



Prévision de grandeurs hydrologiques par les méthodes de convolution

Dominique Thiéry

► To cite this version:

Dominique Thiéry. Prévision de grandeurs hydrologiques par les méthodes de convolution. Oxford Symposium : Hydrological forecasting, Apr 1980, Oxford, Royaume-Uni. pp.325-332. hal-01070991

HAL Id: hal-01070991

<https://brgm.hal.science/hal-01070991>

Submitted on 2 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.

Prévision de grandeurs hydrologiques par les méthodes de convolution

D. THIERY Département Hydrogéologie, SGN, BRGM, Orléans, France

Résumé. La notion d'hydrogramme unitaire qui est contestable et contestée peut être adaptée à la simulation en continu des débits de rivières ou de sources. Par analogie il est possible de définir la notion de 'limnigramme unitaire' qui est la variation du *niveau* d'une nappe résultant d'une *infiltration* unitaire. Connaissant la séquence d'infiltrations au jour d'émission de la prévision il est alors possible de calculer l'évolution future du niveau piézométrique suivant différents scénarios probables d'infiltration à venir. L'inertie des nappes étant souvent considérable il est ainsi possible de prévoir les niveaux piézométriques jusqu'à six mois à l'avance. Par combinaison d'un hydrogramme unitaire et d'un limnigramme unitaire il est possible d'identifier la relation de convolution niveau de nappe–débit de source ou débit de source–niveau de nappe. La prévision peut alors être émise plus rapidement et plus précisément car il n'est plus nécessaire d'évaluer l'infiltration sur le système hydrologique.

Forecasting hydrological quantities by convolution methods

Abstract. The concept of the unit hydrograph which is questionable and disputed may be adapted to the continuous simulation of river and spring discharges. Similarly it is possible to define the concept of 'unit limnigraph' which describes the variations of the *level* of an aquifer recharged by a unit *infiltration*. Knowing the past sequence of infiltration it is then possible to compute the future evolution of the water level according to different scenarios of forecast infiltration. As the aquifer inertia is often very large, it is then possible to predict the water level as much as six months ahead. Combining a unit hydrograph and a unit limnigraph a convolution relationship of water level–spring discharge or spring discharge–water level may be derived. In this case the forecast may be carried out faster and more precisely because it is not necessary to compute the infiltration on the hydrological basin.

INTRODUCTION

Il y a une cinquantaine d'années que le schéma de l'hydrogramme unitaire a été proposé par Sherman (1932). Il s'agissait à l'origine d'étudier la transformation des précipitations naturelles en débit dans un cours d'eau. En fait, l'hydrogramme unitaire, d'une durée de quelques heures généralement, se rapportait surtout au ruissellement superficiel. Le débit de base du cours d'eau, considéré comme un phénomène parasite, n'était pas pris en compte. L'hydrogramme unitaire était employé pour calculer des pointes de débit instantané pendant lesquelles le débit de base représentait une part négligeable ou constante.

Nous nous proposons de montrer qu'il est possible d'utiliser une approche plus générale pouvant être utilisée pour calculer, non seulement des débits, mais aussi des niveaux piézométriques à partir de précipitations, et des débits à partir de niveaux piézométriques.

REPONSE IMPULSIONNELLE D'UN COURS D'EAU

Une approche un peu semblable à celle de l'hydrogramme unitaire a été développée beaucoup plus récemment. La méthode de la réponse impulsionnelle suppose qu'un bassin versant de quelques dizaines à un millier de kilomètres carrés peut être représenté par un système linéaire invariant dont *l'excitation* est la pluie efficace — c'est à dire la fraction de la pluie qui n'est pas évapotranspirée par le sol et la végétation — et la *réponse* le débit moyen journalier.

Les différences avec la méthode précédente sont les suivantes:

(1) Le débit considéré est un débit moyen journalier, il comprend donc — surtout en étiage — une part non négligeable de débit de base.

(2) L'excitation n'est plus la pluie mais la pluie *efficace*. La différence est significative, surtout pendant les mois à forte évapotranspiration et faibles précipitations — les mois d'avril à septembre en climat tempéré pendant lesquels la pluie efficace est généralement nulle.

La réponse du système linéaire est alors valable en toute saison, au cours de l'année. Connaissant la réponse impulsionnelle d'un bassin versant il est ainsi possible de prévoir à tout moment le débit résultant de séquences de précipitations efficaces observées ou prévues.

