

APPLICATION INFORMATISÉE D'UNE ÉTUDE SUR LE DÉBIT D'ÉTIAGE DANS LA RÉGION DE BADEN-WÜRTTEMBERG, ALLEMAGNE

A. WESSELINK¹, I. HAGEMANN²,
DR S. DEMUTH², DR A. GUSTARD¹,

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet Friend de l'Unesco PHI IV, une étude du débit d'étiage a été réalisée dans la région de Baden-Württemberg (figure 1), Allemagne du Sud-Ouest, utilisant les données provenant de 52 bassins versants jaugés. Cette étude a porté sur l'analyse des statistiques tirées des débits, à savoir :

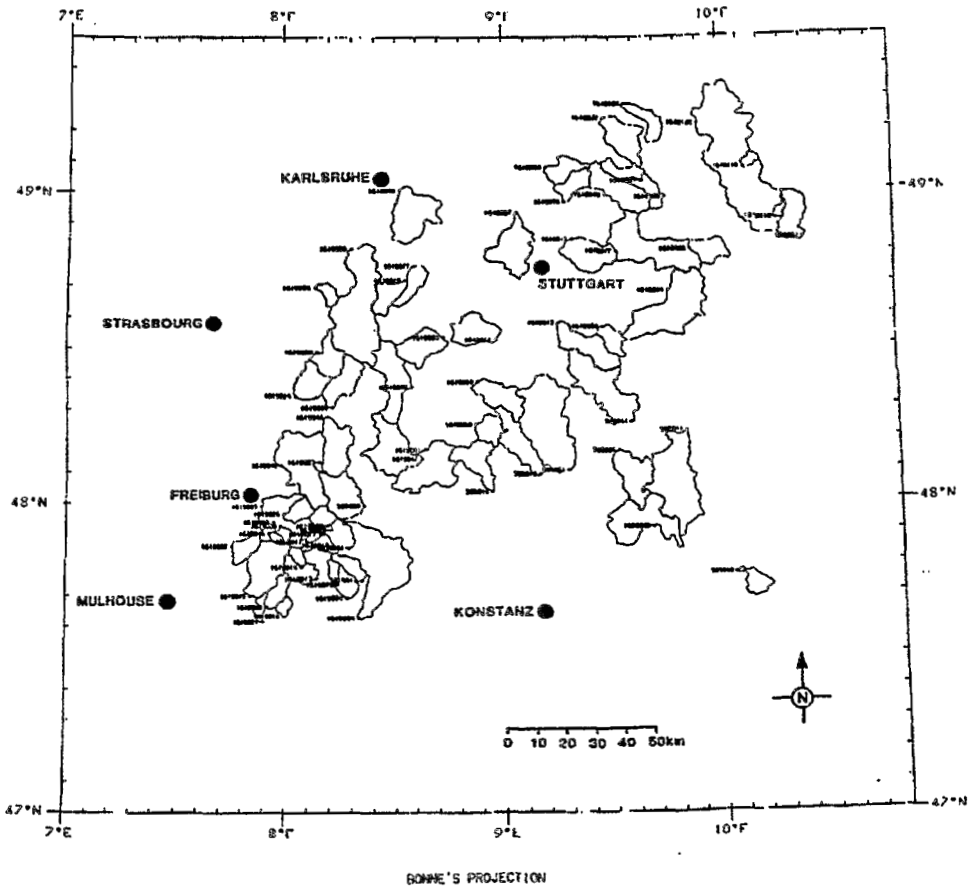
- percentile 95 du débit ;
- débit minimum annuel moyen de 7 jours ;
- indice du débit de base ;
- constante de régression ;
- débit moyen.

La relation entre les statistiques tirées des débits et les caractéristiques des bassins versants a ensuite été examinée. Les facteurs pris en compte sont les suivants : la superficie, la pente, l'utilisation de la terre (forêt, zone urbaine), la densité de drainage, les caractéristiques du sol et des précipitations. Les équations de régression pour l'estimation des statistiques des débits ont donné pour résultat un R^2 compris entre 88 % et 92 %.

