

---

# Loieau : un logiciel pour l'estimation régionale de la ressource en eau

Application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne française

Jacques Lavabre, Jean-Pierre Cambon, Nathalie Folton,  
Zoubir Makhoulf et Claude Michel

---

Le problème de la disponibilité de l'eau se pose en France avec bien moins d'acuité que dans d'autres régions de la planète. Il n'en demeure pas moins que la variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource en eau, les objectifs de qualité, la demande toujours croissante et les contraintes liées à l'ensemble des usages impliquent une gestion de plus en plus rigoureuse. En partant du principe que l'on gère un risque d'autant mieux que l'on s'y est préparé, il est nécessaire, pour prévenir toute situation de crise, de connaître au mieux la disponibilité de celle-ci, renouvelable, mais, aléatoire.

La loi sur l'Eau de 1992 aborde cette problématique : SDAGE, SAGE, gestion concertée, débits de référence d'étiage... La norme pour l'instruction des dossiers d'autorisation ou de déclaration des rejets et des prélèvements en rivière (décret 93-742 de mars 1993) est le débit mensuel d'étiage de fréquence quinquennale sèche (QMNA5). Les débits réservés des cours d'eau à l'aval des aménagements s'expriment comme un pourcentage du débit annuel moyen ou module (décret 84-512 de juin 1984).

Les dispositions prises par le législateur posent toutefois le problème de la connaissance de ces débits de référence en tout point du réseau hydrographique du territoire. Le débit de quelques

cours d'eau est certes connu au droit des stations de jaugeage. Mais l'hydraulicité reste une inconnue pour la majorité d'entre eux. Les Directions Régionales de l'Environnement (DIREN) et les services de l'État ayant en charge la police des eaux sont confrontés à cette méconnaissance. En absence de réelle étude de synthèse, ces services font appel à leur connaissance du terrain qui leur permet une extrapolation des informations déduites du réseau de mesure.

Les DIREN des régions Corse, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur ont souhaité disposer d'une méthode d'estimation un peu plus élaborée. Dans ce sens, elles ont confié au Cemagref une étude méthodologique et de synthèse afin de répondre au problème posé.

L'objectif premier de l'étude est donc la connaissance des débits de référence sur l'ensemble du réseau hydrographique de la région méditerranéenne française.

Les réflexions antérieures au lancement de l'étude ont conduit à retenir une approche globale par modélisation de la pluie en débit. Cette approche passe par une caractérisation du comportement hydrologique des bassins versants, qui, outre les débits de référence, permet de générer des chroniques continues de débits mensuels.

**Jacques Lavabre, Jean-Pierre Cambon, Nathalie Folton, Zoubir Makhoulf**  
Cemagref  
Le Tholonet  
BP 31  
13612 Aix-en-Provence Cedex 1  
**Claude Michel**  
Cemagref  
Parc de Tourvoie  
BP 44  
92163 Antony Cedex

## Méthodologie

Quel que soit leur degré de sophistication, les méthodes hydrologiques ont au moins un point en commun : elles ne peuvent se passer de l'information des réseaux de mesure, et leurs performances sont étroitement liées à la disponibilité des chroniques d'information (dans le temps et dans l'espace). Toutefois la connaissance régionale de variables hydrologiques telles que le module ou le QMNA5 peut être abordée selon différentes méthodes. Sans être exhaustif, citons :

– les méthodes basées sur une analyse statistique simple des chroniques observées après échantillonnage des variables sur une période (commune ou non) d'observation. Le traitement régional des quantiles déduits est souvent réduit à un simple report cartographique (papier ou fond de carte digitalisé pour une visualisation informatique). Une cartographie de zones homogènes est parfois proposée par agglomération, manuelle ou automatique (avec quelques difficultés inhérentes au fait que la mesure ponctuelle d'un débit intègre l'ensemble du bassin versant). Des variables exogènes (la pluviométrie, la description physique du bassin...) peuvent être introduites pour augmenter la précision des estimations. La régionalisation repose alors sur la cartographie de ces variables, généralement plus facile à établir que celle des débits ;

– la modélisation des écoulements à partir de la pluie. Cette approche présente l'avantage d'être globale et non limitée à une variable hydrologique. La régionalisation est essentiellement reportée sur les paramètres du modèle pluie-débit. Elle permet alors de générer, pour l'ensemble du réseau hydrographique de la zone d'étude, des chroniques d'écoulement, desquelles sont déduites les variables hydrologiques à étudier.