ESTIMATION DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES

Toute méthode fiable peut être utilisée. Des résultats intéressants ont été obtenus par utilisation du modèle de Thornwaite au pas de temps journalier. Ce modèle extrêmement simple mis au point pour les calculs agricoles ne fait intervenir qu'un seul paramètre la réserve disponible pour l'évapotranspiration (RDE). L'évapotranspiration se fait à un taux constant dans la limite de cette réserve qui correspond un peu à la réserve facilement utilisable (RFU) des calculs agricoles (Bonnet *et al.*, 1970). Les précipitations sont efficaces si elles sont supérieures à l'évapotranspiration et si la réserve est saturée.

Le modèle journalier fait intervenir 'l'évapotranspiration potentielle'. La formule *mensuelle* de L. Turc donne généralement des résultats corrects. Les valeurs journalières utilisées sont calculées pour chaque mois par division de l'évapotranspiration potentielle mensuelle par le nombre de jours du mois (Coudrain et Thiery, 1978). La valeur de la réserve est ajustée pour obtenir, sur une longue période, l'égalité des précipitations efficaces et de la lame d'eau écoulée.

Après calage sur un cours d'eau les valeurs de cette réserve sont le plus souvent comprises entre 50 et 150 mm. Il n'est pas possible d'ajuster *a priori* la valeur de la réserve quand la superficie du bassin versant n'est pas connue ce qui est souvent le cas pour les sources. Dans ce cas il convient d'ajuster la réserve *a posteriori* comme dans le cas d'une nappe comme il est expliqué au paragraphe 'Estimation des Précipitations efficaces'.

Identification de la réponse impulsionnelle

La méthode d'identification de la réponse impulsionnelle que nous utilisons est la déconvolution par la méthode des moindres carrés associée éventuellement à un algorithme de 'ridge regression' (ou régression bornée) (Canceill et Thiery, 1978). Une application à quatre bassins versants français (Thiery, 1978a) a montré qu'on parvenait ainsi à identifier une réponse impulsionnelle stable d'une durée utile comprise le plus souvent entre trois et six mois. La Fig. 1 présente, à titre d'exemple, la réponse impulsionnelle de la Marne à Saint-Dizier. Les réponses impulsionnelles identifiées ont été utilisées pour la prévision des étiages, c'est à dire pendant la période où l'on peut prévoir que les précipitations efficaces sont nulles ou faibles (Guilbot *et al.*, 1978).

La Fig. 2 présente pour deux cours d'eau les prévisions qui ont été émises en temps réel le 31 mai 1977 pour les mois à venir. Il apparaît que les résultats sont particulièrement bons pour la Fontaine de Vaucluse qui se rapproche en fait plus d'une source que d'un fleuve.

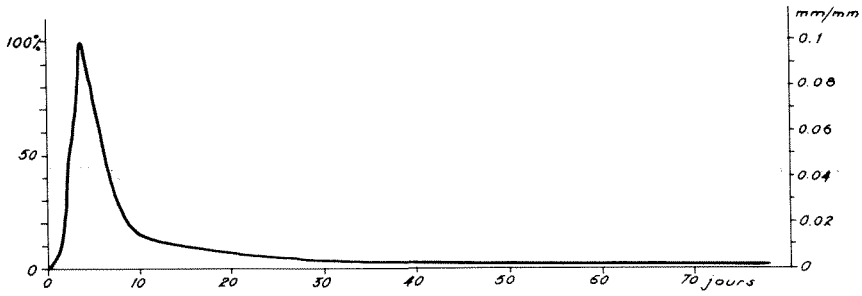


FIGURE 1. Réponse impulsionnelle de la Marne à Saint-Dizier (France).