Les caractéristiques des bassins versants significatives dans les équations de régression étaient disponibles sous forme digitalisée, telle qu'une discrétisation spatiale de $2,5 \times 2,5$ km ou $1,25 \times 1,25$ km. Le réseau hydrographique de 17 bassins versants sur les 52 étudiés était également sous forme digitalisée. Ces données numériques ont été transférées sur le système *Micro Low Flows*, un logiciel pour micro-ordinateur développé par l'*Institute of Hydrology*, permettant une estimation automatique des caractéristiques du débit d'étiage. Pour chacun de ces 17 bassins versants, les statistiques du débit peuvent être estimées par simple désignation de l'endroit désiré, permettant ainsi aux spécialistes en ressources hydrauliques de gagner un temps considérable.

¹Institute of Hydrology

²Université de Freiburg

**Figure 1**

Bassins versants jaugeés dans la région de Baden-Württemberg qui ont été utilisés pour cette étude.

INTRODUCTION

Pendant la première phase du projet Friend de l'Unesco PHI IV (1985-1989) une analyse régionale de la variabilité des paramètres du débit d'étiage a été menée (GUSTARD *et al.*, 1989, Vol. I). La variabilité du ruissellement dans la zone étudiée par le projet, comprenant l'Europe du Nord et de l'Ouest, a été décrite en utilisant des cartes et des analyses de régression afin de déterminer la relation entre les indices du débit d'étiage et les caractéristiques des bassins versants (GUSTARD, 1989, GUSTARD and GROSS, 1989). La base internationale du projet, avec des données journalières disponibles pour 1350 stations, a permis de tirer des équations de régression pour la région entière, ainsi que pour des sous-ensembles physiquement distincts, tels que le bassin du Rhin, ou les basses terres des Pays-Bas, de la Belgique et du Danemark.

Même si les caractéristiques des bassins versants ont permis d'expliquer entre 70 et 80 % de la variabilité, il est clair que la compréhension du comportement du débit d'étiage aurait bénéficiée d'une analyse plus détaillée de régions plus petites. En particulier, la relation entre les variables débit d'étiage, sol et géologie n'a pas été résolue de manière satisfaisante. La région de Baden-Württemberg (Allemagne du Sud-Ouest) a été choisie pour la première de ces études en raison de la collaboration étroite existant entre l'université de Freiburg, située dans cette même région, et l'*Institute of Hydrology* à la suite du projet Friend.

Il a été décidé d'entrer les résultats des analyses de régression régionales dans le logiciel *Micro Low Flows* qui permet une estimation gérée par ordinateur du débit d'étiage dans le but de tester sa viabilité dans des pays différents. Ceci a limité le choix des données et des méthodes employées à celles qui étaient, ou pouvaient, facilement être utilisées sous forme digitalisée et appliquées au logiciel. On peut identifier cinq étapes dans l'établissement d'une version-test du progiciel d'estimation du débit d'étiage ; ces étapes seront examinées par la suite.

MÉTHODES

Les données du débit journalier étaient disponibles auprès de la base de données Friend pour 58 bassins versants dans la région de Baden-Württemberg (GUSTARD *et al.*, 1989, Vol.II), et ces mêmes données ont été recueillies pour 25 autres stations. Les données pour 16 stations n'ont pas été prises en compte en raison soit de relevés incomplets ou trop partiels, soit d'une influence humaine excessive sur le régime du débit. À partir des séries de données restantes, une période commune de relevés (1965-1985) a été sélectionnée et pour laquelle 52 stations ont été retenues.

