HAL
open science

Essai de représentation du comportement hydraulique d'un système karstique par modèle déterministe, application à la Fontaine de Vaucluse.

Marc Bonnet, Jean Margat, Dominique Thiéry

To cite this version:

Marc Bonnet, Jean Margat, Dominique Thiéry. Essai de représentation du comportement hydraulique d'un système karstique par modèle déterministe, application à la Fontaine de Vaucluse.. Deuxième colloque d'hydrologie en pays calcaire, 1976, Besançon, France. pp. 79-95. hal-01073950

HAL Id: hal-01073950

https://brgm.hal.science/hal-01073950

Submitted on 10 Oct 2014

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.

DEUXIEME COLLOQUE D'HYDROLOGIE EN PAYS CALCAIRE
ANNALES SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITE DE BESANÇON
Géologie
Fasc. 25,3 ème série, 1976

ESSAI DE REPRESENTATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE D'UN SYSTEME KARSTIQUE PAR MODELE DETERMINISTE : APPLICATION A LA FONTAINE DE VAUCLUSE

PAR

M. BONNET, J. MARGAT, D. THIERY

SOMMAIRE

Pages

RESUME 80

I – POSITION DU PROBLEME 80

1 – Définition 80

II – CARACTERISTIQUES DES RESERVOIRS KARSTIQUES – APTITUDE 81

1 – Structure 81
2 – Comportement – Fonctionnement 81
3 – Données disponibles 82

III – PRINCIPES PROPOSES POUR L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE DETERMINISTE 83

IV – APPLICATION A LA FONTAINE DE VAUCLUSE 84

IV.1 – Contexte hydrogéologique 84
IV.2 – Détermination d'une relation pluie-alimentation/débit par modèles globaux 84
IV.3 – Représentation du système par modèle déterministe 89

CONCLUSIONS 94

RESUME

A ce jour, la représentation du comportement (hydraulique) de systèmes karstiques a surtout été tentée à l'aide de modèles globaux. Plusieurs raisons expliquent cette situation, qui sont d'abord rappelées, tandis que sont soulignés les inconvénients de cette approche (essentiellement explicative de la situation existante).

Puis sont analysées les caractéristiques générales des systèmes karstiques en vue de dégager les éléments qui permettent d'envisager une représentation par modèle déterministe avec tous les avantages que présente cette approche (plus prédictive en ce qui concerne les effets d'aménagements nouveaux).

Une stratégie de construction et de mise en oeuvre de tels modèles est ensuite esquissée et une application au cas de la Fontaine de Vaucluse est présentée à titre d'exemple (encore incomplet).

I – POSITION DU PROBLEME

1 – Définitions

On définit par **système aquifère karstique** un système aquifère hétérogène qui comporte des conduits de forte conductivité, plus ou moins bien interconnectés, situés dans une matrice de roches en général carbonatées pouvant présenter elle-même des propriétés conductrices et capacitives.

Il correspond en surface à un karst (concept géomorphologique) plus ou moins évolué, c'est-à-dire à un domaine qui se caractérise par l'absence ou la dégradation d'un réseau hydrographique continu en surface et par la grande prédominance de l'écoulement souterrain sur l'écoulement total.

2 – Modèles proposés, leurs buts et leurs limites

Les modèles de système karstique conçus jusqu'à présent ont conservé le caractère de modèles globaux ("boîtes noires", ou modèles caractérisés par certains paramètres physiques mais globaux) servant surtout à exprimer une relation pluie/écoulement (alimentation/débit à l'exutoire), donc à caractère essentiellement explicatif.

Ces modèles peuvent être utiles pour la prévision des écoulements aux exutoires naturels d'un système ou pour reconstituer des données manquantes. Ils peuvent aussi servir – avec précautions – à des essais d'extrapolation dans l'espace. Mais toujours sous l'hypothèse que les conditions de fonctionnement du système restent inchangées.

En aucun cas, ils ne peuvent servir à simuler les effets de conditions nouvelles liées à des aménagements réalisés dans le domaine du système (forages) ou à ses limites (captage de source ou au contraire obturation et noyage par des plans d'eau artificiels). En particulier ils ne peuvent prédire les effets d'une exploitation et donc conduire à une évaluation des ressources en eau mobilisables.

A cette fin, il est nécessaire de construire des modèles de simulations hydrodynamiques représentatifs des conditions physiques réelles (modèles déterministes) de ces systèmes aquifères semblables aux modèles désormais classiques de systèmes aquifères non karstiques.

II – CARACTERISTIQUES DES RESERVOIRS KARSTIQUES – APTITUDE

Les systèmes karstiques présentent par rapport aux aquifères continus (nappe) un certain nombre de caractéristiques spécifiques qui conditionnent grandement leur aptitude à se prêter à une représentation déterministe :

1 – Structure

Les systèmes karstiques réels peuvent présenter plusieurs types de structure.

1 – Structure monocouche

Le système est constitué par un réservoir monocouche à écoulement bidimensionnel, géométriquement défini. **L'hétérogénéité** karstique se manifeste à l'échelle (au moins) métrique par la coexistence dans le réservoir de :

(a) – **une matrice perméable** (fissurée et/ou poreuse) assimilable – à l'échelle du système – à un milieu continu caractérisé par les paramètres habituels T (ou K et une hauteur noyée), S.

Remarques :

– L'anisotropie du milieu fissuré n'intervient pas tant que l'on considère l'écoulement comme bidimensionnel, la perméabilité prise en compte étant la perméabilité directionnelle moyenne parallèle aux directions d'écoulement (et celles-ci étant considérées comme relativement stables à l'échelle du système).

– L'écoulement dans la matrice peut être soit à surface libre avec alimentation possible à travers une zone non saturée développée dans le même milieu et au contraire souvent couverte de formations semi-perméables, soit captif, le milieu se comportant alors seulement comme un conducteur.

(b) – **un réseau de conduits** de forte conductivité mais de capacité négligeable en général, sans surface libre (assimilables à des conduites forcées) qui peut alternativement drainer ou alimenter la matrice (a).

2 – Structure bicouche

Le système est constitué par la superposition de 2 couches hétérogènes ayant chacune la structure décrite ci-dessus ; mais souvent la couche supérieure n'est dotée que d'une capacité et d'une perméabilité négligeable, tandis que la conductivité de son réseau de conduits, localisé préférentiellement au mur de la couche, s'ajoute à celle de la couche inférieure.

3 – Structure en compartiments

Il existe dans le système (monocouche ou bicouche) des discontinuités importantes (failles ou rivières souterraines) faisant obstacle à des propagations d'influence (dans la matrice continue) et isolant ainsi des compartiments où les régimes sont relativement indépendants.

2 – Comportement – Fonctionnement

Mais quelle que soit leur structure tous les systèmes karstiques présentent un certain nombre de

modalités de comportement et de fonctionnement caractéristiques qui concernent notamment :

– **le mode d'alimentation** qui se fait à la fois :

– par infiltration efficace à travers une zone non saturée, analogue à celle de tout aquifère à nappe libre,

– par engouffrement de cours d'eau de surface et transport en conduits pouvant temporairement recharger la zone saturée.

La fonction de transfert entre la pluie efficace et le débit aux exutoires peut donc omporter deux lois superposées analogues respectivement à la relation infiltration/écoulement souterrain des aquifères libres normaux, et à la relation précipitation/ruissellement d'un cours d'eau de surface. De ce point de vue, un système aquifère karstique a plus d'affinité avec un bassin versant comportant des aquifères qu'avec un aquifère proprement dit.

