

REGULARISATION DE L'AREUSE (JURA SUISSE) SIMULÉE PAR MODELE MATHEMATIQUE.

par L. KIRALY
(Neuchâtel)

1. Situation générale et but du modèle

Le bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois, Suisse) est formé des deux synclinaux karstiques : de la Brévine et des Verrières. Le premier bassin se déverse dans le second par l'intermédiaire d'un seuil anticlinal, désigné „seuil du Bois de l'Halle“.

L'exutoire, la source vaclusienne de l'Areuse, se situe dans le flanc S du synclinal des Verrières, à l'altitude de 780 m. Les deux nappes karstiques principales se trouvent dans les calcaires du Malm supérieur (Portlandien – Kimméridgien – Séquanien), épais de 350 à 400 mètres. Le mur de l'aquifère est formé par les marno-calcaires de l'Argovien (épaisseur: 150 à 180 m) considérés comme peu perméables. L'altitude du seuil anticlinal qui sépare les deux bassins est de 980 m environ, maintenant le niveau de la nappe à une altitude supérieure à 1000 m dans le synclinal de La Brévine.

Le bassin versant de la source s'étend sur 128 km² et reçoit une lame d'eau moyenne annuelle de 1530 mm. Le débit moyen de la source de l'Areuse vaut 4,63 m³/s, avec des crues annuelles dépassant 30 m³/s et des débits d'étiage inférieurs à 1 m³/s (A. BURGER, 1959 et J.-P. TRIPET, 1972).

Le problème étudié est le suivant: une galerie doit traverser le seuil du Bois de l'Halle à la cote de 940 m environ, afin de soutirer de l'eau souterraine dans le synclinal de la Brévine. Le soutirage par galerie se fera en période d'étiage de la source de l'Areuse, de façon à ce que le débit total, source + galerie, soit égal à un débit constant que nous appellerons „débit régularisé“ (Q_R). Le modèle mathématique est destiné à simuler les effets de la galerie, pour différents débits régularisés Q_R et pour différents régimes de précipitations, sur la source de l'Areuse, d'une part, et sur les réserves du synclinal de la Brévine, d'autre part.

2. Remarques sur le modèle

Pour simuler le comportement du système régularisé en écoulement transitoire, nous avons utilisé un modèle bidimensionnel à éléments finis, décrit en détail par KIRALY et MOREL (1976 a). La structure typiquement discontinue des aquifères karstiques („double porosité“ et „double perméabilité“) est respectée grâce à l'utilisation d'éléments unidimensionnels introduits en sandwich entre les éléments bidimensionnels: ces derniers représentent les volumes peu perméables (roche fissurée mais peu karstifiée), tandis que les éléments unidimensionnels simulent le réseau karstique très perméable (figure 1.32).

La figure 1.33 représente, très schématiquement, le principe de la régularisation, ainsi que la nature des conditions imposées à l'exutoire de la galerie en fonction de l'état de la nappe. Les conditions imposées au seuil du Bois de l'Halle varient aussi: le seuil est „fermé“ si la nappe de la Brévine est fortement rabattue par la galerie; il est „ouvert“ si le niveau de l'eau souterraine s'élève de nouveau (alimentation, diminution de prélèvements par la galerie). Tous ces changements (fermeture ou ouverture du seuil, variation du débit soutiré par la galerie) se font automatiquement dans le programme de calcul dont l'organisation logique est montrée par l'organigramme ci-dessous.