Au cours du projet Friend, une base de données rastérisées du climat et de l'utilisation de la terre a été créée. Ces données consistent en une discrétisation spatiale de $1,25 \times 1,25$ km ou $2,5 \times 2,5$ km par exemple pour :

- la moyenne annuelle des pluies (AAR) ;
- pluie 2 jours avec une période de retour de 10 ans (M10-2D) ;
- le potentiel d'acceptation des précipitations hivernales (Wrap) : 5 catégories ;
- la couverture forestière (Forest) : oui ou non ;
- la couverture urbaine (Urban) : oui ou non ;
- la couverture des lacs (Lake) : oui ou non.

La classification Wrap a été développée lors de l'étude réalisée sur les crues dans le Royaume-Uni (NERC, 1975) afin de répertorier la réponse des sols aux pluies. Cette approche a été choisie, de préférence à une approche basée uniquement sur de « pures » données hydrogéologiques, en raison de l'inexis-

tence d'une série cohérente de données hydrogéologiques. Le système de classification Wrap a été adopté par la *European Flood Study* (GUSTARD, 1983). Cette étude reconnaît cinq types de réponses du sol aux pluies et a permis de répertorier les réponses des bassins versants aux pluies. Il a été reconnu que ce système manque de discrimination (la réponse entre deux classes peut changer par un facteur de 2 ou 3) et de cohérence au-delà des frontières nationales, où différents scientifiques ont interprété les directives de façon différente. Cependant, les classes Wrap étaient les seules caractéristiques du terrain ou hydrogéologiques disponibles sous forme digitalisée.

Les limites des bassins versants ont été converties sous forme digitalisée pour la plupart des stations avec données journalières de la base de données Friend. Elles ont été extraites et digitalisées pour les 25 nouvelles stations. Des algorithmes ont été développés afin de recouvrir automatiquement les limites des bassins versants avec les données rastérisées, donnant ainsi la valeur moyenne du bassin versant ou les pourcentages des différentes classes. En plus des caractéristiques des bassins versants tirées des données rastérisées, la pente (SL1085), l'altitude de la station de jaugeage (HTSTN) et la densité du courant (Folis : nombre de courants s'entrecoupant dans un rayon de 30 cm de diamètre sur une carte au 1:50 000) ont été déterminées manuellement à partir des cartes.

Quatre analyses statistiques codées en Fortran ont été appliquées aux données de débit journalier (*Institute of Hydrology, 1980, GUSTARD et al. 1989*) pour les périodes indiquées plus haut (tableau 1) :

Tableau 1
Résumé des mesures des débits d'étiage

Variable	Number of stations	Mean	Standard Déviation	Range	
				Min	Max
MF (m3.s-1)	52	2,37	2,12	0,173	8,72
Q95 (% MF)	51	22,7	10,0	8,38	58,8
MAM7 (% MF)	52	24,6	11,3	0,087	58,85
BFI	52	0,571	0,137	0,175	0,850
K50	52	0,94	0,044	0,752	0,981

MF-débit moyen, *Q95*-débit dépassé ou égalé 95 % du temps, *MAM7*- moyen des débits minimaux annuels sur 7 jours, *BFI*-indice du débit de base, *K50*-valeur médiane des ratios de décrue.

COURBE DES DÉBITS CLASSÉS (figure 2) :

Graphique de la distribution cumulative des fréquences des débits journaliers, indiquant sous forme de pourcentage le nombre de fois qu'un débit donné est dépassé ou égalé. Le percentile 95 tiré de cette courbe (Q95) a été utilisé dans

cette étude en tant que paramètre du débit d'étiage.