N.B. La fonction capacitive d'un système karstique peut être très inégalement assurée suivant la nature des roches constituantes, elle peut être importante pour des roches carbonatées poreuses (dolomies notamment) ou très fissurées, mais elle peut aussi être très réduite si la capacité se limite à celle des conduits (dans ce cas, le système serait assimilable à un bassin versant superficiel "imperméable"). Autrement dit, le coefficient d'emmagasinement global du système, et particulièrement celui de la matrice perméable, peut être très variable.

– **le mode de drainage interne puis d'émergence** qui dépend principalement de la structure du réseau karstique. Celui-ci concentre les débits et les achemine vers quelques exutoires (en nombre en général très petit) situés à l'aval des conduits les plus importants et fonctionnant sous une condition de niveau imposée (de manière pérenne ou par débordement temporaire).

Ainsi, par exemple dans le schéma monocouche, pour simplifier les idées, le réseau karstique a vis-à-vis de la matrice une fonction similaire à celle d'un réseau hydrographique vis-à-vis d'un domaine aquifère avec lequel des échanges d'eau sont possibles et réversibles ; mais sauf dans le cas distingué ci-dessus, où ce réseau prend l'allure de véritables rivières souterraines, il impose plutôt une condition de flux qu'une condition de potentiel. Le réservoir se trouve en somme subdivisé plus ou moins complètement en "blocs" élémentaires, à conditions de flux aux limites.

– **les conditions aux limites** parmi lesquelles prédominent les limites étanches, dont certaines ne peuvent être considérées comme stables et impliquent donc souvent un domaine d'extension variable. Une partie d'un aquifère karstique,c'est-à-dire de la "zone noyée" d'un massif karstique,peut en effet se dénoyer en période de bas débit (voir ci-après l'exemple de Vaucluse, fig. 1).

3 – Données disponibles

L'ensemble des données disponibles concernant les sytèmes karstiques présente également quelques caractéristiques spécifiques par rapport à celui dont on dispose usuellement pour les systèmes auqifères classiques :

– La distribution des potentiels dans le réservoir n'est en général connue que par points isolés et peu nombreux entre lesquels une interpolation est toujours assez hasardeuse, en particulier les potentiels imposés se limitent à ceux des quelques exutoires.

– En contrepartie les débits sortant par ces exutoires sont en général bien connus – beaucoup

mieux que les flux d'émergence des nappes en milieu continu qui sont plus diffus. Ils représentent en outre souvent la quasi-totalité du terme "sortie d'eau" du bilan du système.

– L'alimentation du système se fait uniquement par la surface et peut être assez précisément approchée par mesure directe pour les pertes identifiées de cours superficiels ou par un modèle global pluie/débit que la structure particulière du système permet de caler correctement par confrontation avec les sorties jaugées (voir ci-après).

– Les paramètres structuraux du réservoir : transmissivités et emmagasinement de la matrice, géométrie, conductivité et capacités des réseaux karstiques sont rarement mesurés pour les premiers, encore tout à fait inconnus pour les seconds.

III – PRINCIPES PROPOSES POUR L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE DETERMINISTE

Nous n'aborderons ici que le cas où la structure du système est monocouche et non compartimentée.

A la base on fera l'hypothèse que le réservoir se comporte comme un milieu "perméable en grand" c'est-à-dire – en donnant à ce qualificatif ancien un sens moderne plus précis – qui peut être assimilé, à une échelle assez petite (celles de "blocs" kilométriques ou plus grands) à un milieu perméable continu caractérisable par des paramètres hydrauliques moyens où le réseau karstique se traduit par une hétérogénéité brutale certes mais qui affecte peu la nature de l'écoulement (loi linéaire charge/débit).

Sous cette hypothèse on peut utiliser un modèle de même forme (basé sur la loi de Darcy et le principe de conservation) que ceux utilisés pour la représentation des nappes en milieu poreux.

L'utilisation d'un modèle à mailles variables doit permettre de s'approcher d'une représentation séparée de la matrice continue (représentée par de grandes mailles à faible transmissivité et à capacité significative) et des conduits (représentés par des rangs de mailles beaucoup plus petites, à forte conductivité et à capacité négligeable ; on leur affectera un emmagasinement d'aquifère captif, de l'ordre de 10^{-3} au maximum.

La géométrie du réseau peut être représentée de manière très schématique en un premier stade, la représentativité des longueurs de drains étant plus importante que celle de leur configuration (qui est de toute manière le plus souvent inconnue, et esquissable seulement d'après les résultats de traçages).

En principe, dans un monocouche, les mailles-conduits ne doivent pas avoir de cote de débordement, sauf dans le cas de source temporaire connue, ni recevoir d'apport direct (leur faible surface rend, il est vrai négligeable le flux qui proviendrait d'une infiltration de pluie efficace), sauf dans le cas de pertes mentionné plus haut.

En ce qui concerne le calage la principale difficulté provient sans doute du manque de données sur la distribution des potentiels dans le réservoir. Cette lacune interdit la démarche courante pour les nappes en milieux poreux, qui consiste à prendre cette distribution comme "la référence" que l'on cherche à reproduire par ajustement des paramètres de structure.

On devra toujours, en vue de réaliser cet ajustement se baser sur la représentation des débits aux exutoires (qui seront alors considérés comme "référence") étant donné les débits d'entrée ;

Ce qui implique que l'on dispose d'une loi d'apport jugée réaliste.

Le meilleur moyen d'obtenir cette loi est de passer par l'intermédiaire de modèles globaux évaluant pour l'ensemble du bassin les transferts suivants :

pluie → Pluie efficace ou alimentation → Débit aux exutoires

Ces transferts globaux étant identifiés, le calage du modèle déterministe consistera à reproduire les hydrogrammes de débit sortant en ajustant : le contraste entre les paramètres affichés aux mailles-matrices et aux mailles-drains, la géométrie du système de drains (longueur surtout), enfin la zonalité des paramètres et celle des apports qui pourraient ne pas être uniformes (contrairement à l'hypothèse admise à la base de la plupart des modèles globaux).

Ainsi dans la stratégie proposée la mise en oeuvre d'un modèle déterministe s'appuie sur les résultats d'une approche par modèles globaux qui illustre bien le caractère complémentaire des 2 types de modèles.

Le principal intérêt du modèle déterministe obtenu, à condition qu'il ait pu être correctement calé, est d'autoriser la simulation de tous les aménagements qui se traduisent par une modification des conditions aux limites du système. Ce qui est bien le cas de la plupart des opérations de prélèvement qui correspondent tantôt à des conditions de flux tantôt à des conditions de rabattement imposées, soit en régime permanent (captages dans le massif), soit en régime transitoire (par exploitation saisonnière d'une source). L'exemple ci-après illustre la démarche proposée.

IV – APPLICATION A LA FONTAINE DE VAUCLUSE

IV.1 – Contexte hydrogéologique

La Fontaine de Vaucluse, célébrité hydrologique bien connue sur le plan touristique, est l'exutoire quasi unique d'un système karstique dont les limites ont pu être assez précisément définies par toute une série d'études hydrogéologiques.

Ces limites sont représentées figure 1. Elles correspondent grosso modo à l'extension du réservoir aquifère constitué par des terrains calcaires d'âge crétacé. Toutes peuvent être considérées comme à flux nul.

La surface totale du système ainsi défini est d'environ 1 600 km^2 mais une partie seulement (soit 1 230 km^2) reçoit l'alimentation pluviale, le reste étant recouvert de terrains imperméables (voir carte).

