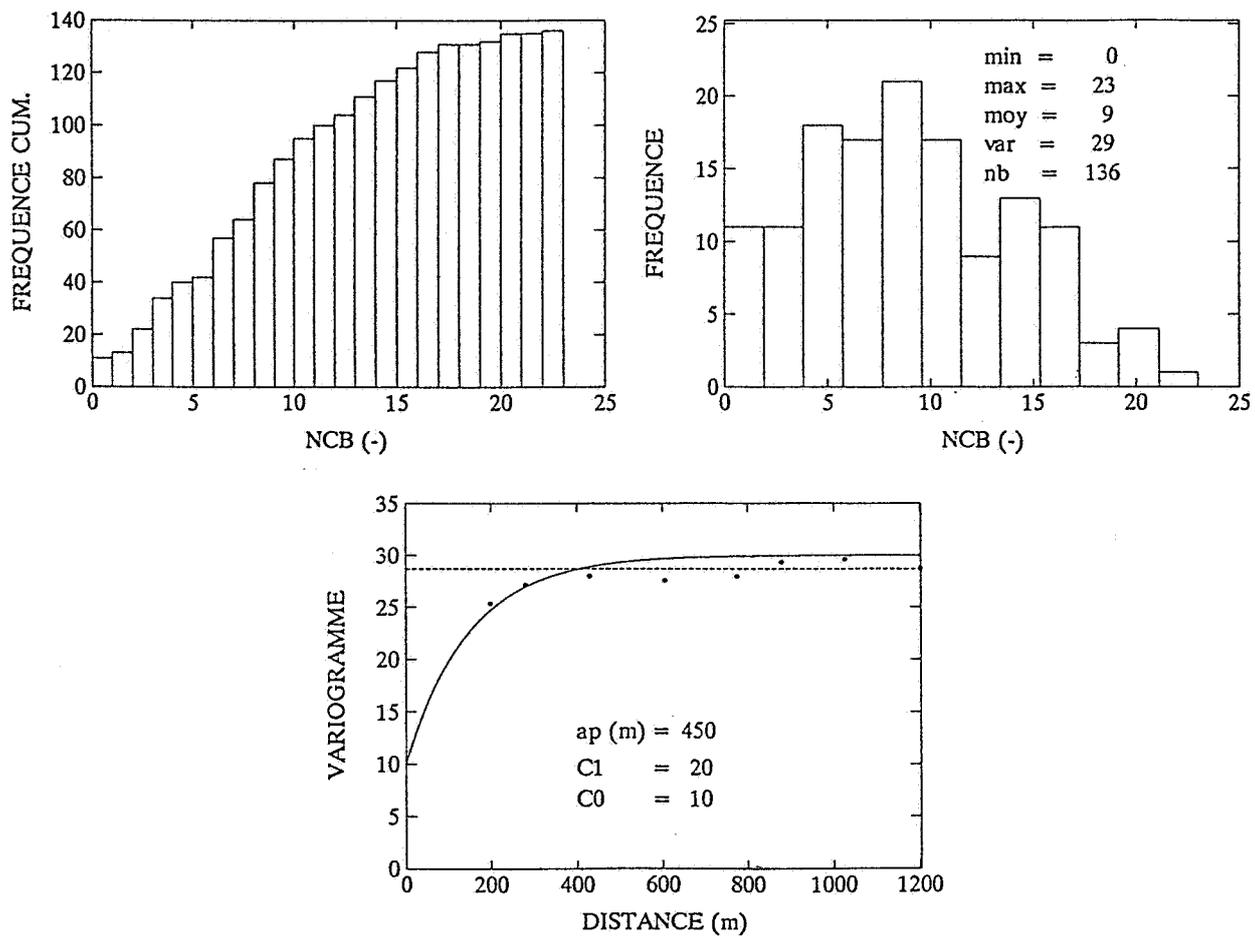
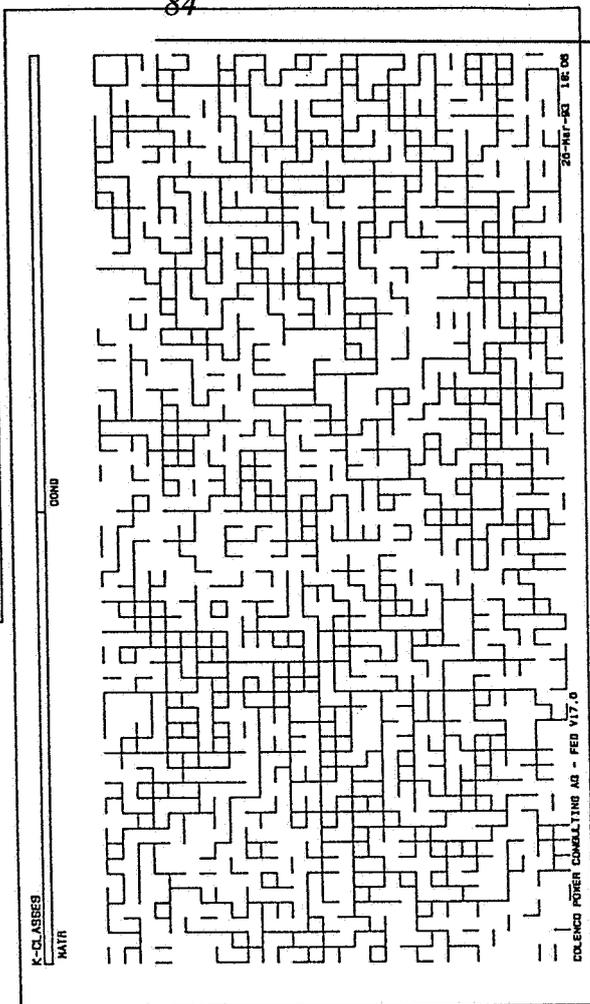