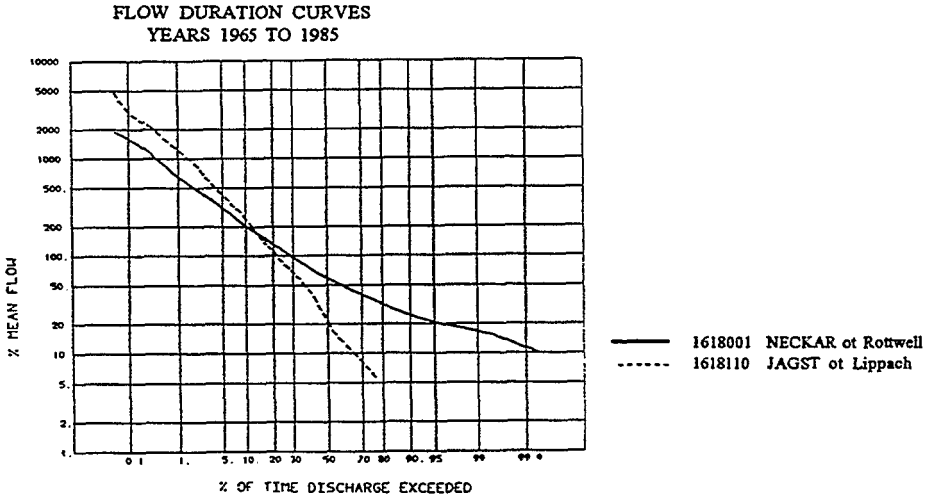


Figure 2

Exemple des courbes des débits classés.

GRAPHIQUE DE LA FRÉQUENCE DU DÉBIT (figure 3) :

Graphique du classement du débit minimal annuel donné pour un nombre de jours n, déterminé selon une distribution Weibull. D'après cette courbe, on peut estimer les périodes de retour des débits d'étiage extrêmes. Le moyen des débits minimaux annuels sur 7 jours (MAM7) a été utilisé dans cette étude en tant qu'indice du débit d'étiage.

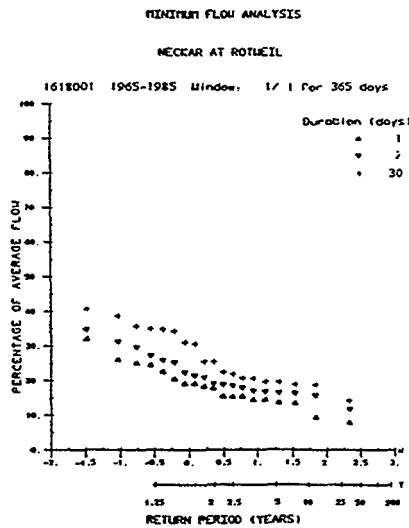
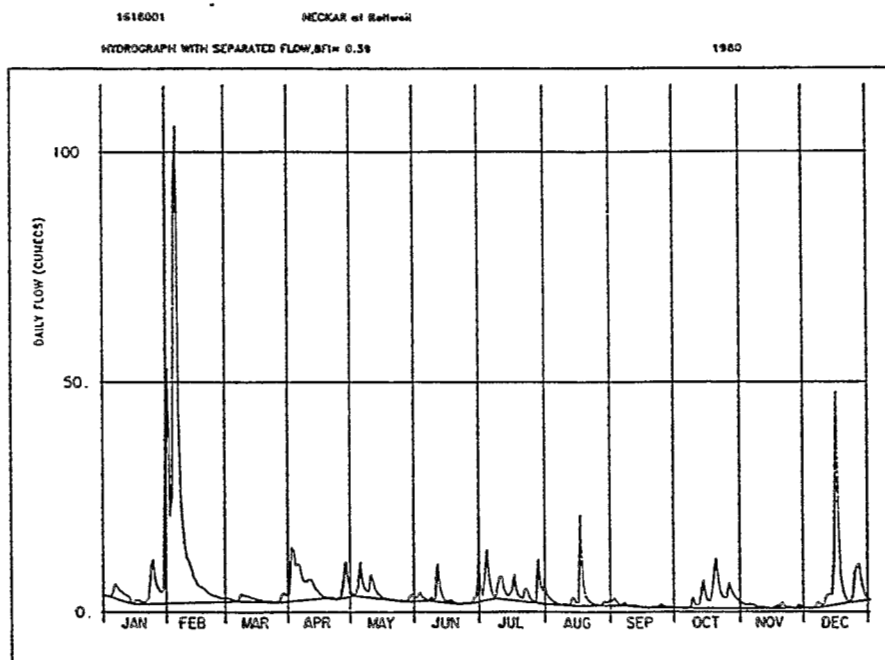