Cette alimentation est drainée vers la Fontaine de Vaucluse qui constitue un point d'émergence à niveau imposé et donc à débit variable. Ce débit est connu par jaugages précis depuis 1966 (station de Mousquety), plus approximativement avant cette date.

Les pluies sont connues par 6 postes pluviométriques répartis dans le bassin d'alimentation.

IV.2 – Détermination d'une relation pluie-alimentation-débit par modèles globaux

Détermination de la pluis efficace (modèle MERO)

Compte tenu de l'extrême variabilité des conditions climatiques (régime de type méditèrranéen) sur le bassin d'alimentation de la Fontaine de Vaucluse, aucun modèle simple et d'utilisation courante,

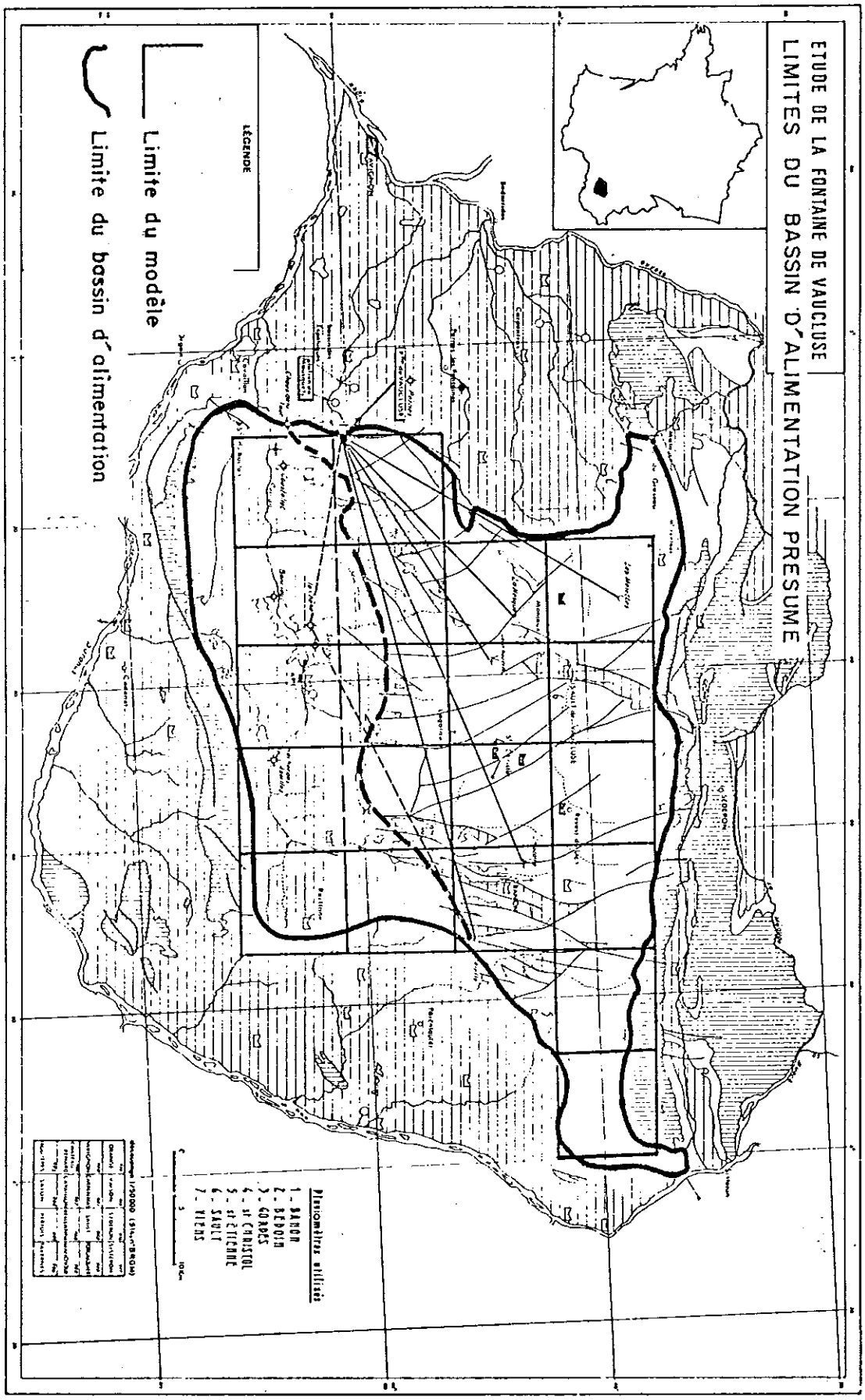
ETUDE DE LA FONTAINE DE VAUCLUSE
LIMITES DU BASSIN D'ALIMENTATION PRESUME
LÉGENDE
Limite du modèle
Limite du bassin d'alimentation
Piézomètres utilisés
1 - BARBON
2 - BERNOUIN
3 - CADRES
4 - St CHRISTOL
5 - St ETIENNE
6 - SAULT
7 - VIENS

Fig. 1

décadaire ou mensuel, n'a permis d'obtenir des estimations satisfaisantes de la pluie efficace (cf. ci-dessous).

Un modèle global de bassin adapté aux conditions hydrogéologiques et climatologiques spécifiques du bassin de cette source a donc été élaboré.

Ce modèle dénommé "Vaucluse" dérive du modèle proposé par MERO. Il utilise des données journalières (pluies, évapotranspirations potentielles) exprimées en lames d'eau uniformes sur l'aire du bassin (valeurs moyennes pondérées dans l'espace) et donne au même pas une lame d'eau infiltrée moyenne. Il est calé sur les valeurs globales du débit écoulé à l'exutoire au cours d'un ou de plusieurs cycles hydrologiques.

Son fonctionnement est schématisé par la figure 2.

Le modèle "Vaucluse" a été calé à partir des observations hydroclimatologiques de la période 1966-1969 par comparaison des volumes calculés de la pluie efficace avec les volumes écoulés mesurés à la station de Mousquety. Ce calage suppose comme hypothèse de base qu'à deux débits identiques de la source correspondent deux états identiques de la réserve. Cette hypothèse, sans laquelle tout calage par cette méthode serait impossible, reste discutable dans le cas d'un réservoir aussi important et hétérogène que celui de la Fontaine de Vaucluse, mais, compte tenu de la grande durée de la période de calage, sa validité semble pouvoir être acceptée.

Celle-ci a été testée en appliquant le modèle à la totalité de la période 1961-1972.

La comparaison des volumes d'écoulement mesurés et des volumes de pluie efficace calculés (alimentation) donne, pour de longues périodes, des écarts très faibles (2 à 10 %). Par contre, la dispersion des résultats est plus grande lorsque l'on considère des épisodes de crue isolée. Il semble que la principale cause de ces écarts soit due à la grande hétérogénéité spatiale des précipitations dont la faible densité du réseau pluviométrique et le caractère schématique de la méthode de pondération utilisée ne rendent compte que partiellement.

Détermination de la fonction de transfert du système (par déconvolution)

Dans un système linéaire il existe une relation linéaire – appelée fonction de transfert – entre une fonction "entrée" et une fonction "sortie".

Le débit à la Fontaine de Vaucluse n'est pas une fonction linéaire de la pluie efficace sur son bassin versant car les écoulements karstiques ne suivent pas des lois linéaires. Il est cependant possible de déterminer par un programme de déconvolution la fonction de transfert – appelée hydrogramme unitaire – qui reconstitue le mieux les variations du débit à la source à partir des valeurs de la pluie efficace.