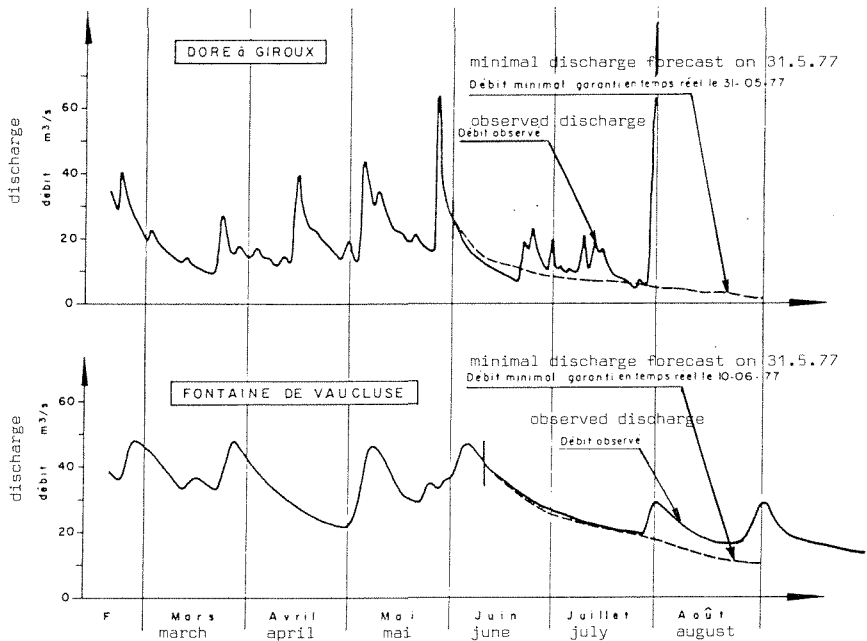


FIGURE 2. Prévision du débit minimal garanti de deux cours d'eau français.

REPONSE IMPULSIONNELLE D'UNE NAPPE RECHARGÉE PAR LA SURFACE

Les variations de niveau d'une nappe libre sont régies par les équations classiques de l'hydrodynamique. Ces équations sont linéaires si ces variations de niveau sont faibles devant l'épaisseur (utile) de la nappe (Fig. 3). Il semble donc logique de représenter une nappe par un système linéaire invariant. L'excitation de ce système est l'infiltration en surface et la réponse est le niveau piézométrique en un point. Il y a naturellement une réponse différente en chaque point.

L'alimentation de la nappe — c'est à dire l'infiltration — est la pluie naturelle à laquelle il faut soustraire l'évapotranspiration et le ruissellement superficiel qui se dirige vers les cours d'eau sans transiter par la nappe. Il est parfois difficile d'estimer la part du ruissellement. La quantité d'eau qui ruisselle à la surface du sol dépend en effet beaucoup de la répartition dans le temps de la pluie et des conditions superficielles du sol. Dans un certain nombre de cas cependant le ruissellement est très faible où même nul. Dans ce cas, l'infiltration est exactement égale aux précipitations efficaces.

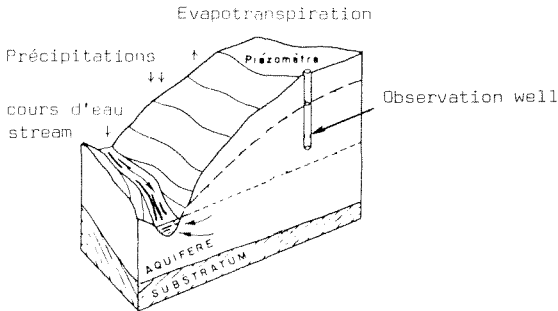


FIGURE 3. Schéma d'un système hydrologique.

Estimation des précipitations efficaces

Le modèle utilisé est le même que pour les cours d'eau. Il n'est cependant pas possible de déterminer à *priori* la valeur de la réserve (RDE) du sol par un bilan d'eau. Deux paramètres physiques essentiels sont en effet inconnus: le niveau de base et le coefficient d'emménagement de la nappe. La valeur de la réserve du sol est celle qui permet d'obtenir la meilleure simulation possible des niveaux piézométriques. Ce sont les *variations* relatives de l'infiltration et du niveau piézométrique qui permettent de déterminer cette réserve.

Identification de la réponse impulsionnelle d'une nappe

Un premier essai d'identification de réponse impulsionnelle infiltration—niveau a été réalisé au pas mensuel dans la nappe de la craie de Haute Normandie (Roux et Thiery, 1978). Le calcul des précipitations efficaces a été effectué avec une réserve arbitrairement fixée à 100 mm.

L'examen des résultats fait apparaître qu'après une infiltration isolée de courte durée le niveau piézométrique monte pendant trois à cinq mois (temps de montée) avant de redescendre plus ou moins exponentiellement pendant trois à cinq ans (Fig. 4).