Figure 3

Exemple d'une courbe des fréquences des débits d'étiage

INDICE DU DÉBIT DE BASE (BFI) (figure 4) :

Procédure automatisée pour séparer le débit de base de l'hydrogramme, donnant ainsi la proportion de l'hydrogramme tiré des sources stockées. Ce paramètre, même étant tiré de données du débit journalier, est souvent utilisé comme caractéristique du bassin versant, indiquant la réponse hydrogéologique de ce dernier.

**Figure 4**

Exemple d'hydrographe avec séparation du débit de base

GRAPHIQUE DES FRÉQUENCES DU RATIO DE DÉCRUE (figure 5) :

Graphique de la distribution de la valeur du ratio du débit du courant divisée par le débit obtenu deux jours auparavant. Ce ratio représente la « constante » de décrue sur les deux jours considérés. La valeur médiane des valeurs calculées (K50) a été utilisée dans cette étude comme indice du débit des bassins versants.

L'analyse des données a consisté, dans un premier temps, en une analyse de corrélation des caractéristiques des bassins versants et des indices du débit et, dans un deuxième temps, en une analyse de régression par étape afin de déterminer l'équation de régression optimale. Ces analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel de statistiques SAS.

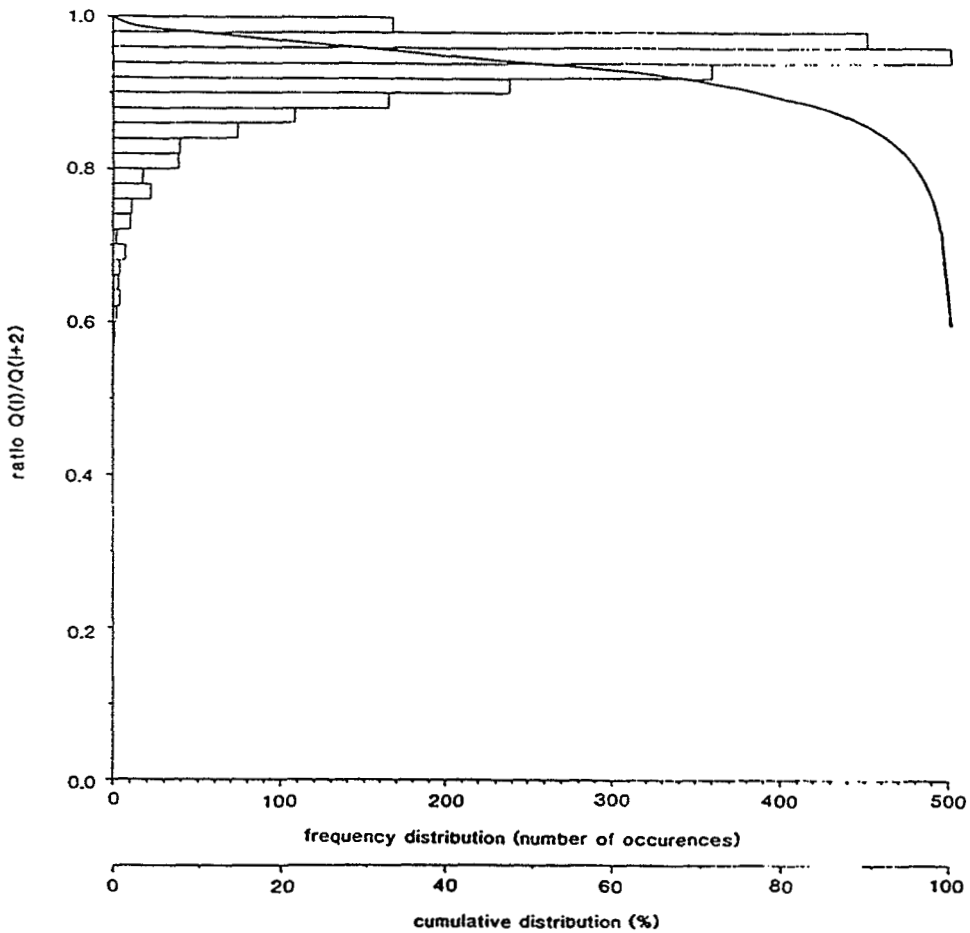


Figure 5

Exemple de la courbe des fréquences des ratios de régression

RÉSULTATS

Une analyse préalable des corrélations des indices du débit avec les caractéristiques des bassins versants (tableau 2) ainsi que l'examen de la distribution des restes ont montré qu'une transformation logarithmique était appropriée à la dérivation des équations de régression régionales.

Les fractions Urban et Soil dans un bassin versant sont fréquemment égales à zéro et, par conséquent, les transformations logarithmiques ont été basées sur (Urban+1) et (Soil+1). Le paramètre d'échelle Area a une corrélation significative avec tous les indices du débit, à l'exception de Q95. Quant aux paramètres

d'utilisation de la terre Urban et Forest, seul Urban est corrélié de manière significative avec un paramètre d'écoulement, Q95. Tous les paramètres d'écoulement sont corréliés de manière significative avec la densité de drainage Folis. Même si le BFI est considéré pour répertorier la réponse hydrogéologique du bassin versant, il n'y a pas de corrélation significative entre le BFI et les trois classes Wrap de la région de Baden-Württemberg (Soil1, Soil2 and Soil4); la seule corrélation significative trouvée étant entre Soil 2 et Q95.