La figure 3 présente l'hydrogramme unitaire calculé à partir des données hydrométéorologiques journalières de Novembre 1967 à Mai 1968.

Les figures 4–5 présentent la comparaison des débits mesurés et des débits reconstitués aux cours des épisodes février–mars 1968 et juin–juillet 1968.

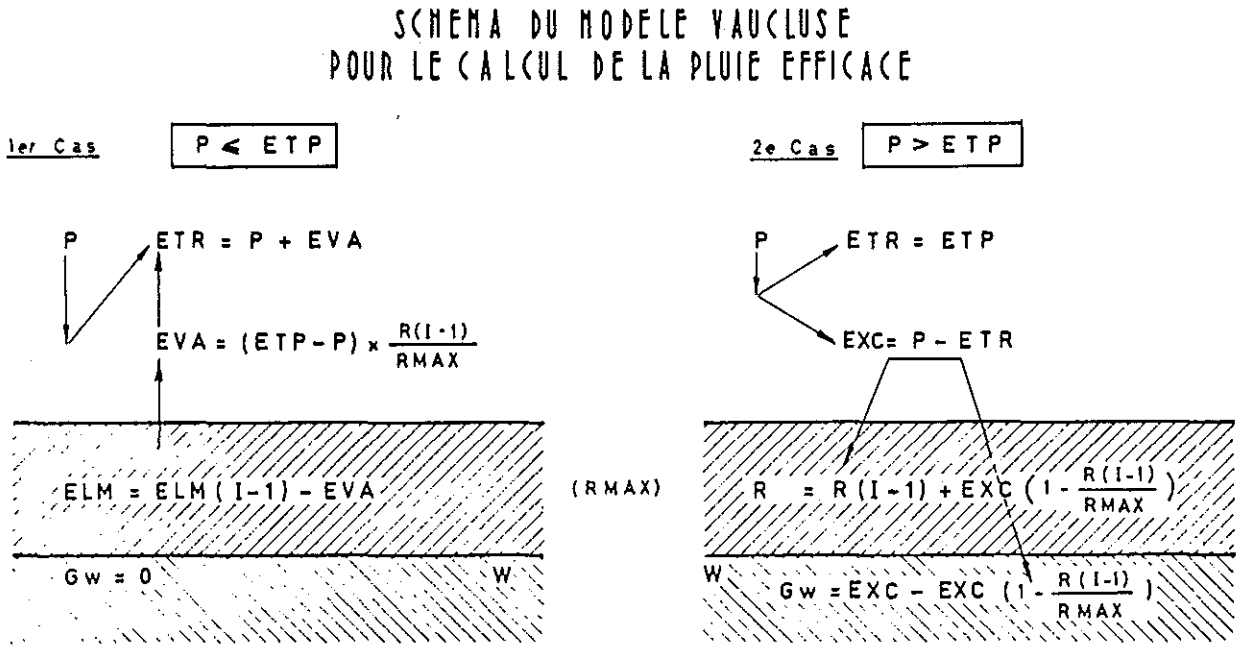

Fig. 2

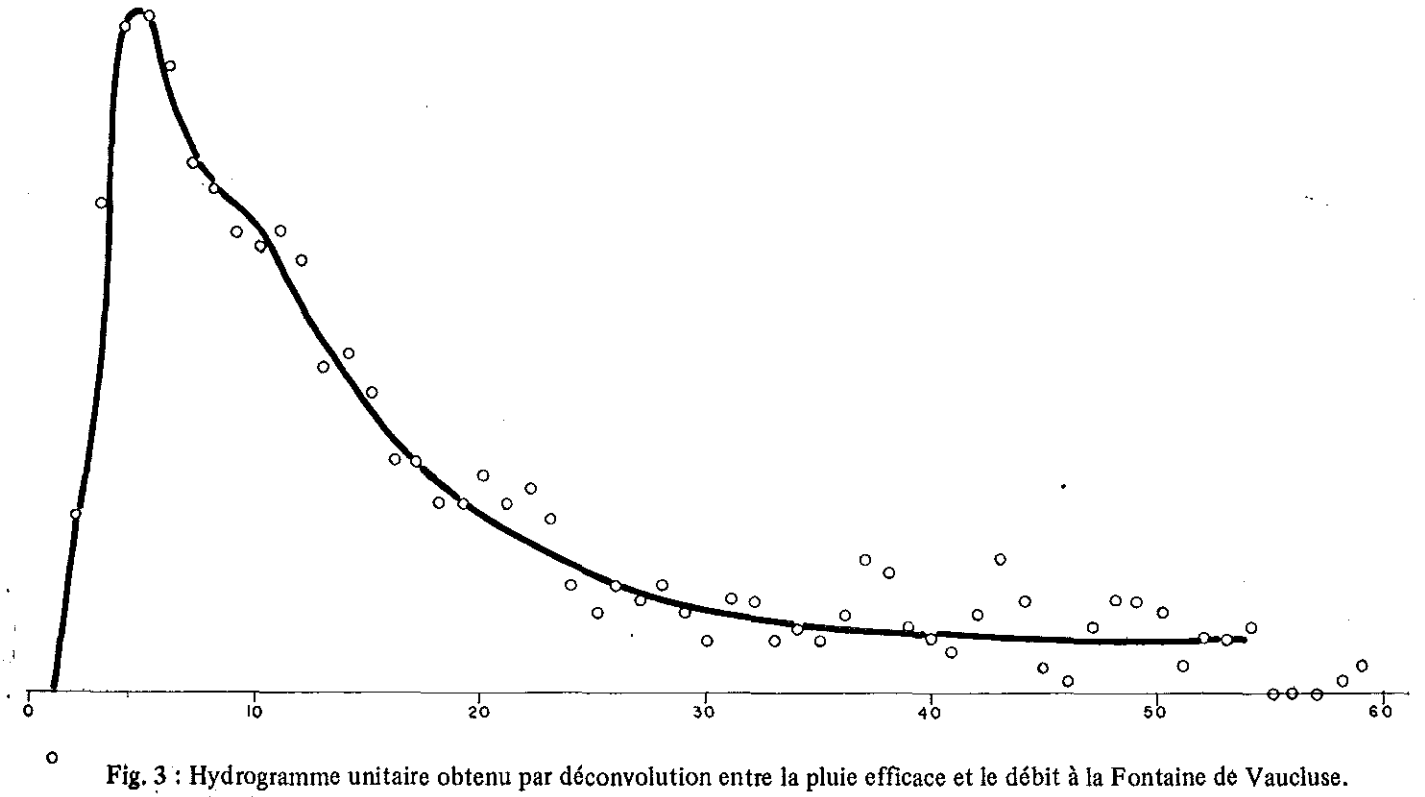

Fig. 3 : Hydrogramme unitaire obtenu par déconvolution entre la pluie efficace et le débit à la Fontaine de Vaucluse. Période de calage : 200 j.