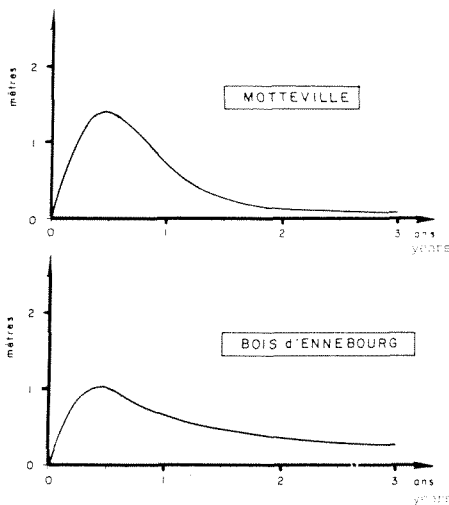


FIGURE 4. Limnigramme unitaire d'une précipitation efficace 100 mm (nappe de la craie de Haute Normandie).

Pour une même infiltration, la remontée maximale atteinte est d'autant plus grande que :

- (1) le coefficient d'emménagement est faible,
- (2) la distance aux rivières drainantes est grande,
- (3) la transmissivité est faible, et
- (4) la perméabilité verticale est grande.

L'étude de la réponse impulsionnelle particulièrement de sa longueur utile permet — avant tout essai de prévision — d'apprécier la sensibilité d'une nappe à une sécheresse. En effet, une nappe dont la réponse impulsionnelle s'étend sur plus de trois ans est peu sensible à une sécheresse isolée (comme l'été 1976) mais beaucoup plus à une succession d'années présentant peu de recharge (période 1971–1973) (voir Fig. 5).

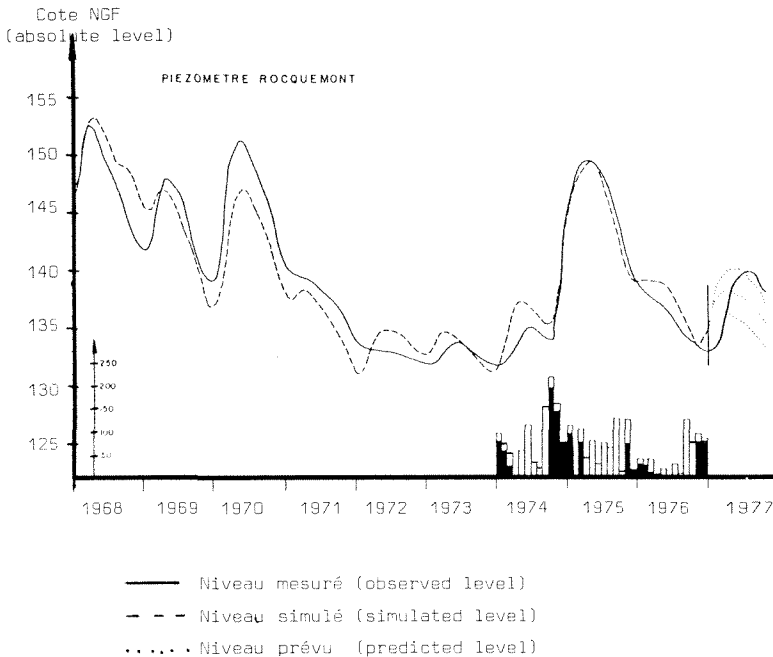


FIGURE 5. Simulation et prévision du niveau du piézomètre Rocquemont situé dans la nappe de la craie de Haute Normandie.

Nous suggérons d'appeler 'limnigramme unitaire' une telle réponse impulsionnelle. C'est en effet le limnigramme résultant d'une infiltration survenue pendant une unité de temps. En fait le limnigramme unitaire ne dépend pas de l'unité de temps si le temps de montée — c'est à dire le temps pendant lequel la nappe monte après une infiltration brève — est au moins 4 à 5 fois plus grand que la durée de l'infiltration. Par exemple, pour une nappe de temps de montée cinq mois, le limnigramme résultant d'un épisode de pluie efficace 100 mm sera quasiment identique que cette pluie efficace soit répartie sur une semaine ou sur un mois. On parlera alors du limnigramme unitaire d'une pluie efficace de 100 mm sans en préciser la durée. Les coefficients d'emménagement des nappes libres étant souvent compris entre 0.5 et 10 pour cent il sera souvent commode de présenter le limnigramme d'une pluie efficace de 100 mm gradué en mètre. On dira par exemple que le niveau d'un piézomètre remonte au maximum de 3.50 m pour 100 mm alors que celui d'un autre piézomètre remonte de 1.50 m.