La matrice de corrélation a été utilisée pour tirer des équations de régression reliant les indices de débit d'étiage Q95, MAM7 et K50 aux caractéristiques du bassin versant. Toutes les variables ont été transformées en logarithmes et entrées dans une procédure de régression multiple par étapes. Les analyses ont été faites avec et sans BFI en tant que variable explicative. Les équations de régression préférées sont données dans le tableau 3. Toutes les variables comprises dans les équations sont significatives à 95 %. L'analyse des restes a montré une distribution égale des valeurs, indiquant ainsi que le modèle choisi est approprié. Les variables explicatives dans les équations pour Q95, MAM7 et K50 sont les variables morphométriques Area et la densité de drainage (Folis), la variable climatique de la moyenne annuelle des pluies (AAR), le paramètre d'utilisation du sol (Forest), et, lorsqu'elle est incluse, la variable « hydrogéologique » de l'indice du débit de base (BFI). Avec les variables de débit en m³/s⁻¹, ce résultat serait attendu, car, en général, un bassin versant plus grand aurait pour conséquence, à tous moments, un ruissellement plus grand. La même remarque s'applique à la moyenne annuelle des pluies. L'effet de la forestation sur les débits d'étiage est plus ambigu, mais a généralement pour résultat des débits d'étiage minimums inférieurs (Gross *et al.*, 1989). Le pourcentage de cette variance expliqué par ces variables est donné dans le tableau 4. La variable qui domine est Area, expliquant 67 % de la variance en Q95 et 50 % de la variance en MAM7. L'inclusion de BFI en tant que variable explicative conduit à des modèles améliorés, avec une augmentation du coefficient de détermination (R²) de 7 % pour Q95, 20 % pour MAM7 et 21 % pour K50.

Les équations qui ont été dérivées pour K50 ont un coefficient de détermination bien inférieur à celui pour Q95 et MAM7. Ceci peut être expliqué par le fait que K50 ne dépend pas directement de l'échelle (la taille du bassin versant, la moyenne des pluies) et sera, par conséquent, plus difficile à expliquer.

