

**HYDROLOGIE DES PETITS
AMENAGEMENTS HYDRO-ELECTRIQUES**



Juin 1992

AVERTISSEMENT

Ce document a été rédigé par H.DOSSEUR (HYDROCONSULT INTERNATIONAL) à la demande du Groupe de travail "Petits Aménagements Hydroélectriques" créé par E.D.F. (Groupe commun à la Direction de l'Équipement et à la Direction de la Production et du Transport).

Ce texte doit constituer la base d'un des chapitres du guide pratique élaboré par ce groupe de travail à l'intention des responsables de petits projets hydroélectriques en fournissant une introduction à l'hydrologie spécifique à ce type d'aménagement.

SOMMAIRE

	Page
1. INTRODUCTION	1
2. SPECIFICITE DE L'HYDROLOGIE DES PETITS AMENAGEMENTS	1
2.1 Nécessité d'une connaissance approfondie de l'hydrologie du site....	1
2.2 Hydrologie de petits bassins versants.....	1
2.3 Hydrologie d'aménagements au fil de l'eau.....	2
2.4 Différenciation saisonnière.....	2
3. PARAMETRES HYDROLOGIQUES A DETERMINER	3
3.1 Les apports en eau.....	3
3.2 Valeurs extrêmes.....	3
3.3 Les Niveaux d'eau.....	3
3.4 La qualité des eaux.....	3
4. RECHERCHE ET MISE EN FORME DE L'INFORMATION	3
4.1 Information requise.....	3
4.1.1 Caractéristiques physiques des bassins versants	3
4.1.2 Données climatiques régionales et locales	4
4.1.3 Données hydrométriques	4
4.1.4 Information complémentaire	4
4.2 Recherche de l'information.....	4
4.2.1 Organismes détenteurs d'information	4
4.2.2 Recueil de l'information	4
4.3 Mise en forme de l'information.....	5
4.3.1 Saisie informatique	5
4.3.2 Critique et homogénéisation des données	5

	Page
5. L'ETUDE HYDROLOGIQUE	6
5.1 Démarche générale.....	6
5.1.1 Approche régionale	6
5.1.2 Méthodes	6
5.1.3 Déroulement de l'étude	7
5.2 Mesures complémentaires au site.....	7
5.2.1 Equipement hydrométrique	7
5.2.2 Jaugeages	7
5.3 Détermination des caractéristiques physiques du bassin versant.....	8
5.3.1 Morphologie, relief	8
5.3.2 Géologie, pédologie	8
5.3.3 Couvert végétal	9
5.4 Calcul des apports en eau.....	9
5.4.1 Transfert analogique	9
5.4.2 Courbe des débits classés	10
5.4.3 Détermination du débit moyen annuel	13
5.4.4 Utilisation de modèles hydrologiques	15
5.5 Calcul des valeurs extrêmes.....	16
5.5.1 Les étiages	16
5.5.2 Les crues	17
5.6 Qualité de l'eau.....	20
5.6.1 Transports solides	20
5.6.2 Composition chimique	21
BIBLIOGRAPHIE GENERALE	22

ANNEXES

- ANNEXE 1 Organismes détenteurs d'information hydrologique
- ANNEXE 2 Logiciels spécialisés dans le traitement des données hydro-pluviométriques
- ANNEXE 3 Homogénéisation des données
- ANNEXE 4 Etudes et synthèses régionales
- ANNEXE 5 Hydrométrie
- ANNEXE 6 Modèles hydrologiques
- ANNEXE 7 Méthode du gradex

1 INTRODUCTION

L'expérience montre qu'une connaissance insuffisante de l'hydrologie est une cause d'échec fréquente dans la réalisation des petites centrales hydroélectriques.

L'étude hydrologique devra donc être menée avec soins et de préférence par un spécialiste hydrologue. Elle aura deux objectifs essentiels :

- l'estimation de la ressource en eau au niveau du site permettant d'évaluer correctement la production à attendre de l'aménagement,
- l'estimation des paramètres hydrologiques à prendre en considération pour assurer la protection des ouvrages et de l'environnement.

Dans le cadre de ce guide pratique, sans entrer dans le détail des techniques utilisées, il convient de sensibiliser le concepteur aux problèmes spécifiques de l'hydrologie des petits aménagements et de fournir quelques conseils et remèdes à l'usage des non-spécialistes confrontés à ces problèmes.