L'intérêt du deuxième type de méthode (retenu ici) est évident. Le lourd travail de compilation des informations et de régionalisation n'est effectué qu'une seule fois, ce qui évite les études en cascade et cartographies diverses. De plus, grâce aux développements actuels de l'informatique, l'écriture de la méthode sous forme d'un logiciel convivial offre à l'utilisateur un outil général, qui synthétise l'ensemble de l'information hydrologique du réseau de mesure, et lui permet de traiter très rapidement bon nombre de problèmes hydrologiques.

## Les traitements des données pluviométriques et débitométriques

### ■ La zone d'étude et les données

La zone d'étude actuelle concerne trois régions : Languedoc-Roussillon, Corse et Provence-Alpes-Côte d'Azur, soit 13 départements (50 000 km<sup>2</sup> environ). La climatologie de cette zone est extrêmement contrastée : du climat méditerranéen côtier au climat de haute montagne. La pluviométrie annuelle moyenne varie dans une fourchette de 500 à 2 000 mm, ce qui induit une variabilité hydrologique marquée :

– le module est de l'ordre de 5 l/s/km<sup>2</sup> près de la côte ; il atteint plus de 70 l/s/km<sup>2</sup> pour les bassins de montagne ;

– le QMNA5 varie de 0 à plus de 10 l/s/km<sup>2</sup>.

La quasi-totalité de l'information hydrologique existante a été traitée : 276 bassins versants (94 % ont une superficie inférieure à 1000 km<sup>2</sup> et pour 44 % d'entre eux la surface est inférieure à 100 km<sup>2</sup>), environ 600 stations pluviométriques et une quinzaine de points de mesure de l'évapotranspiration potentielle. Le traitement porte sur la période d'observation allant de 1970 à 1994, si elle est disponible, ou au moins cinq ans de mesures concomitantes de pluie et de débit de cette période.

### ■ Le calage du modèle pluie-débit

Le modèle retenu (GR2M) fonctionne au pas de temps mensuel. Ce modèle, de type conceptuel, est réglé par deux paramètres (GR pour Génie Rural, 2 pour deux paramètres, M pour le pas de temps mensuel). Il est issu des travaux de recherche menés au Cemagref Antony et dirigés par Cl. Michel (Makhoul et *al.*, 1994 ; Lavabre et *al.*, 1996). Il a été légèrement modifié dans le cadre de cette étude afin de mieux reproduire les débits d'étiage. Deux paramètres, XV1 et XV2, règlent la génération des débits mensuels (figure 1). Les valeurs de ces deux paramètres sont déduites d'une période d'apprentissage durant laquelle sont comparés les débits observés et ceux calculés par le modèle grâce à la seule connaissance des pluies de chaque mois. A travers ces valeurs, on vise bien sûr à réduire l'écart entre débits observés et débits calculés.

Classiquement, la modélisation de la pluie en débit comporte deux fonctions principales. La fonc-

tion de production équilibre au mieux le bilan en volume du bassin versant ; elle traduit la plus ou moins bonne aptitude du bassin versant à produire des écoulements. La distribution des débits dans le temps (ici au pas de temps mensuel) est assurée par la fonction de transfert. Cette fonction rend compte du décalage dans le temps entre la pluie et les écoulements.

GR2M impose une formulation numérique à ces deux fonctions, qui sont toutefois dépendantes des valeurs numériques des paramètres de calage.