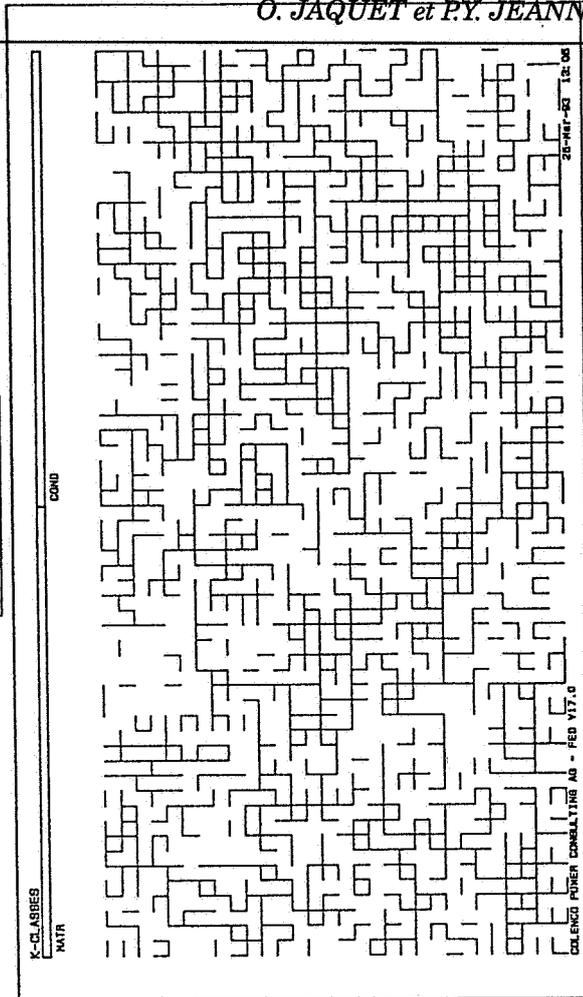