2 SPECIFICITE DE L'HYDROLOGIE DES PETITS AMENAGEMENTS

2.1 Nécessité d'une connaissance approfondie de l'hydrologie du site

- le calcul du productible, donc des recettes prévisibles, et celui du dimensionnement des ouvrages qui fournira les dépenses à engager, sont fortement dépendants de la qualité de l'estimation de la ressource en eau au site. Cela met en évidence l'importance particulière des risques financiers résultant d'une connaissance insuffisante de l'hydrologie du site : risques de surcoûts à la construction des ouvrages et de pertes de recettes à l'exploitation ;
- la part de l'hydrologie dans les études préliminaires a donc relativement beaucoup plus d'importance que dans le cas des grands aménagements, et l'étude hydrologique, pour être bien adaptée à l'économie et à la sécurité du projet, devrait être très détaillée. En fait, les contraintes financières imposent le plus souvent une étude à budget très modeste, ce qui conduit à rechercher les méthodes les plus efficaces et les moins coûteuses, mais ne permet pas toujours la mise en oeuvre des moyens qui seraient souhaitables.

2.2 Hydrologie de petits bassins versants

- en général, le bassin versant est de petite taille, ce qui assure en principe une plus grande homogénéité spatiale des principaux facteurs dont dépend l'écoulement (climat, structure géomorphologique du bassin, couvert végétal,...). Par contre, la variabilité de l'écoulement au cours du temps est beaucoup plus forte sur les petits cours d'eau, ce qui rend indispensable de disposer d'observations continues et de longue durée afin de prendre en compte les aléas interannuels.

- les petits bassins versants n'étant généralement pas contrôlés par les stations hydrométriques du réseau de base, la règle courante à travers le monde sera le manque de données adéquates impliquant la reconstitution des débits au niveau du site par une approche régionale. Cela n'est cependant pas tout à fait le cas en France actuellement par suite de la mise en place des SRAE et de la création au début des années 70 d'un important réseau hydrométrique sur les petits cours d'eau.

2.3 Hydrologie d'aménagements au fil de l'eau

- les petits aménagements n'offrent généralement pas de possibilités de stockage, ou alors celles-ci sont très réduites, la réserve utile étant insignifiante par rapport aux apports.

Cette situation au fil de l'eau impose une connaissance des débits à un petit pas de temps, qui le plus souvent sera journalier, en accordant une attention particulière aux débits de basses et moyennes eaux dont dépend la production.

Des études comparatives effectuées par le CEMAGREF, ont montré que, dans le cas de microcentrales au fil de l'eau, l'utilisation de données décennales conduit à une surestimation de l'énergie productible de l'ordre de 5 à 10 % et que cette surestimation atteint 15 à 25 % avec des données mensuelles.

- par contre, l'estimation des débits de crue ne requiert pas la même exigence que pour les grands aménagements. Le risque d'aggravation à l'aval des conditions naturelles d'écoulement est en effet très réduit et la crue de projet à prendre en compte concerne essentiellement la protection de l'ouvrage, c'est-à-dire en général d'un simple seuil déversant.

2.4 Différenciation saisonnière

La recette est bien entendu liée aux tarifs de vente qui sont très diversifiés et généralement variables dans le temps comme cela est le cas en France. L'étude hydrologique devra donc être "saisonnalisée", d'une part pour prendre en compte la variabilité saisonnière du régime hydrologique particulièrement sensible sur les petits bassins versants, et d'autre part en raison de cette variation des tarifs au cours de l'année.

3 PARAMETRES HYDROLOGIQUES A DETERMINER

D'une façon générale, la conception d'un petit aménagement hydraulique nécessite d'évaluer les éléments suivants au niveau du site :

3.1 Les apports en eau

- abondance annuelle et saisonnière et leur variation interannuelle,
- les débits moyens journaliers caractérisant la ressource en eau sous deux formes complémentaires :
 - . la chronique des débits aussi longue que possible,
 - . les courbes des débits classés annuelles et saisonnières

3.2 Les valeurs extrêmes

- les débits d'étiage établis pour différentes probabilités d'occurrence,
- les débits de crue également pour différentes probabilités d'occurrence permettant d'évaluer la crue de projet et les crues de chantier saisonnières.

3.3 Les niveaux d'eau

- la courbe hauteur/débit au niveau de la restitution,
- le niveau des plus hautes eaux possibles.

3.4 La qualité des eaux

- les transports solides (matières en suspension et charriage de fond),
- la composition chimique de l'eau (estimation du pH et de la dureté totale).

4 RECHERCHE ET MISE EN FORME DE L'INFORMATION

4.1 Information requise

4.1.1 Caractéristiques physiques des bassins versants :

- cartographie à une échelle adaptée à la taille des bassins versants permettant l'analyse topographique et morphologique (hypsométrie, formes, pentes,...), la description du réseau hydrographique (cours d'eau, lacs, marais) et l'inventaire des aménagements hydrauliques existants,
- information géologique et pédologique sur la nature des formations constituant le bassin versant en liaison avec leurs caractéristiques hydrodynamiques,
- information sur le couvert végétal : nature, état et répartition de la végétation et des cultures.