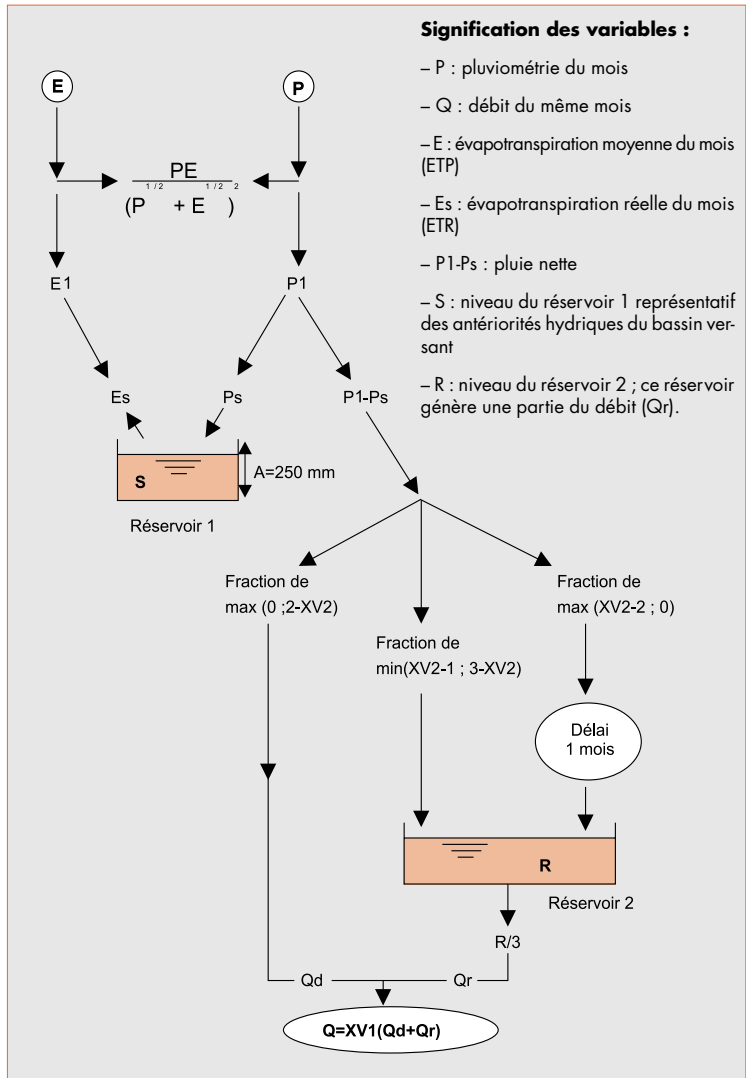
- XV1 est le paramètre de réglage de la fonction de production. Il gère le bilan du bassin versant par un facteur multiplicatif des débits de chaque mois. Selon la structure imposée par le modèle, ce paramètre ne corrige en fait que le débit total sortant. XV1 est bien sûr positif et non borné. Des valeurs proches de 0 indiquent une faible tendance à l'écoulement du bassin, alors que des valeurs supérieures à 2 sont le fait de bassins versants de montagne pour lesquels les entrées météoriques (pluie et neige) sont sous-estimées par le réseau d'observation pluviométrique.

- XV2 est le paramètre de réglage de la fonction de transfert du modèle. Il règle en fait la partie de l'écoulement qui s'écoule directement sans passer par le réservoir 2. XV2 est supérieur à 1. Dans le modèle, il ne peut prendre des valeurs supérieures à 3 (cette valeur génère un décalage de deux mois entre la pluie et le débit).

Le bassin réagit d'autant plus rapidement que XV2 est proche de 1. A la limite, si XV2 est égal à 1, toute la pluie nette est directement transférée à la rivière le mois durant lequel elle est observée. Dans ce cas, il n'y a aucun stockage dans le réservoir de routage, donc aucun report de stock.

Si  $XV2 = 2$ , toute la pluie nette du mois pénètre dans le réservoir de routage. Il n'y a pas d'écoulement direct. De telles valeurs rendent compte de bassins versants qui possèdent un stockage important.

Dans le cas de bassins qui présentent des régimes hydrologiques de type montagnard ou glaciaire, XV2 prend des valeurs comprises entre 2 et 3. Dans ce cas, une fraction de la pluie est injectée dans le réservoir 2 avec un délai d'un mois. Bien qu'il conduise à des résultats satisfaisants en ce qui concerne les débits de référence, le modèle représente



assez mal ce type d'écoulement, pour lequel le stock neigeux (mal connu) joue un rôle prépondérant.

### ■ Performances du modèle après calage

L'ensemble de l'information a été traité par le logiciel LOIEAU, présenté plus loin. Pour chacun des bassins versants pour lesquels une chronique de débits était disponible, le logiciel a assuré le calcul des pluies mensuelles du bassin et sa transformation en débit par GR2M. Pour chacun des bassins versants, le logiciel a optimisé les valeurs de XV1 et XV2 afin de reproduire au mieux les débits observés.