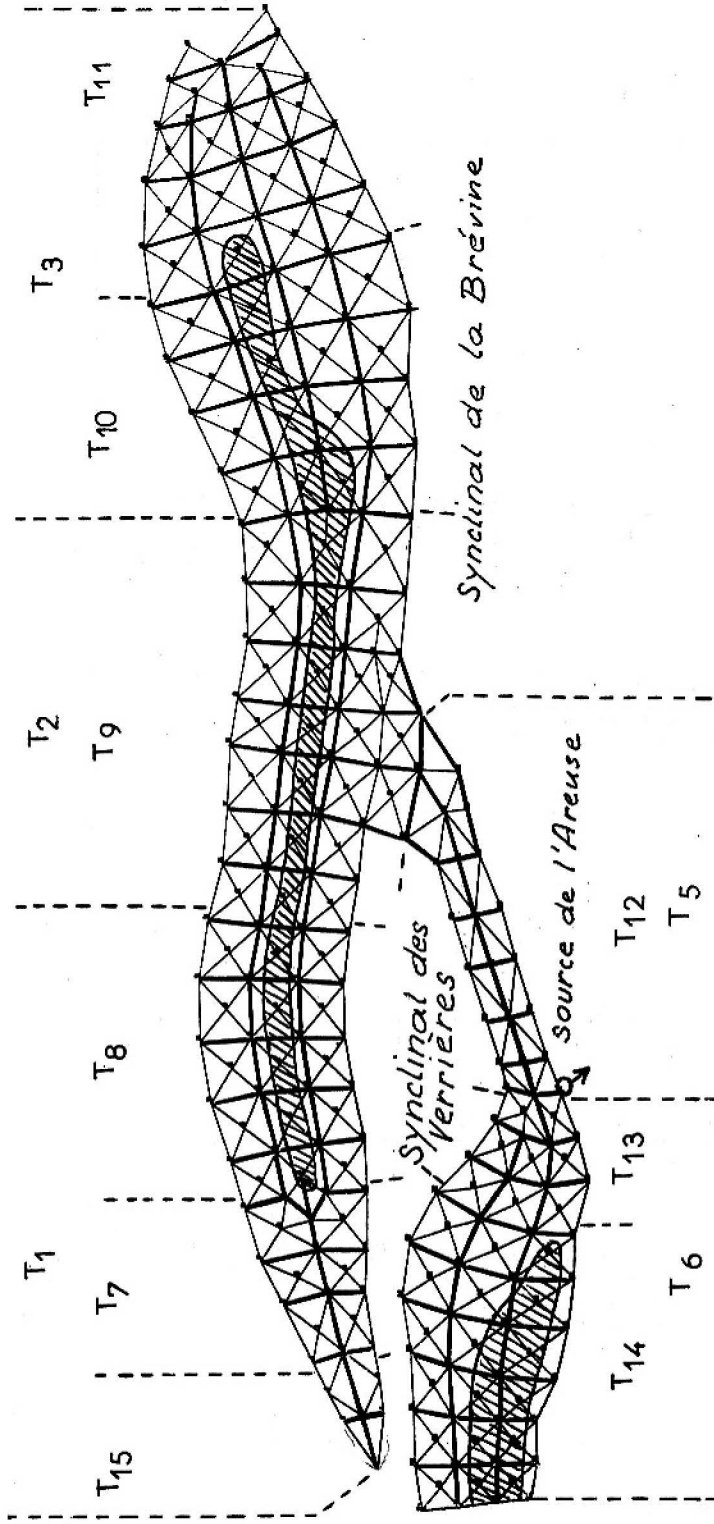


Figure 1.32

Legende:

En hachuré: zone captive. En trait fort: chenaux karstiques
 Carte des transmissivités (m^2/s):