4.1.2 Données climatiques régionales et locales

- pluviométrie :
 - . totaux mensuels et annuels des précipitations aux différentes stations régionales,
 - . totaux journaliers des précipitations aux stations concernant directement le site (données indispensables pour la modélisation hydro-pluviométrique),
 - . valeurs maximales des intensités pour l'étude des crues.
- températures et humidités de l'air :
 - . valeurs mensuelles moyennes et extrêmes aux stations climatiques les plus proches du site.

4.1.3 Données hydrométriques

- chroniques des débits disponibles sur la rivière étudiée et sur les cours d'eau voisins,
- résultats des éventuelles mesures ponctuelles effectuées au site

4.1.4 Information complémentaire

- toute étude hydrologique régionale existante pouvant permettre d'améliorer la connaissance générale de la zone étudiée,
- connaissance approximative des prélèvements d'eau effectifs ou prévus à l'amont (irrigation, eau potable...)

4.2 Recherche de l'information

4.2.1 Organismes détenteurs d'information

Il est souvent difficile de recenser rapidement la totalité de l'information existante qui concerne le projet. Ainsi en France, les organismes gestionnaires de réseaux de mesures hydro-climatologiques sont très nombreux et l'information requise pour le projet peut être très dispersée. On trouvera en annexe 1 une liste, non exhaustive, des principaux organismes français détenant cette information.

4.2.2 Recueil de l'information

Il est recommandé d'évaluer la qualité de l'information disponible afin d'estimer le degré de confiance que l'on peut lui accorder. Pour cela on procédera, si possible, aux contrôles suivants :

- examen de la qualité du réseau d'observations et de sa gestion : on appréciera en particulier sur place :
 - . l'importance des moyens affectés à la gestion du réseau et la compétence du personnel qui en a la charge,

- . la fréquence et la fiabilité des relevés,
 - . la qualité des étalonnages des stations hydrométriques (nombre de jaugeages, stabilité de la section de contrôle, qualité de l'extrapolation,...).
- examen de l'état et de la disponibilité des données :
- . nature des données observées (naturelles ou influencées),
 - . longueur des séries et importance des lacunes,
 - . niveau d'élaboration (données brutes, élaborées, critiquées...),
 - . nature du support d'information (enregistrements, tableaux manuscrits, données informatisées...)

4.3 Mise en forme de l'information

4.3.1 Saisie informatique

L'information recueillie est rarement directement utilisable. Il sera généralement nécessaire de procéder à une saisie informatique partielle ou totale et/ou à un reformatage des données déjà informatisées.

Ces opérations préliminaires peuvent être longues et coûteuses lorsqu'il s'agit des données journalières, bien qu'actuellement elles soient grandement facilitées par l'utilisation de logiciels spécialisés adaptés aux micro-ordinateurs.

On trouve en annexe 2 un complément d'informations sur de tels logiciels.

4.3.2 Critique et homogénéisation des données

Cette étape indispensable avant tout traitement des données comprend les opérations suivantes :

- la correction des erreurs de saisie par contrôle visuel (tracés graphiques) et comparaison avec les originaux,
- le contrôle de l'homogénéité spatiale et temporelle des séries par utilisation des méthodes classiques de la statistique : doubles cumuls, écarts cumulés, analyse en composantes principales (voir annexe 3),
- le contrôle global sur chaque bassin versant par la méthode du bilan hydrologique, consistant à confronter les apports annuels, exprimés en lame d'eau écoulée, à la précipitation moyenne reçue par le bassin versant et à comparer régionalement les déficits d'écoulement.

5 L'ETUDE HYDROLOGIQUE

5.1 Démarche générale

5.1.1 Approche régionale

Il existe parfois des stations hydrométriques proches du site permettant un transfert simplifié des débits de ces stations au site.

Par contre, l'absence de données adéquates aux stations voisines rend souvent nécessaire une approche régionale de plus grande envergure.

Dans les deux cas, l'étude hydrologique devra être complétée par des observations locales qui seront entreprises dès le début des investigations sur le site.

L'analyse hydrologique régionale est une vaste entreprise qui demande du temps et dont le coût peut être prohibitif pour un seul aménagement mais prend tout son intérêt lorsqu'il s'agit d'une prospection à grande échelle avec plusieurs sites à étudier dans la même région.

Pour faire l'économie d'une telle analyse il faut disposer de synthèses régionales détaillées fournissant sous une forme pratique (formules, abaques, cartes, logiciels...) les moyens d'estimer les caractéristiques hydrologiques des petits bassins versants non jaugés de la région considérée.