Figure 2 Statistiques du nombre de conduits par bloc

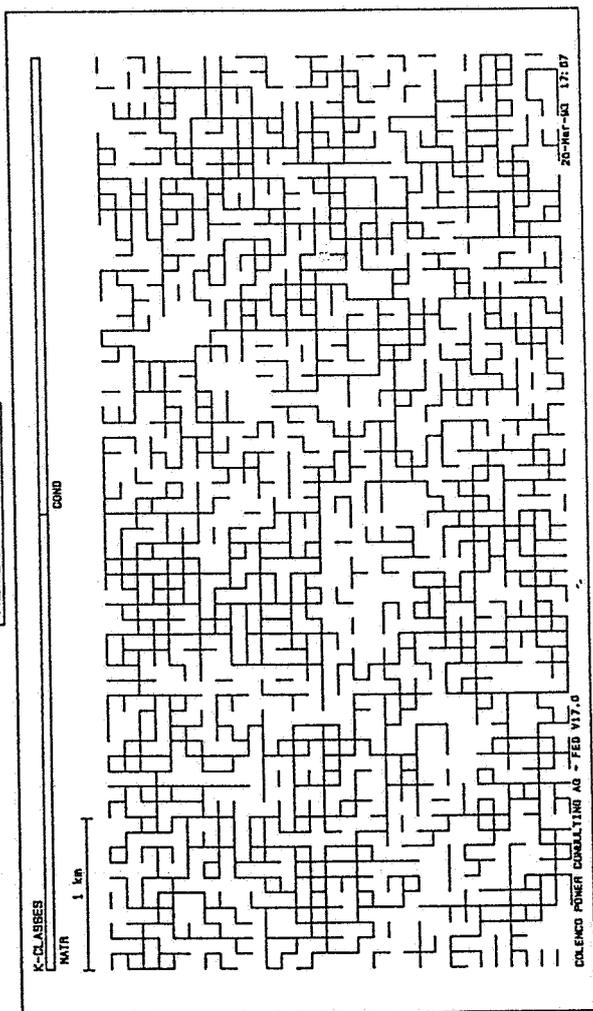
REALISATION No 2



REALISATION No 4



REALISATION No 1



REALISATION No 3