Éléments triangulaires

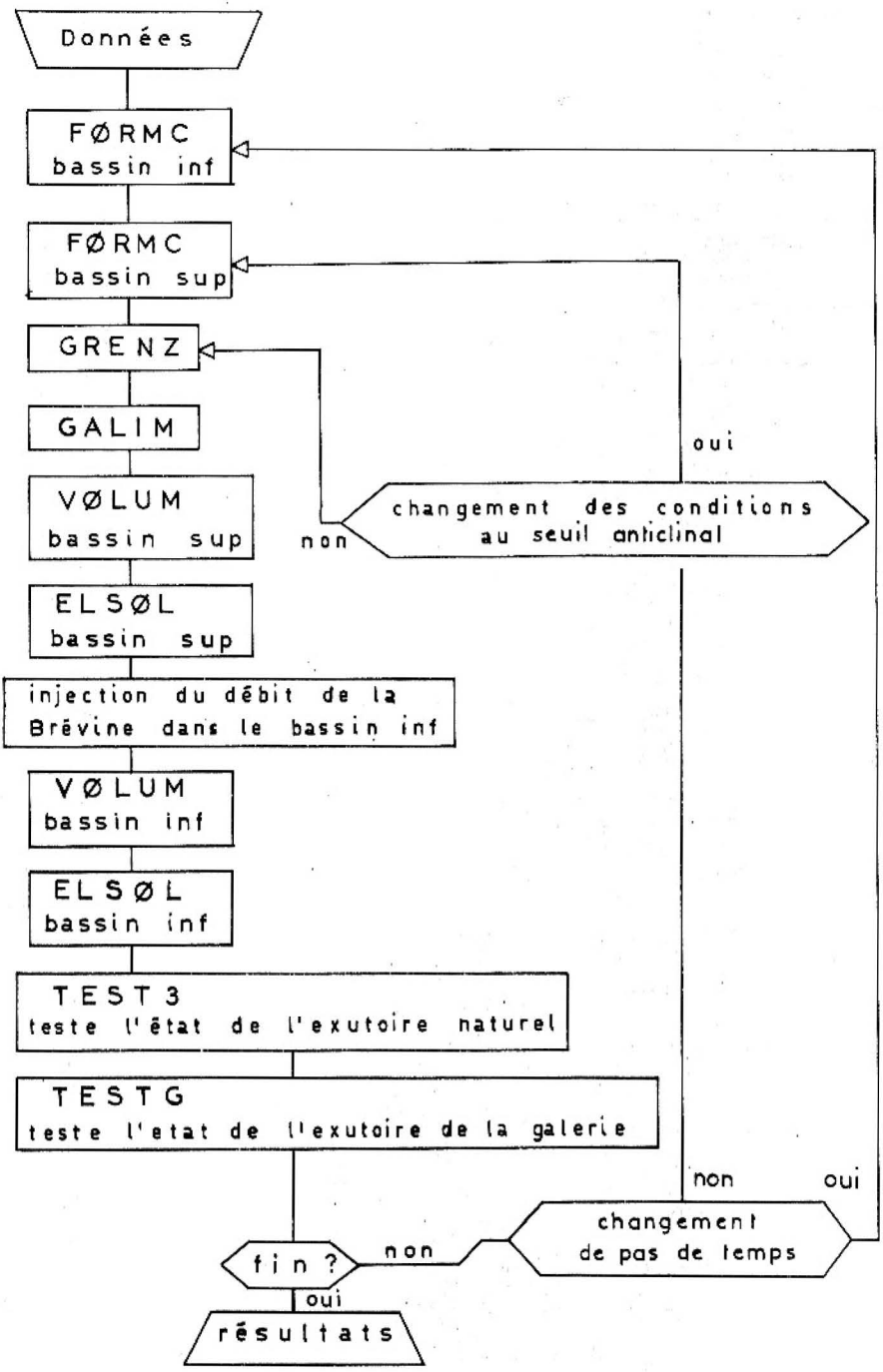
$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_6 = 1.10^{-4}$
 $T_5 = 2.10^{-1}$

Éléments karstiques

$T_7 = T_{11} = T_{15} = 1.10^2$
 $T_8 = 1.5.10^2$
 $T_9 = 2.10^2$
 $T_{12} = T_{13} = T_{14} = 5.10^2$

Remarque: perméabilité des éléments
 triangulaires

$T = 1.10^{-4} \rightarrow K = T/200 m = 5.10^{-7}$



ORGANISATION LOGIQUE DU CALCUL
(Programme DØUX 2)

Organigramme

FORMC:	calcule et assemble les coefficients des équations à résoudre.
GRENZ:	calcule et impose les conditions nodales variables dans le temps (alimentations, hauteurs).
GALIM:	calcule et impose les conditions à l'exutoire de la galerie.
ELSOL:	résout les équations par la méthode d'élimination de GAUSS.
TEST3:	teste l'état du seuil du Bois de l'Halle et détermine les changements à effectuer.
TESTG:	teste l'état de la galerie et détermine les changements à effectuer.
VOLUM:	calcule et impose les infiltrations distribuées sur les éléments.