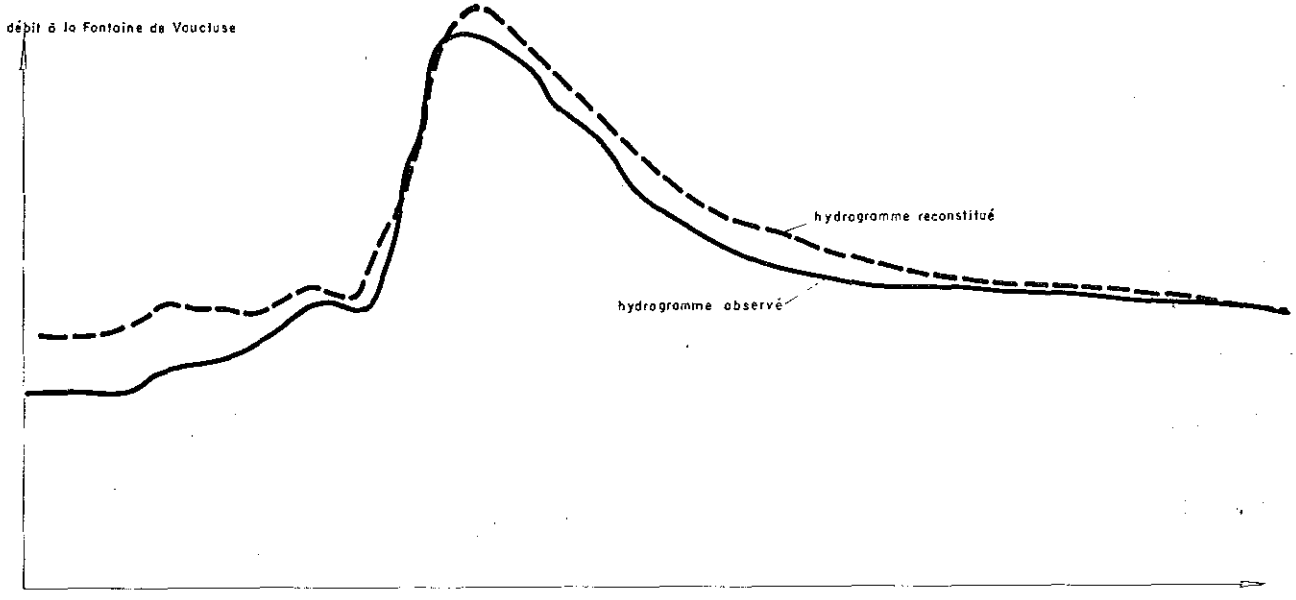

Fig. 4 : Reconstitution de la période février – mars 1968 (incluse dans la période de calage)

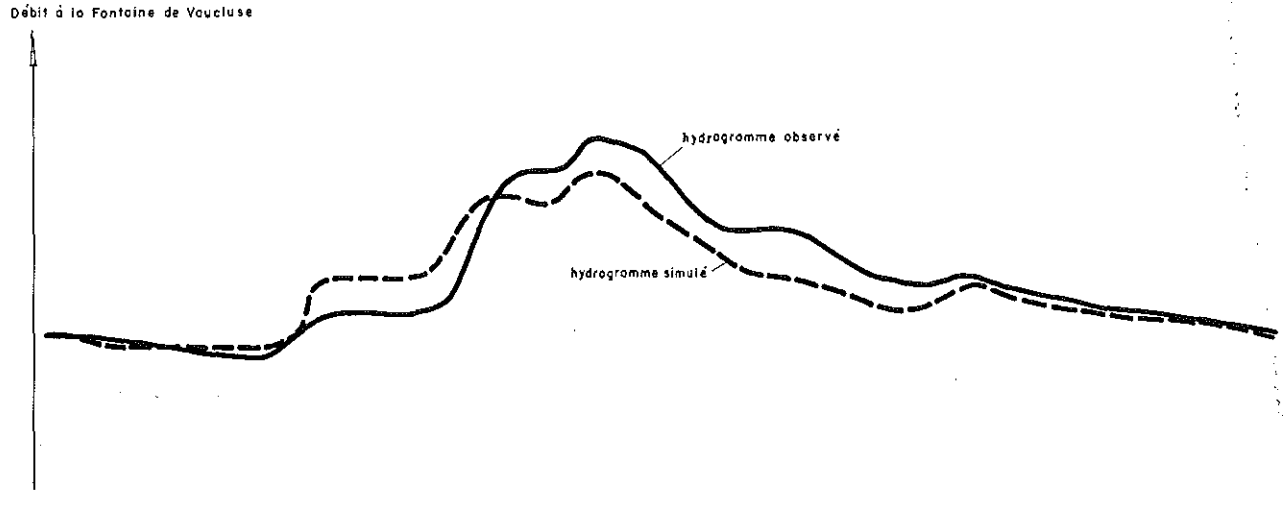

Fig. 5 : Reconstitution de la période juin – juillet 1968 (hors de la période de calage)

IV.3 – Représentation du système par modèle déterministe

Un modèle déterministe basé sur les principes énoncés précédemment est bien réalisable puisque sont connus les 2 éléments nécessaires :

. la structure et les limites du domaine,
. le débit à la Fontaine en relation avec la pluie sur le bassin d'alimentation.

Par tâtonnement, il sera possible d'identifier les paramètres de structure de l'aquifère :

. la perméabilité globale de la matrice poreuse,
. les caractéristiques du réseau fissuré.

Pour effectuer cette idendification, on ne pourra pas utiliser le champ piézométrique de la nappe qui n'est pas connu avec précision, mais seulement en quelques points.Toutefois, on sait apprécier dans quelles limites il peut varier et procéder ainsi à un calage grossier des paramètres de transfert du réservoir.

Mais surtout le modèle global (type MERO) mis au point précédemment permet de déterminer avec une bonne précision, à partir de toute séquence pluvieuse tombant sur le bassin (et mesurable par un réseau bien implanté), la pluie efficace alimentant le réservoir.

A cette entrée, répartie sur le domaine d'infiltration correspond une sortie unique : la Fontaine de Vaucluse, point d'émergence à niveau fixe. Les modulations de la sortie en réponse à l'entrée sont évidemment fonction des seuls paramètres du réservoir.

Pour représenter, de manière satisfaisante, à la fois la matrice poreuse et le réseau fissuré, nous avons choisi un programme de calcul par différences finies qui utilise des mailles de calcul de dimensions variées.

Dans ce modèle, le milieu aquifère est remplacé par un ensemble de mailles élémentaires reproduisant au mieux sa forme géométrique. Au niveau de chacune des mailles, sont introduites les différentes données (conditions aux limites, perméabilité horizontale, hauteur noyée, débit de recharge, etc ...). Le programme de calcul détermine, en fonction de divers paramètres introduits et suivant les lois de l'hydraulique souterraine, les débits échangés entre mailles ainsi que les hauteurs piézométriques dans chacune d'elles afin que le bilan hydraulique soit équilibré.

Le modèle a été divisé d'abord en un réseau de 20 mailles carrées de 9 km de côté chacune dont les limites anguleuses correspondent au mieux aux limites du bassin étudié (figure 1). 14 de ces mailles couvrent la zone d'affleurement des calcaires aquifères (zone 1) et 6 la zone occupée par les formations imperméables du toit de l'aquifère (zone 2).

Afin de reproduire avec plus de précision la zone de l'exutoire et le "réseau fictif" de drains, les grandes mailles (mailles du 1er ordre) ont été subdivisées en mailles de plus petites dimensions.

La figure 6 est un plan du maillage.