Prévision de niveau d'un piézomètre ou du débit d'une source

Comme pour les cours d'eau, il est possible, après identification d'une réponse impulsionnelle, de calculer les niveaux résultant d'une séquence d'infiltrations passées ou prévues. La Fig. 5 montre les résultats de la simulation de la période 1968–1976. Il apparait bien que globalement calé, le modèle ne donne pas des résultats satisfaisants pendant la période 1972–1974. Le niveau calculé fait en effet apparaître des recharges alors que le niveau observé reste constant. De plus en 1977, le niveau observé remonte plus tard que prévu.

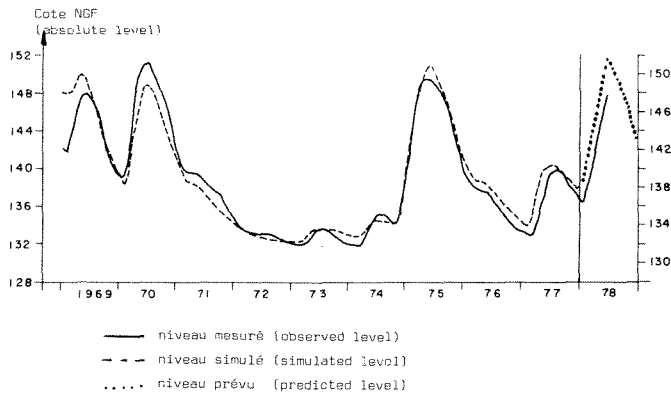


FIGURE 6. Simulation et prévision du niveau du piézomètre Rocquemont après ajustement de la réserve du sol.

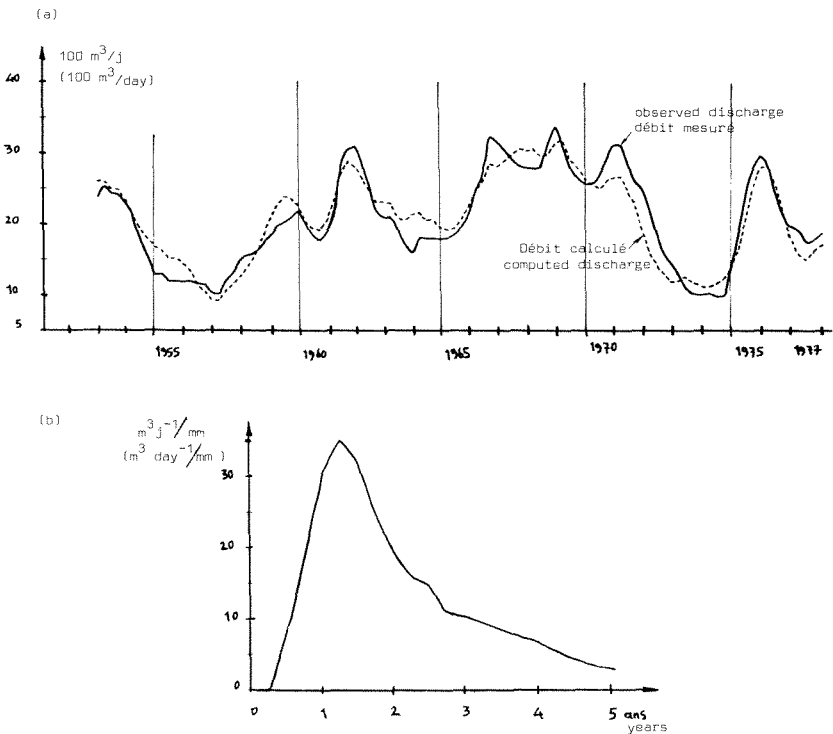


FIGURE 7(a) Simulation des sources de Saint-Laurent (Normandie); (b) réponse impulsionnelle.

Un calcul de précipitations efficaces avec d'autres valeurs de la réserve du sol a permis d'obtenir un très bon calage (Fig. 6) sur toute la période de mesures en particulier pendant une période humide 1977 suivant une très longue période sans infiltration (1976). La réserve du sol identifiée est comprise pour la plupart des piézomètres entre 300 et 400 mm c'est à dire une valeur généralement beaucoup plus élevée que pour les cours d'eau usuels.