3. Hypothèses sur l'hétérogénéité des propriétés physiques et des alimentations de l'aquifère

Les essais de perméabilité effectués dans cinq forages profonds indiquent une perméabilité moyenne de $K = 4 \cdot 10^{-7}$ m/s pour les essais de pompage et de $K = 2 \cdot 10^{-6}$ m/s pour les essais d'injection. TRIPET (1972) construit un modèle électrique sans réseau karstique et s'aperçoit que, pour simuler convenablement le niveau de la nappe mesuré dans les forages, il faut admettre une perméabilité moyenne de l'ordre de 10^{-3} m/s! L'apparente contradiction entre les faibles valeurs de perméabilité mesurées dans les forages et la grande perméabilité „moyenne“ que l'on doit admettre à l'échelle du bassin est due à l'effet d'échelle dans le karst (KIRALY, 1973 et 1975), c'est-à-dire à l'existence d'un réseau karstique connexe et de faible densité drainant des blocs peu perméables, mais de volumes très importants. Cette contradiction disparaît d'ailleurs avec l'introduction d'un réseau „fictif“ dans notre modèle: sur la figure 1.32, la grandeur de maille du réseau est de l'ordre kilométrique et la présence de ce réseau permet d'utiliser des perméabilités de $5 \cdot 10^{-7}$ m/s pour les blocs peu karstifiés, en accord avec les valeurs obtenues dans les forages. Quant aux coefficients d'emmagasinement, nous admettons une valeur de 0,35 à 0,40 % dans les blocs peu perméables.