Calage en régime permanent

Un premier calage a été tenté en faisant l'hypothèse que, sur une période assez longue, on peut supposer que le régime est permanent, c'est-à-dire que la pluie efficace provenant des précipitations sur le bassin d'alimentation et le débit de la Fontaine de Vaucluse, ont tous les deux la même valeur

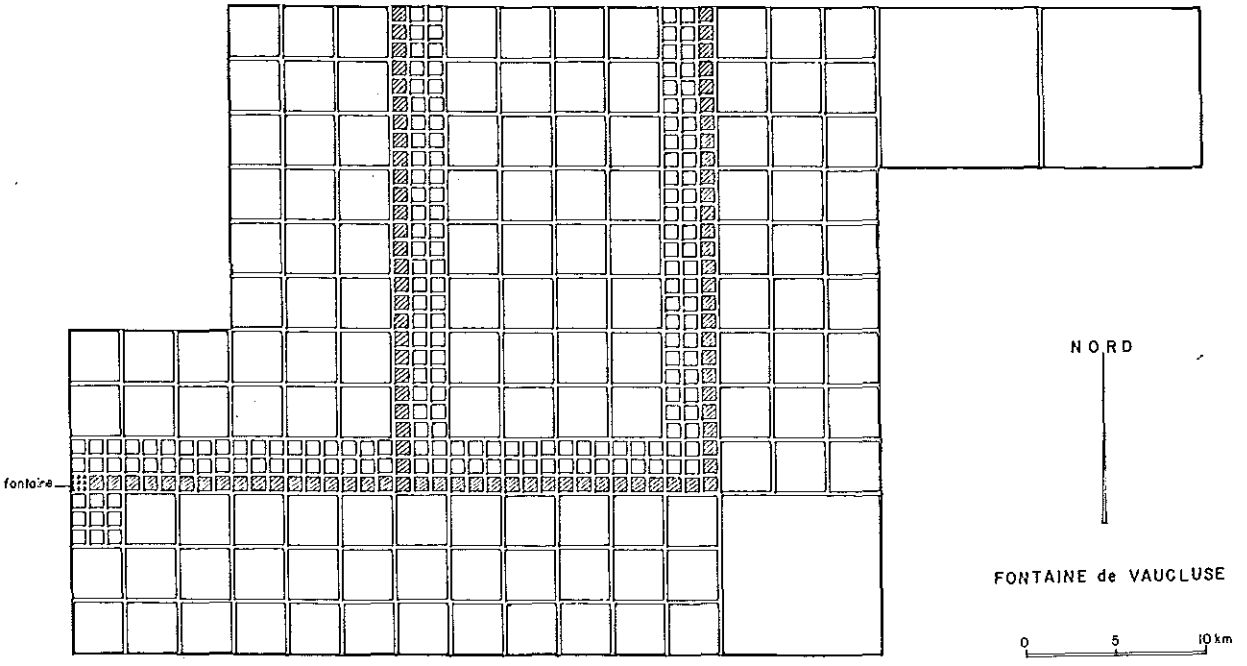

Fig. 6

constante au cours du temps.

Nous avons choisi un programme de calcul en régime permanent et à transmissivité constante en chaque point.

Le calage ne peut s'effectuer que sur l'allure générale du champ piézométrique calculé que l'on contraindra à rester voisin du champ moyen réel que l'on peut déduire des quelques points connus et des bornes naturelles qui le limitent (cotes de débordement, cotes de dénoyage, etc ...). Il ne permettra de déterminer qu'un ordre de grandeur des transmissivités.

Après un examen des pluies efficaces et des débits, nous avons retenu la valeur moyenne de 40 mm par mois qui correspond à un débit de 17,5 m^3/s et à une différence de charge de 10 m entre le forage du Chêne et la Fontaine.

On s'aperçoit qu'il n'est pas possible de déterminer de façon unique les transmissivités de la matrice poreuse et des drains qui correspondent à la différence de charge observée entre le forage du Chêne et la Fontaine. En effet, pour un couple de transmissivités de la matrice et des drains respectivement de 10^{-2} m^2/s et 10 m^2/s, la différence de charge est de 9,86 m ; pour le couple de valeur 10^{-1} m^2/s et 10 m^2/s, on obtient une différence de charge entre le forage du Chêne et la Fontaine de 9,97 m. Il est donc nécessaire de faire une étude en régime transitoire.

Calage en régime transitoire

Le modèle global de convolution a confirmé que les variations de charges et de débits de la nappe sont fonction linéaire des variations de pluies efficaces. Pour chaque couple de transmissivité, d'emmagasinement de la nappe et du réseau de drains, nous avons donc déterminé un hydrogramme unitaire mais cette fois en utilisant le modèle déterministe.

Connaissant cet hydrogramme unitaire et l'évolution de la pluie efficace pendant une période donnée, il est possible de calculer par convolution l'évolution du débit à la Fontaine de Vaucluse pour cette période de manière plus économique que par l'utilisation directe du modèle déterministe.

Avant le début d'une simulation, il est nécessaire que la nappe soit en équilibre ou en pseudo-équilibre. Nous avons donc choisi de reproduire les débits et les charges de mois de février et mars 1968 et de mai et juin 1968 qui présentent des conditions initiales assez stables avant une brusque crue, suivie d'une décrue régulière.

Les meilleurs résultats, présentés sur la figure 7 et figure 8 ont été obtenus pour les valeurs suivantes des paramètres :

. **matrice poreuse :**

transmissivité : 10^{-1} m^2/s, soit une perméabilité de 10^{-3} m/s avec une puissance de 100 m.