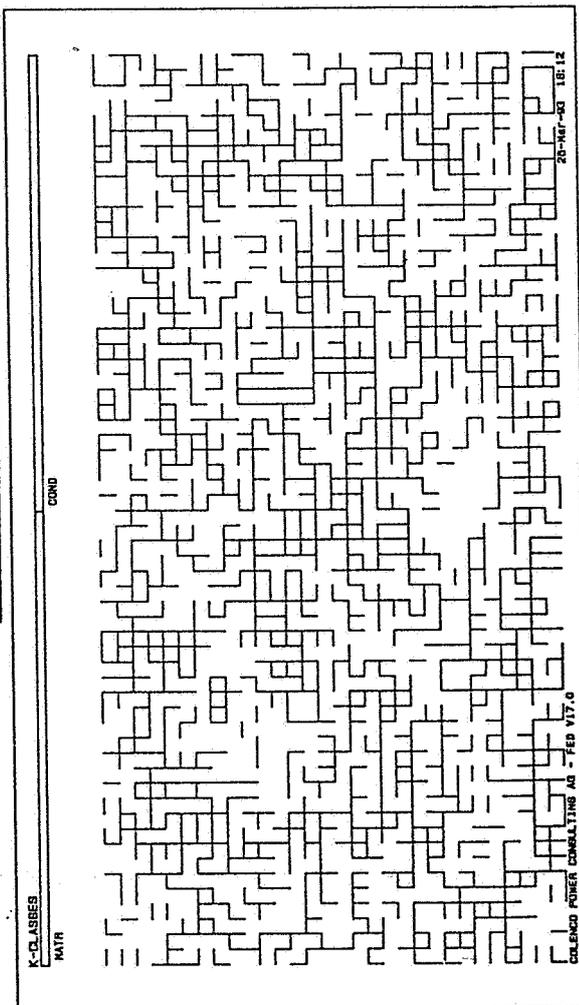


Figure 4 Simulations géostatistiques du karst du Hölloch

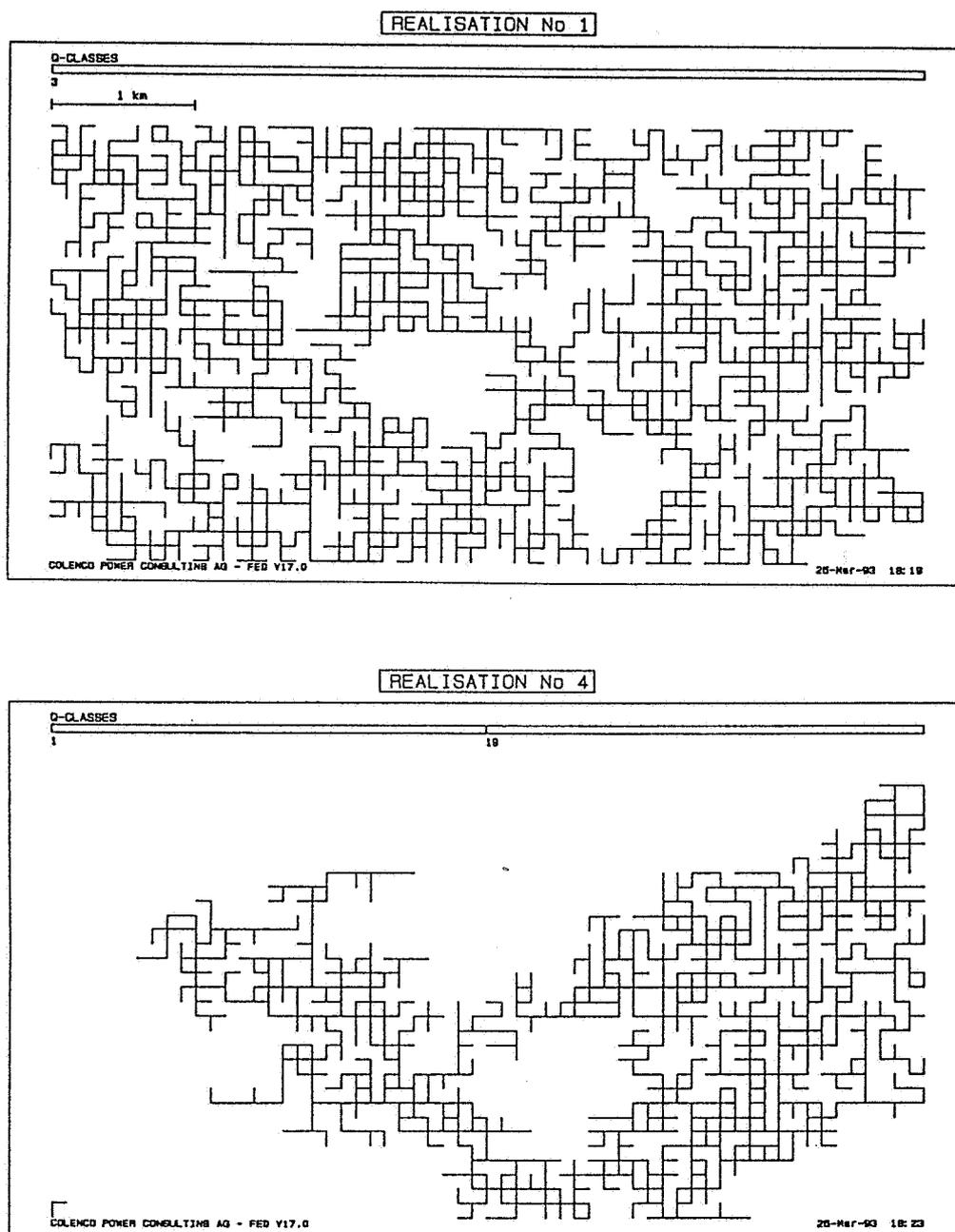


Figure 5 Extension et connectivité du réseau