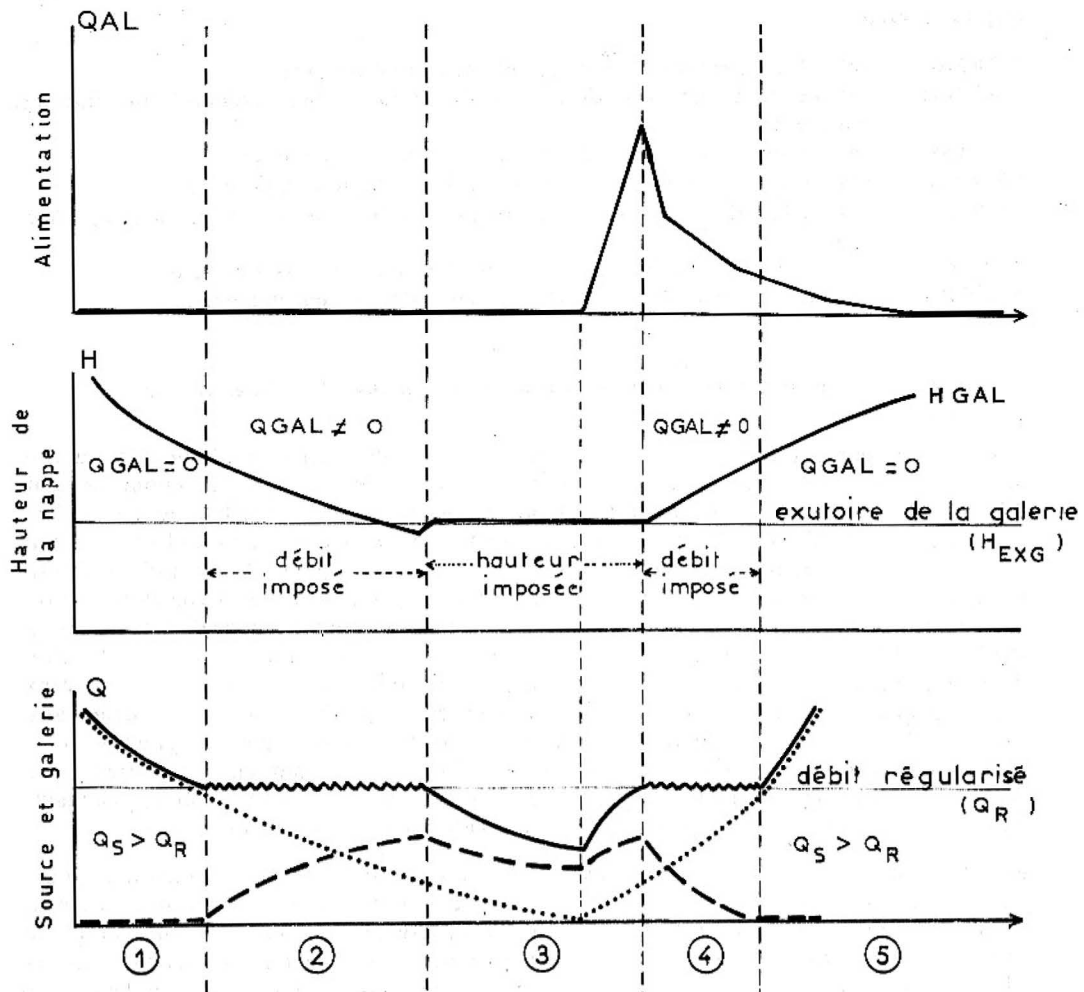
Notre hypothèse sur l'hétérogénéité spatiale des alimentations consiste à admettre qu'une partie importante des eaux infiltrées se concentre déjà dans la zone non-saturée (drainage rapide à faible profondeur, perte des cours d'eau superficiels dans les entonnoirs) et qu'elle arrive directement dans le réseau karstique. En imposant, par exemple, plus de 50 % des infiltrations comme „alimentations concentrées“, notre modèle simule convenablement les pointes de crue et les tarissements de la source.

4. Deux exemples de régularisation

La figure 1.34 montre deux exemples de régularisation simples. L'alimentation est donnée en m^3/s sur la surface totale ($\sim 128 \text{ km}^2$) des deux bassins.

Dans le premier exemple, nous partons d'un débit de crue de $6,4 \text{ m}^3/s$ et nous régularisons le débit à $Q_R = 0,93 \text{ m}^3/s$. Le processus de régularisation s'enclenche 15 jours après la pointe de crue et le débit de la source chute très fortement. Au bout de 10 jours de régularisation environ, la source reprend un débit de tarissement plus soutenu, alors que le débit de la galerie se stabilise à $0,8 \text{ m}^3/s$. Cela correspond à la fermeture du bassin de la Brévine et le débit de la source ne représente plus que la vidange du bassin des Verrières.

Dans le second exemple, on impose un débit régularisé de $2 \text{ m}^3/s$. Partant d'un débit de crue de $6,2 \text{ m}^3/s$, la régularisation s'enclenche au bout de 4 jours. Les débits de la source et de la galerie évoluent comme précédemment, mais avec des variations plus marquées: le bassin de la Brévine se ferme au bout de 8 jours.



ETATS DE LA NAPPE ET REGULARISATION

- ETAT ① : régularisation non nécessaire ($Q_S \geq Q_R$)
- ETAT ② : régularisation possible ($Q_S < Q_R$ et $H_{GAL} > H_{EXG}$)
- ETAT ③ : régularisation impossible $\left\{ \begin{array}{l} (Q_{GAL} + Q_S) < Q_R \\ \text{et } H_{GAL} = H_{EXG} \end{array} \right.$
- ETAT ④ : régularisation possible (idem 2)
- ETAT ⑤ : régularisation non nécessaire ($Q_S \geq Q_R$)