emmagasinement : 10^{-3}

. **réseau de drains :**

transmissivité : 5 m^2/s pour une largeur de 3 000 m

emmagasinement : 10^{-3}

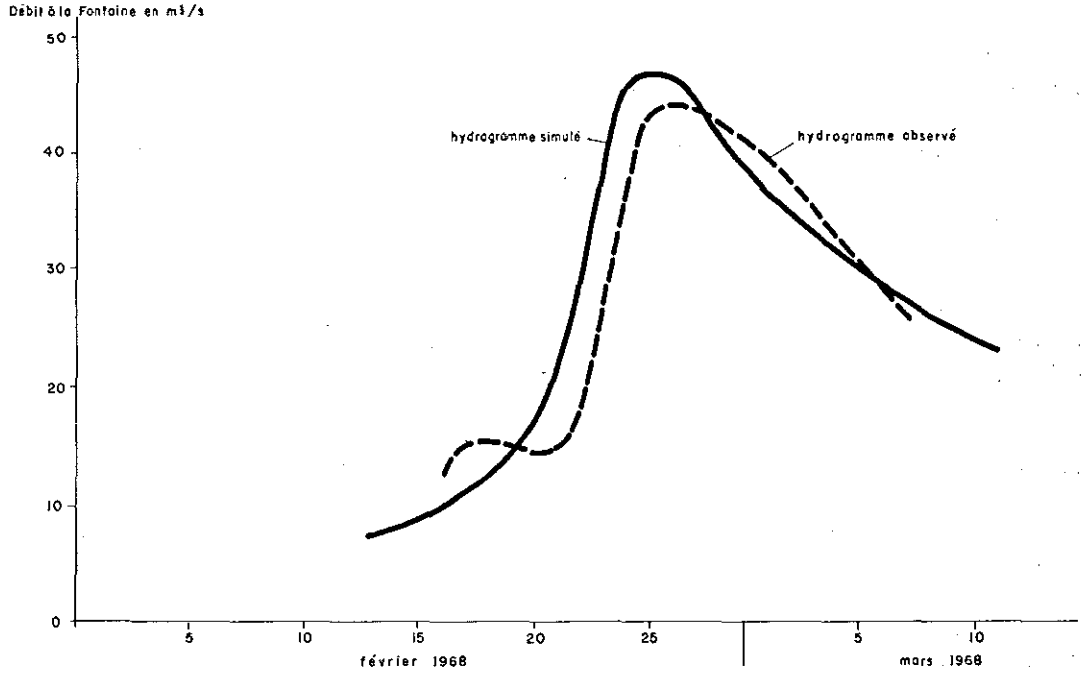

Fig. 7 : Reproduction de la période février – mars 1968

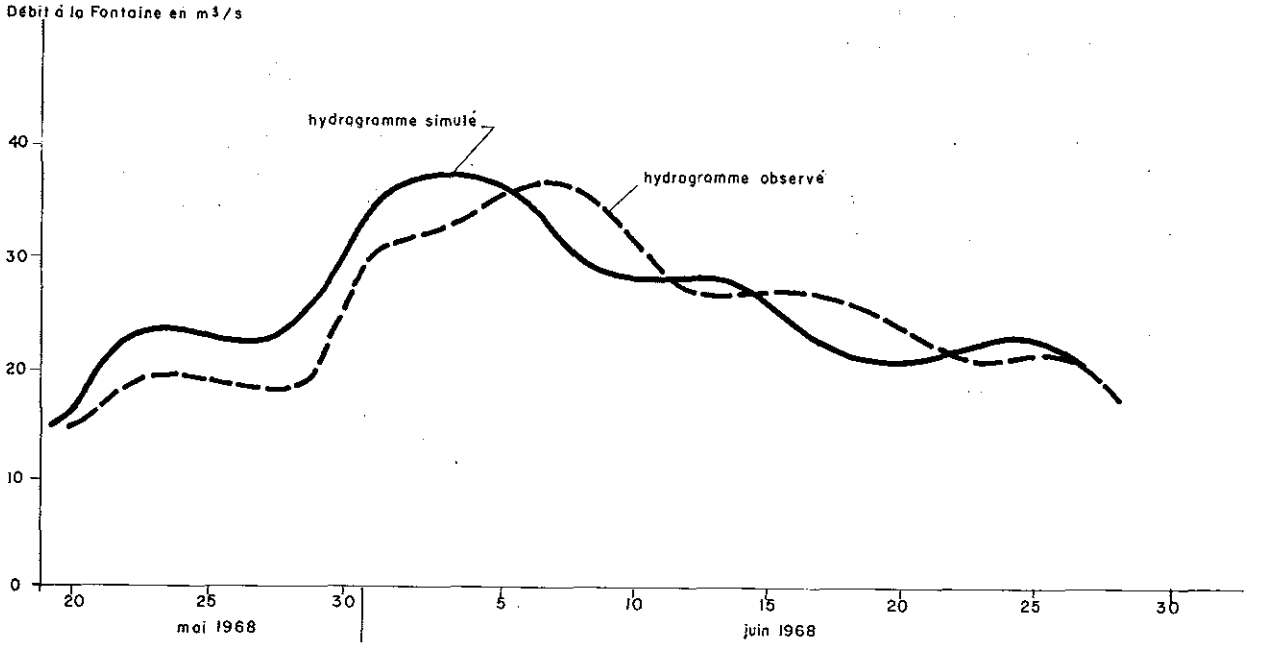

Fig. 8 : Reproduction de la période mai – juin 1968

Exemple d'exploitation du modèle

Le modèle étant calé, son principal intérêt par rapport à un modèle global est qu'il est possible de l'utiliser pour prévoir le comportement du système sous l'influence de nouvelles conditions aux limites.

Notamment, celles que l'on peut envisager dans le cadre d'un projet de surexploitation saisonnière de la source, opération qui peut se faire selon les deux modes suivants :

. modification du niveau d'émergence (par galerie avec ou sans siphonage) et débit variable ;

. accroissement du débit par pompage et donc niveau d'émergence variable.

Considérons par exemple le cas d'une surexploitation par pompage (figure 9) : pour pomper un débit Q_{ex} dans une source il est nécessaire de prélever tout le débit naturel Q_N augmenté du débit excédentaire Q_{ex} ; il est possible alors de restituer intégralement le débit naturel Q_N et de conserver le débit Q_{ex}.

La figure 10 montre l'évolution de la surface libre au droit de la source, simulée par le modèle, pour un prélèvement Q_{ex} égal à 1,5 m^3/s. Deux hypothèses ont été représentées :

. le captage au cours d'un étiage de 8 m^3/s, c'est-à-dire un étiage moyen, correspondant à une hauteur de + 87 NGF au sorguomètre,

. le captage au cours d'un étiage de 4 m^3/s, correspondant à une hauteur de + 84 NGF au sorguomètre, c'est-à-dire l'étiage de 1967, le plus sévère jamais renregistré.

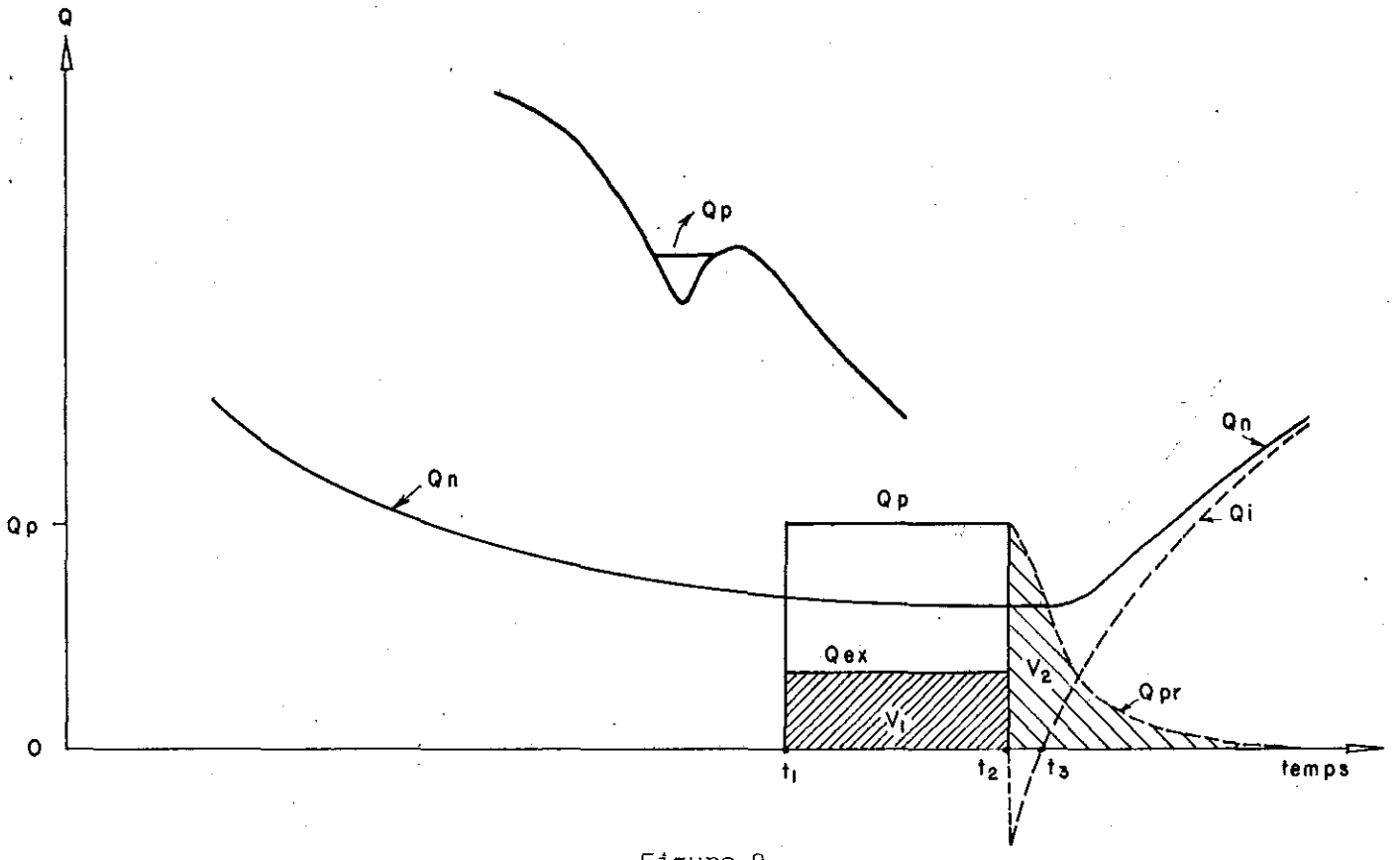

Figure 9

Qn ——— débit naturel des sources

Qp ┌──┐ débit pompé total, constant entre t_1 et t_2

Qex débit pompé en excédent du débit naturel (= débit disponible si Qp - Qex doit être restitué pour conserver le débit naturel)