Tableau 3

Équations de régression reliant les indices des débits d'étiage aux caractéristiques des bassins versants (52 bassins versants, période comprise entre 1965 et 1985)

BFI INCLUS						
(1) Q95	= $3.83 \cdot 10^{-5}$	BFI ^{1.35}	AREA ^{0.837}	AAR ^{0.918}	FOREST ^{0.271}	R ² =87.3 %
(2) MAM7	= $4.22 \cdot 10^{-8}$	BFI ^{2.85}	AREA ^{1.07}	AAR ^{1.47}	FOLIS ^{0.705}	R ² =84.1 %
(3) K50	= $9.45 \cdot 10^{-1}$	BFI ^{0.102}	AREA ^{0.012}			R ² =42.5 %
BFI EXCLUS						
(4) Q95	= $5.44 \cdot 10^{-5}$	AREA ^{0.835}	AAR ^{1.07}	FOREST ^{0.291}	FOLIS ^{-0.627}	R ² =80.3 %
(5) MAM7	= $3.67 \cdot 10^{-10}$	AREA ^{1.24}	AAR ^{2.64}	FOLIS ^{-0.991}		R ² =65.2 %
(6) K50	= 1.06	AREA ^{0.013}	FOLIS ^{-0.053}			R ² =21.9 %

Abréviations (paramètres du débit) : Q95-débit dépassé ou égalé 95 % du temps (m³.s⁻¹), MAM7- moyen des débits minimaux annuels sur 7 jours (m³.s⁻¹), BFI-indice du débit de base, K50-valeur médiane des ratios de décrue. Abréviations (caractéristiques des bassins versants) : Area-superficie (km²), Forest-proportion sous forêt, BFI-indice du débit de base, AAR-précipitation moyenne par an (millimètres), Folis-densité du réseau.

Tableau 4

Coefficients partiels de détermination (en %) des variables significatives du tableau 3

Variables	Équation (1)	Équation (2)	Équation (3)	Équation (4)	Équation (5)	Équation (6)
BFI	7,6	24,0	37,5	—	—	—
AREA	67,4	50,5	5,0	67,4	50,5	—
AAR	3,0	9,7	—	1,6	12,5	16,7
FOREST	9,3	—	—	9,3	—	—
FOLIS	—	1,0	—	2,1	2,3	5,3

APPLICATION

Les résultats obtenus ont été entrés dans le logiciel *Micro Low Flows*, un logiciel sur PC pour l'estimation automatisée des caractéristiques du débit d'étiage à n'importe quel endroit de la rivière dans la région. La méthode utilisée pour établir le logiciel peut être résumée comme suit :

- assemblage de données rastérisées pour la zone considérée. Dans le cas de Baden-Württemberg, ont été entrées les valeurs pour la moyenne annuelle des précipitations (AAR), l'évaporation potentielle (PE) et la couverture forestière (Forest) ;
- établissement d'un réseau hydrographique digitalisé. Pour Baden-Württemberg, 17 des 52 bassins versants étudiés ont été digitalisés pendant la période considérée ;
- estimation automatisée de la zone des bassins versants pour chaque partie de la rivière, avec comme limites les bassins versants précédemment digitalisés ;
- recouvrement automatisé des limites des bassins versants pour chaque partie de rivière sur les données rastérisées et détermination des valeurs pour chacun bassin versant de AAR, PE et Forest ;
- détermination automatisée, pour chaque partie de rivière, des caractéristiques du débit moyen et du débit d'étiage par l'utilisation des résultats des régressions multiples décrites plus haut.

Les résultats des estimations, ainsi que les courbes des débits classés dérivées, sont alors stockés en mémoire pour chaque partie de rivière et peuvent être rappelés si nécessaire. Cette application du logiciel *Micro Low Flows* à une région non située dans le Royaume-Uni prouve sa viabilité dans l'étude d'autres régions.