Le débit d'une source se déduit par une relation linéaire du niveau piézométrique de la nappe qui l'alimente. Il est donc possible d'utiliser la même méthode. La Fig. 7 montre la réponse impulsionnelle des sources de Saint-Laurent (Normandie, France) et la reconstitution du débit obtenue.

REPOSE IMPULSIONNELLE NIVEAU-DEBIT

Il est parfois possible d'identifier dans le même système aquifère des réponses impulsionnelles pluie efficace-débit de source et pluie efficace-niveau de nappe. Il existe alors une réponse impulsionnelle 'niveau de nappe-débit de source' ou 'débit de source-niveau de nappe' suivant les cas (Thiery, 1978b).

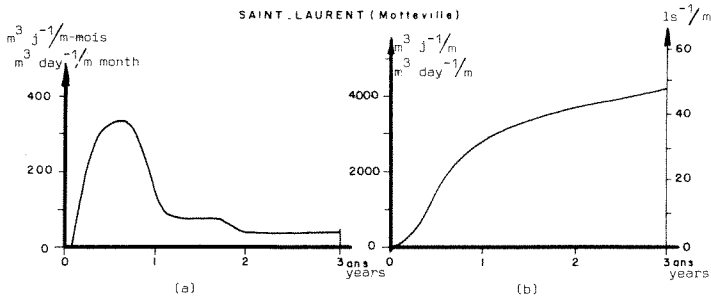


FIGURE 8. Réponse des sources de Saint-Laurent (a) à une impulsion de niveau, et (b) à un échelon unitaire de niveau.

La Fig. 8(a) montre la réponse du débit des sources de Saint-Laurent à un relèvement de 1 m de la nappe maintenu pendant un mois à l'emplacement du piézomètre Motteville. La Fig. 8(b), plus physique, montre l'accroissement de débit résultant d'un échelon unitaire de 1 m de niveau.

Ce type de relation est particulièrement intéressant car l'excitation est une suite de niveaux piézométriques qui peuvent être mesurés sans ambiguïté. Il n'est pas nécessaire de procéder à un calage de l'excitation comme dans les cas précédents ce qui facilite la procédure de calcul et permet d'émettre une prévision plus opérationnelle.

CONCLUSION

Le principe de l'hydrogramme unitaire peut être généralisé sans difficulté et étendu aux relations infiltration-niveau de nappe ou niveau de nappe-débit de source. Connaissant la réponse impulsionnelle d'un système, il est ainsi possible de prévoir à tout moment, en temps réel, la réponse à une séquence d'excitations observées ou prévues. La méthode d'identification de la réponse impulsionnelle par déconvolution par la méthode des moindres carrés est efficace et fournit des résultats stables à la seule condition que les observations soient en nombre suffisant.

- Bonnet, M., Delarozière Bouillin, O., Jusserand, C. et Roux, P. (1970) Calcul automatique de bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de Thornwaite et Turc. *Rapport BRGM 70 SGN 107 HYD, Orléans, France.*
- Canceill, M. et Thiery, D. (1978) Le programme IDRIC (Identification de la Réponse Impulsionnelle dans la Convolution). *Rapport BRGM 78 SGN 039 HYD, Orléans, France.*
- Coudrain, A. et Thiery, D. (1978) Estimation de pluies efficaces avec l'algorithme de Turc; influence du pas de temps et de l'utilisation de données moyennes. *Rapport BRGM 78 SGN 640 HYD, Orléans, France.*
- Guilbot, A., Girard, G. et Thiery, D. (1978) Etude de l'efficacité relative et du domaine d'application de différents modèles hydrologiques pour prévoir les étiages. *Société Hydrotechnique de France XV^e journées de l'Hydraulique, Toulouse, France.*
- Roux, J. C. et Thiery, D. (1978) Premier essai de prévision à moyen terme des niveaux d'étiage des nappes libres par convolution. Application à la nappe de Haute Normandie. *Colloque régional sur Hydrogéologie de la Craie du Bassin de Paris, Rouen, France.*
- Sherman, L. K. (1932) Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method. *Engng News Rec.* 108, 501–505.
- Thiery, D. (1978a) Application à quatre bassins hydrologiques des méthodes de prévision des étiages par convolution. *Rapport BRGM 78 SGN 621 HYD, Orléans, France.*
- Thiery, D. (1978b) Utilisation d'un modèle 'boîte noire' pour simuler la relation niveau de nappe–débit de source. *Résumé des Principaux Résultats scientifiques et techniques du Service Géologique National pour 1978: RS 707.*