Qpr préjudice différé affectant le débit naturel après arrêt du pompage en t_2 (entre t_2 et t_3, de préjudice est plus grand que le débit naturel : $t_3 - t_2$ est le retard de reprise de l'écoulement de la source parès arrêt du pompage, qui correspond au temps de remontée du niveau rabattu jusqu'au niveau d'émergence ; $t_3 - t_2$ peut être très court)

Qi — — — — débit de la source influencé par l'effet différé du pompage après t_2

V_1 volume pompé en excédent (disponible)

V_2 (= V_1) volume du préjudice de l'écoulement après arrêt du pompage

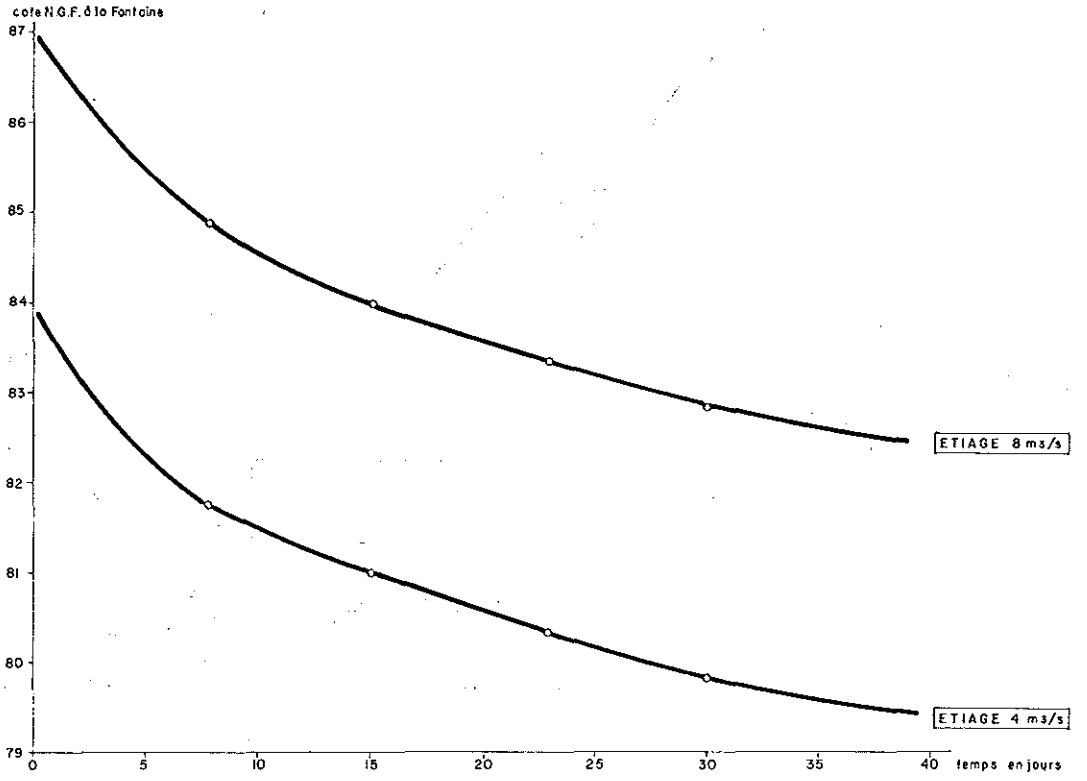

Fig. 10 : Simulation d'un captage supplémentaire de 1,5 m^3/s

CONCLUSIONS

Les caractères spécifiques des aquifères karstiques ne les empêchent pas d'être schématisables par des modèles non seulement explicatifs mais également utilisables pour simuler des actions projetées, notamment des captages. Mais les connaissances accessibles sur leur structure et leur fonctionnement assez différentes de celles qui se rapportent aux aquifères continus classiques nécessitent une démarche d'étude et de modélisation originale qui privilégie les conditions aux limites.

La démarche proposée consiste principalement en un "couplage" entre les modèles globaux (qui s'avèrent donc utiles mais ne constituent pas par eux-mêmes des outils d'étude) et les modèles déterministes à paramètres hydrodynamiques employés couramment pour les aquifères continus.

Dans cette voie des progrès restent à accomplir surtout sur deux plans :

– affinement des modèles globaux par une définition plus exacte des "précipitations efficaces" et par une prise en compte de la régionalisation possible des apports variables.

– modélisation de structures plus complexes (systèmes bi-couches, systèmes compartimentés) avec introduction éventuelle de conduits à relations charge/débit non linéaire.

Pour améliorer la représentativité des modèles de système karstique le premier objectif n'est pas le moins important, car la possibilité pratique de décrire plus en détail la structure interne du système et de mesurer séparément des potentiels dans les conduits et dans la matrice perméable sera toujours très restreinte.

La reproduction satisfaisante des variations de débit connues aux exutoires demeurera de toute manière le meilleur critère pour apprécier la représentativité "globale" d'un modèle paramétrique, ce qui n'est pas en pratique limitatif, car c'est souvent sur ces seules conditions qu'il est possible, et que l'on projette effectivement d'agir.

OBSERVATION DE Monsieur MANGIN – C.N.R.S.

Le modèle que vous proposez reste un modèle global. Ce que vous montrez c'est que votre modèle, comme bien d'autres, possède des propriétés que possède également le karst. Toutefois, il prend de telles libertés par rapport à ce que l'on connait des karsts qu'il ne parait pas permis de concevoir qu'il rend compte des mécanismes de fonctionnement du karst. Je pense qu'il est important de le préciser.

REPONSE DE Monsieur BONNET :

Le modèle est certes semi-global en ce qu'il représente les conduits par un "milieu poreux équivalent" et qu'il n'est possible que de représenter l'effet d'un réseau dont on ne peut au mieux, qu'apprécier la longueur. Toutefois, il semble probable et il s'est confirmé lors de simulations qui ont été faites qu'une telle représentation est suffisante pour rendre compte des débits à l'exutoire.

Mais surtout elle devrait permettre, ce que ne peuvent pas les modèles globaux du type boite noire, de simuler l'effet de changements des conditions au niveau de cet exutoire. Il reste évidemment à vérifier le degré de représentativité de ce type de modélisation par des expériences en vraie grandeur sur le site ou des sites comparables.

OBSERVATION de Monsieur SIMEONI

Peut-on estimer que tout se passe comme si l'écoulement était linéaire ?

REPONSE DE Monsieur BONNET :

Oui, c'est une hypothèse de base qui permet de remplacer un conduit par un milieu poreux équivalent présentant une transmissivité fonction de la dimension de la maille et de la conductivité du conduit.