▲ Figure 1. – Architecture du modèle GR2M. Version développée dans le cadre de l'étude.

A cette étape, le comportement hydrologique de chacun des 276 bassins versants est représenté par une valeur de XV1 et de XV2, ce qui permet de simuler une chronique de débits mensuels à partir des pluies mensuelles.

Les figures 2 et 3 comparent les modules et débits mensuels d'étiage de fréquence quinquennale de la chronique observée à ceux de la chronique simulée par le modèle (pour la région Languedoc-Roussillon). C'est, en fait, les performances du modèle qui sont présentées quant à sa capacité de restituer correctement les débits de référence.

Les modules sont très bien reproduits ; le coefficient de détermination du nuage de points (valeur observée, valeur simulée) est égal à l'unité. Bien que des écarts soient notables sur les QMNA5, le modèle n'entraîne pas de biais systématique ; le coefficient de détermination du nuage de points (QMNA5 observé, QMNA5 simulé), atteint 0,91.

Figure 2. – Comparaison des modules calculés sur les séries observées et sur les séries calculées par le modèle (période de calage). Exemple de la région Languedoc-Roussillon. ▼

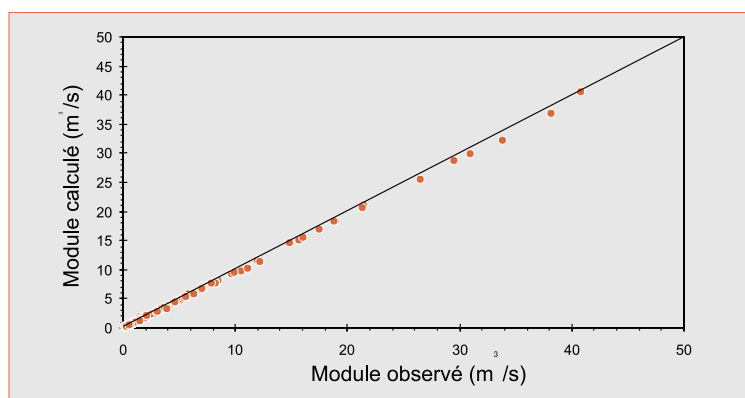
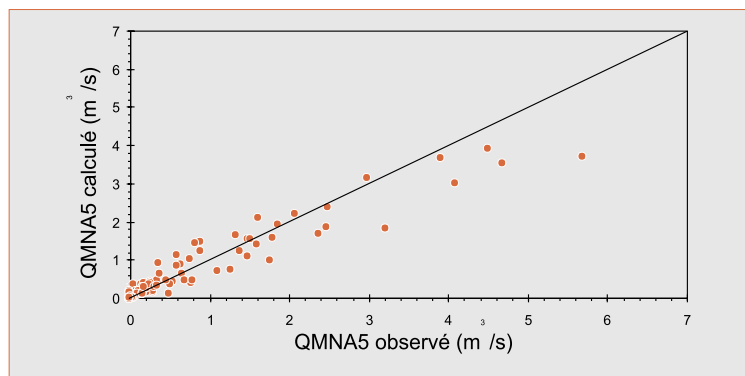


Figure 3. – Comparaison des débits d'étiage de fréquence quinquennale sur les séries observées et sur les séries calculées par le modèle (période de calage). Exemple de la région Languedoc-Roussillon. ▼



### ■ Régionalisation des paramètres du modèle

Le report cartographique (non reproduit ici ; Cemagref, 1996) des deux paramètres montre une certaine organisation spatiale, qui fait nettement apparaître l'influence des régimes hydrologiques.

Cette organisation dans l'espace est synthétisée sur la figure 4 ; le couple de paramètres XV1 et XV2 est un bon descripteur du régime hydrologique d'un cours d'eau. C'est un excellent résultat dans la mesure où l'on remarque qu'un modèle paramétré par seulement deux coefficients permet de simuler des chroniques continues de débits mensuels.

Des limites d'isovaleurs de XV1 et XV2 peuvent être tracées manuellement. Il est clair que la disponibilité d'un modèle numérique de terrain permettrait une approche plus fine, d'autant que les premiers essais effectués laissent entrevoir une bonne liaison entre XV1 et l'altitude moyenne des bassins versants.