Légende :

- ~~~~~ DEBIT TOTAL DISPONIBLE
- débit de la source
- débit de la galerie

Figure 1.33

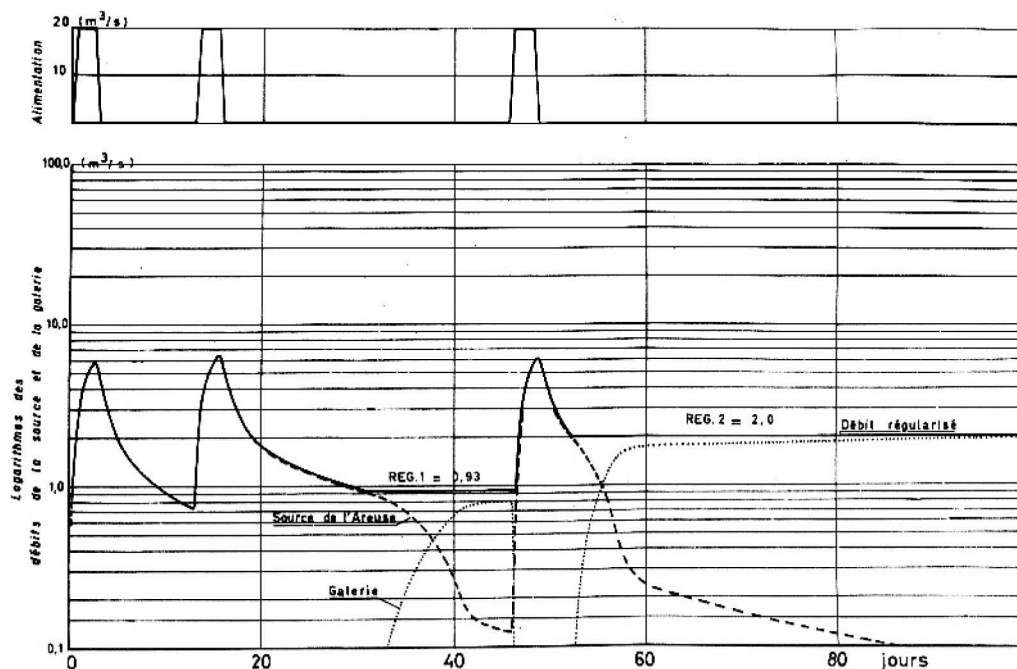


Figure 1.34

Exemples de régularisation

5. Conclusions

L'introduction d'un réseau très perméable, même fictif, dans le modèle d'écoulement des aquifères karstiques, est indispensable si l'on veut éviter certaines contradictions apparentes dues à l'effet d'échelle sur la perméabilité ou si l'on veut simuler d'une façon acceptable l'allure de l'hydrogramme des sources karstiques. En effet, seul un modèle avec réseau karstique permet de simuler à la fois la courbe de décrue non-exponentielle (correspondant à la vidange rapide du réseau très perméable) et la courbe de tarissement exponentielle (due à la vidange lente des blocs peu perméables) des sources karstiques (voir aussi KIRALY et MOREL, 1976 b).

Bibliographie

BURGER, A. (1959) – Hydrogéologie du bassin de l'Arcuse. Bull.Soc.neuchâteloise de Géographie. Nouvelle série, No. 11/Tome LII, fasc. 1, pp. 5-304.

KIRALY, L. (1973) – Notice explicative de la carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. Bull. Soc. neuchâteloise Sc. nat., suppl.au volume 96, 16 p. + carte.

– (1975) – Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: Hydrogeology of karstic terrains; éditeurs A. BURGER et L. DUBERTRET, A.I.H., Paris, pp.53-67.

KIRALY, L. & G. MOREL (1976a) – Etude de la régularisation de l'Arcuse par modèle mathématique. Bull.Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 1: 19-36.

– (1976b) – Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques, simulé par modèles mathématiques. Bull.Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 1: 37-60.

TRIPET, J.-P. (1972) – Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Arcuse (Jura neuchâtelois). Mat.Géol.Suisse, Hydrologie, 21, 183 p.