DISCUSSION

Cette analyse a montré que les classes du Potentiel d'Acceptation des Pluies Hivernales (Soil1, Soil2 à Soil4) ne sont pas significatives pour expliquer la variance des indices des débits d'étiage. L'on s'attendait à ce que cette variable hydrogéologique expliquât une part significative de la variance car les débits d'étiage dépendent en grande partie de l'hydrogéologie des bassins versants. Le BFI apparaît dans les équations de régression comme une importante variable explicative, et même si cet indice peut être considéré comme une caractéristique hydrogéologique des bassins versants, l'inclusion de cette variable pour l'estimation de sites non jaugés n'est pas satisfaisante car elle doit être dérivée de données provenant de l'écoulement.

Dans le but d'examiner la pertinence des paramètres Soil pour l'explication des statistiques des débits d'étiage, un autre modèle de régression a été testé, établissant un rapport entre Soil1) Soil2 et Soil4 (non logarithmique) avec les paramètres d'écoulement (tableau 5). Le coefficient de détermination le plus élevé ayant été atteint fut de 41,9 % pour MAM7, et les relations entre BFI ou K et les classes Wrap ne furent pas significatives. Ceci, ainsi que la précédente observation, indique qu'il est nécessaire d'améliorer la classification hydrogéologique dans cette région.

Lors de l'étude Friend, des résultats similaires ont été obtenus et, au lieu des classes Wrap, la couverture en pourcentage des classes de sol originales (CEE, 1984) a été dérivée manuellement et utilisée par la suite dans les équations de régression. Ceci a sensiblement amélioré le coefficient de détermination. Une révision à l'échelon européen de la carte Wrap, basée sur la carte numérique des sols (CEE, 1989) et s'inscrivant dans le programme de recherche Friend, va être entreprise. La « performance » des nouvelles classes de réponses hydrologiques, développée à l'échelon européen, sera testée dans des régions plus petites, comme la région de Baden-Württemberg par exemple. En approchant le problème d'un point de vue différent, les pourcentages de 14 classes hydrogéologiques dans la région ont été dérivés manuellement, et la régression par étape a été appliquée avec succès à ces paramètres afin d'expliquer les paramètres des débits d'étiage. Cependant, cette approche doit être réduite à une région relativement petite en raison du temps que prend la dérivation manuelle. De plus, le transfert à d'autres régions ayant une classification hydrogéologique différente est compliqué.

Tableau 5
Équations de régression reliant les classes Wrap aux indices
des débits d'étiage

Q95 *	= 1944,8 -1923,6*SOIL1 -1914,6*SOIL2 - 1926,5*SOIL4	R ² =18,5 %
MAM7 *	=1758,2 - 1735,7*SOIL1 -1722,9*SOIL2 - 1734,8*SOIL4	R ² =19,3 %
K	Pas de variables significatives à 95 % confidence	(R ² =6,0 %)
BFI	pas de variables significatives à 95 % confidence	(R ² =8,3 %)

BIBLIOGRAPHIE

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC., 1985) Soil Map of the European Communities 1:1.000 000. Office for Official Publications of the CEC, Luxembourg.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC., 1989) Corine Data Base Manual. CEC, Brussels.

GROSS R., EELES C.W.O., GUSTARD A., 1989. Application of a lumped conceptual model to Frened catchments. In : Friends in hydrology. IAHS publication no. 187.

GUSTARD A., 1983. Regional variability of soil characteristics for flood and low flow estimation. In : Agricultural Water Management no. 6 255-268.

GUSTARD A., 1989. Frened (Flow Regimes from Experimental and Network Data) : The first one hundred days. In : Friends in hydrology. IAHS publication no. 187.

GUSTARD A., and GROSS R., 1989. Low flow regimes of northern and western Europe. In : Friends in hydrology. IAHS publication no. 187.

GUSTARD A., ROALD L.A, DEMUTH S., LUMADJENG H.S. AND GROSS R., 1989. Flow Regimes from Experimental and Network Data (Frened). Volume I Hydrological Studies, Volume II Hydrological Data. Institute of Hydrology.

Institute of Hydrology, 1980. Low Flow Studies Report.

Natural Environment Research Council. (Nerc, 1975) Flood Studies Report.