Ces liaisons n'ont pas été introduites dans la version actuelle de la méthode qui devrait être rapidement opérationnelle. Leur introduction impliquerait en effet que chacun des services concernés dispose d'un modèle numérique de terrain et des logiciels pour calculer les caractéristiques physiques nécessaires. Ce n'est pas encore le cas, mais on entrevoit à très court terme un développement de la méthode dans ce sens.

### ■ Performances du modèle après régionalisation

Comme précédemment, nous comparons, figures 5 et 6, les modules et QMNA5 des séries observées et des chroniques simulées par le modèle utilisé avec les paramètres régionaux. Les résultats se dégradent, mais restent très corrects :

- explication de 95 % de la variance des modules ;
- le pourcentage d'explication est de 75 % pour les QMNA5.

On remarquera une certaine tendance du modèle régionalisé à sous-estimer les QMNA5 des grands bassins versants (fortes valeurs en  $m^3/s$ ). Ceci est certainement imputable à une mauvaise prise en compte des paramètres du modèle pour les grands bassins lorsque leur limite chevauche plusieurs zones d'isovaleurs des paramètres. L'information

Figure 4. – Caractérisation des régimes hydrologiques grâce aux paramètres XV1 et XV2.

d'un modèle numérique de terrain pourrait apporter une amélioration.

### Le logiciel LOIEAU

#### ■ Présentation du logiciel

Le traitement de l'information pluviométrique et hydrométrique disponible a permis de dégager une méthodologie opérationnelle de génération de chroniques de débits mensuels. De plus, la régionalisation de la méthode permet son utilisation sur l'ensemble de la zone d'étude.

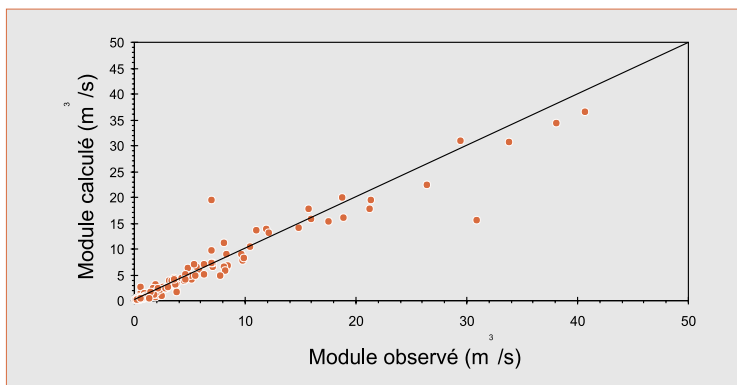
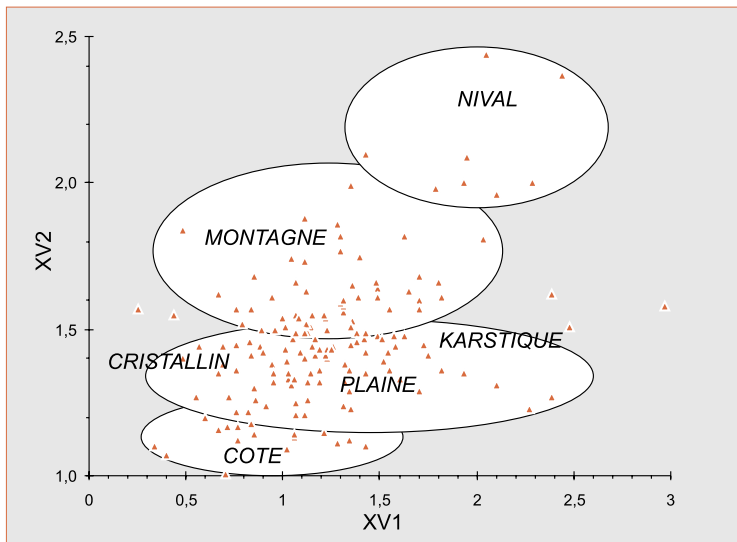
Le principal objectif est atteint : la méthode propose des estimations des débits de référence, calculées à partir de chroniques de débits mensuels, en tout point du réseau hydrographique.

L'utilisation de cette méthode implique toutefois le développement d'un outil informatique pour effectuer l'ensemble des opérations nécessaires au calcul. Ceci est assuré par le logiciel LOIEAU dont l'écriture sous Windows offre une excellente convivialité à l'utilisateur (Lavabre et al., 1997).

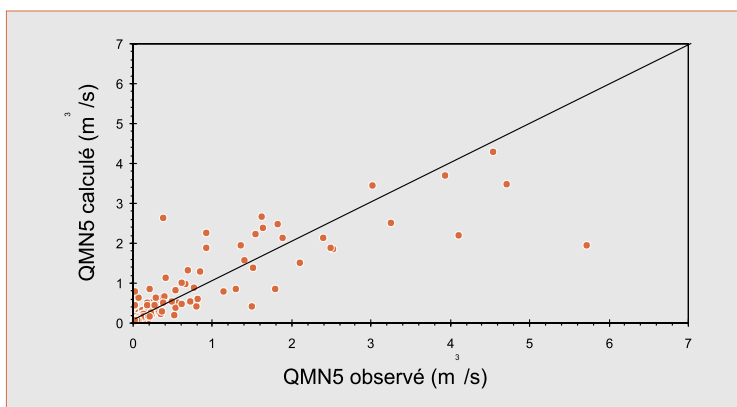
A partir des bases de données cartographiques, climatologiques et hydrologiques incorporées au logiciel, LOIEAU propose une démarche automatique, tout en laissant à l'utilisateur la possibilité d'intervenir à chaque étape de calcul :

- les limites d'un bassin versant quelconque peuvent être tracées à l'écran à l'aide de la souris ou lues dans un fichier ;
- calcul de la surface et de l'évaporation mensuelle moyenne ;
- choix d'un poste pluviométrique, ou intégration spatiale automatique pour estimer la pluviométrie mensuelle durant la période de génération choisie par l'utilisateur ;

Figure 6. – Comparaison des débits d'étiage de fréquence quinquennale sur les séries observées et sur les séries calculées par le modèle régionalisé (valeurs régionalisées). Exemple de la région Languedoc-Roussillon.

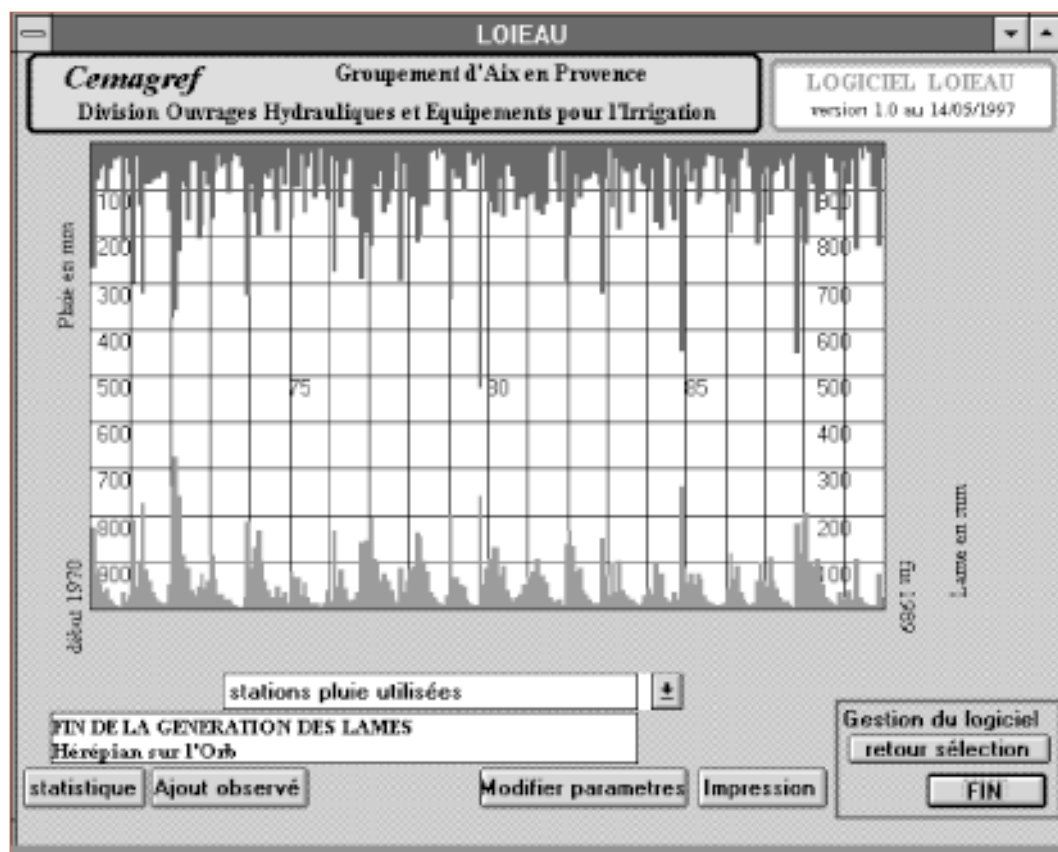


▲ Figure 5. – Comparaison des modules calculés sur les séries observées et sur les séries calculées par le modèle régionalisé (valeurs régionalisées). Exemple de la région Languedoc-Roussillon.



- possibilité d'intervenir sur le paramétrage automatique du modèle pluie-débit, proposé par LOIEAU ;
  - génération d'une chronique mensuelle de débits (figure 7) ;
  - outre la restitution du fichier des débits mensuels, LOIEAU effectue les statistiques de l'ensemble des variables afin d'estimer le module et le débit mensuel d'étiage de fréquence quinquennale ;
  - pour un site jaugé, LOIEAU propose un contrôle des performances de la modélisation par comparaison graphique.
- **Utilisation**
- Outre l'estimation des débits de référence, LOIEAU offre d'autres possibilités :
- pour un bassin versant dont les écoulements sont mesurés, LOIEAU permet :
    - la reconstitution des données manquantes,
    - l'extension des chroniques de débits mensuels,
    - l'examen de la représentativité du bassin versant dans son environnement régional grâce à l'examen des paramètres du modèle,
    - la possibilité d'utilisation en prévision de débits mensuels après avoir contrôlé les performances lors des années précédentes,
    - ...
  - en tout point du réseau hydrographique, l'utilisateur dispose d'une chronique de débits mensuels utilisable :
    - pour toute confrontation ressource-besoin,
    - pour l'étude de la faisabilité d'une retenue d'eau,
    - pour appréhender les variations saisonnières et interannuelles de la ressource en eau dans le cadre de l'élaboration d'un SAGE,
    - ...

Figure 7. – Écran de LOIEAU après les calculs de la chronique de débits mensuels à partir des pluies mensuelles. ►



### ■ *Évolution à court terme*

Deux niveaux d'évolution peuvent être distingués : l'amélioration des performances du logiciel, en étroite liaison avec la disponibilité de banques de données géographiques, et l'extension géographique de la zone d'application.

- Le logiciel pourra être amélioré après le retour d'expérience des utilisateurs, en association avec un développement méthodologique : amélioration des performances de LOIEAU pour les bassins versants d'altitude, régionalisation des paramètres du modèle en relation avec les banques de données géographiques, utilisation en prévision des débits d'étiage, utilisation pour générer des longues chroniques de débits utilisables en simulation de scénarios.
- La généralisation à d'autres régions de France (et à l'étranger) est envisageable. Celle-ci nécessite la compilation des informations hydroclimatologiques disponibles (la tâche étant toutefois allégée par nos acquis sur la région méditerranéenne).
- L'information géographique disponible pourra être insérée ; notamment les banques de données altimétriques pour automatiser le tracé des limites d'un bassin versant.

### Conclusion

Si un seul enseignement devait être tiré de cette note, il nous apparaîtrait important de souligner que les résultats des recherches en hydrologie sont à même d'apporter des solutions opérationnelles aux problèmes que posent la gestion de la ressource en eau. Et bien que parfois décriée, la modélisation conceptuelle présente l'indéniable avantage d'aboutir à des résultats extrêmement satisfaisants. De plus cette approche est globale et non limitée à une variable hydrologique, ce qui évite des études successives consacrées à un problème particulier.

Le modèle GR2M s'est imposé comme particulièrement bien adapté à la connaissance régionale de la ressource en eau. Deux paramètres seulement suffisent pour caractériser le régime hydrologique d'un bassin versant.

L'écriture informatique de la méthode exploite les possibilités de calcul disponibles par tous. D'autant que les performances actuelles en matière de lan-

gage de programmation ont permis d'écrire un logiciel convivial qui laisse à l'utilisateur la possibilité d'intervenir en relation avec sa connaissance hydrométéorologique du milieu.

Des chroniques continues de débits mensuels peuvent ainsi être générées en tout point du réseau hydrographique de la zone étudiée. Les débits de référence en sont déduits. Sur la zone méditerranéenne française, les estimations des modules sont extrêmement correctes. Bien qu'une certaine dispersion soit notable, les estimations des débits d'étiage restent correctes.

Il apparaît enfin qu'à très court terme, des développements méthodologiques en relation avec l'information géographique disponible puissent améliorer les performances et le confort d'utilisation de LOIEAU. Il est aussi envisageable et souhaitable que la méthodologie soit généralisée à d'autres régions. □

### Remerciements

*Les DIREN des régions Corse, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur se sont fortement mobilisées autour de ce travail de synthèse. Outre le soutien financier, leur implication a été permanente tout au cours de l'étude. Nous tenons à remercier particulièrement, Ch. Pasquier, Cl. Millo, J.-P. Delmas, R. Claudet, G. Le Gac et C. Benech pour leur étroite collaboration et leurs remarques pertinentes. Sans oublier les « obscurs » de l'hydrométrie, sans lesquels ce travail n'aurait pu être mené.*

### Résumé

A l'initiative des DIREN Corse, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur, un important travail de compilation de l'information hydrométéorologique disponible a été entrepris sur la zone méditerranéenne française. L'objectif de ce travail est la connaissance des débits de référence (module et débit mensuel minimal de fréquence quinquennale) en tout point du réseau hydrographique de la zone d'étude. Une approche par modélisation des écoulements à partir de la pluie, au pas de temps mensuel, a été retenue. Le modèle GR2M s'est révélé particulièrement adapté. Sa précision est excellente pour l'estimation des modules. Bien qu'une certaine dispersion affecte les débits d'étiage, les performances du modèle restent très correctes. De plus les deux paramètres du modèle sont de bons descripteurs du régime hydrologique des cours d'eau, ce qui a permis une régionalisation sans problème particulier. Cette méthodologie et les banques de données nécessaires ont été incorporées dans le logiciel LOIEAU. L'écriture sous WINDOWS lui confère une excellente convivialité. Les DIREN disposent avec LOIEAU d'un outil qui, outre l'estimation des débits de référence, leur permet d'approcher la totalité des problèmes liés à la ressource en eau, à sa variabilité saisonnière et interannuelle et ceci en tout point du réseau hydrographique de la zone méditerranéenne française.

### Abstract

Initialized by the Corsica, Languedoc-Roussillon and Provence-Alpes-Côte-d'Azur DIREN, a thorough gathering of all available hydrometeorological data has been undertaken in the French Mediterranean region. The goal of this task is to acquire a better knowledge of reference flows (module and minimum monthly flow for a five-year frequency) everywhere in the hydrographic network of this region. A modelling approach of rain water runoffs, with a monthly step, has been selected. The GR2M model has proven to be very well adapted. Its accuracy is excellent for the module estimation. Even though the low water flows are estimated with some dispersion, the overall results remain very good. Moreover, the two model parameters describe accurately the rivers' hydrological status, which has allowed us to extend the results to the whole region. This methodology as well as the necessary databases have been included into the LOIEAU software. The fact that it has been developed under a WINDOW configuration makes it user-friendly. With the LOIEAU software, the DIREN now have a tool that allows them to not only estimate the reference flows, but also to tackle all problems related to the water supply and to its seasonal and interannual variability, everywhere in the hydrographic network of the French Mediterranean area.

### Bibliographie

- CEMAGREF, DIREN, 1996. Étude des débits de référence des régions Languedoc-Roussillon, Corse et Provence-Alpes-Côte d'Azur. Note de synthèse et présentation du logiciel LOIEAU. Note interne, 56 pages.
- LAVABRE, J., ARNAUD, P., FOLTON, N., MICHEL, Cl. 1996. Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt, *Ingénieries - Eau-Agriculture-Territoire*, n° 7, p. 21 à 30.
- LAVABRE, J., CAMBON, J.-P., BREIL, D., 1997. Plaquette de présentation du logiciel LOIEAU, journée d'étude des débits de référence, Paris, 26 juin 1997, 4 p.
- MAKHLOUF, Z., MICHEL, Cl., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds, *Journal of Hydrology*, 162, p. 299-318.