On trouvera en annexe 4 une liste de quelques travaux et documents de synthèse constituant des outils pratiques d'évaluation des ressources en eau (apports et crues), bien que souvent limités dans leur utilisation à un secteur géographique déterminé.

5.1.2 Méthodes

La méthode d'évaluation de la ressource en eau au site dépend du mode de calcul qui sera utilisé pour l'estimation du productible :

- si le calcul du productible se fait avec simulation du fonctionnement de l'aménagement, il sera nécessaire d'exprimer la ressource en eau sous forme de longues chroniques de débits,
- par contre, si le calcul se fait sans simulation, on pourra se contenter de caractériser la ressource par quelques paramètres hydrologiques obtenus à partir d'une courbe de débits classés.

Nous préconisons la méthode de simulation qui, seule, permet de maîtriser correctement l'aléa interannuel et de prendre en compte la variabilité des rendements et éventuellement des hauteurs de chute. Cette méthode devient indispensable dans le cas d'usines de très basses chutes à niveaux amont et aval variables.

Cependant, son emploi nécessite une mise en oeuvre sur ordinateur et la disponibilité de séries de débits longues et continues qui, le plus souvent, devront être générées à partir des précipitations par des modèles hydrologiques.

5.1.3 Déroutement de l'étude

la démarche générale est donc tributaire à la fois de l'information disponible et de la procédure retenue pour le calcul du productible.

L'étude se déroulera en deux temps :

Dans une première étape on utilisera toute l'information locale et régionale disponible pour établir l'hydrologie du site :

- . soit par un simple transfert au site des débits des stations voisines,
- . soit par transposition au site des résultats d'une synthèse régionale,
- . soit par l'utilisation de modèles hydro-pluviométriques dont les paramètres seront prédéterminés régionalement.

Ensuite, on prendra en compte les éventuels résultats des observations complémentaires qui auront pu être effectuées au site même de façon à ajuster les données obtenues dans la première étape.

5.2 Mesures complémentaires au site

5.2.1 Equipement hydrométrique

Il est indispensable d'équiper le plus tôt possible le site d'une échelle limnimétrique qui sera installée dans une section stable du lit à proximité de la future prise d'eau.

Sur les petits bassins versants, les débits varient beaucoup et rapidement et les mesures ponctuelles sont alors insuffisantes. Pour assurer un contrôle continu il est donc recommandé de compléter l'échelle par un enregistreur des niveaux d'eau.

Il existe actuellement des systèmes d'acquisition automatique d'information hydrométrique qui sont autonomes, fiables, faciles à mettre en place et à exploiter et peu coûteux (voir annexe 5).

5.2.2 Jaugeages

L'échelle limnimétrique mise en place doit être étalonnée. Cet étalonnage est effectué point par point par des jaugeages du débit pour différentes hauteurs d'eau en utilisant une méthode appropriée au cours d'eau (voir annexe 5). On attachera de l'importance aux basses eaux pour lesquelles la relation hauteur/débit est rarement précise (manque de sensibilité et relative instabilité de la section de contrôle). Le contrôle correct des débits d'étiage nécessitera généralement de véritables campagnes de jaugeages à cause de l'irrégularité temporelle des processus de tarissement particulièrement sensibles aux prélèvements et aux rejets.

5.3 Détermination des caractéristiques physiques du bassin versant

Le bassin versant d'une rivière en un point donné est la surface drainante à l'intérieur de laquelle l'eau précipitée se dirige vers ce point.

5.3.1 Morphologie, relief

Après avoir tracé sur une carte le contour du bassin versant on en détermine sa superficie et son périmètre. Par planimètrage des surfaces comprises entre les courbes de niveau, on établit la courbe hypsométrique qui donne la répartition des altitudes en pourcentage de la superficie totale et qui renseigne sur l'allure générale du relief.

Pour caractériser le bassin versant on utilise un certain nombre de paramètres :

- **Le coefficient de compacité** de Gravelius C qui caractérise la forme en comparant le périmètre P du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même superficie S :

$$C = P / 2 \sqrt{\pi S}$$

- **Le rectangle équivalent** qui est un rectangle ayant la même superficie S que le bassin versant et même coefficient de compacité C. La longueur L de ce rectangle équivalent est donnée par :

$$L = \frac{C \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C} \right)^2} \right]$$

- **l'indice de pente global** IG (généralement exprimé en m/km)

$$IG = \frac{Z_{05} - Z_{95}}{L}$$

Z₀₅ = altitude dépassée par 5 % du bassin

Z₉₅ = altitude dépassée par 95 % du bassin

L = longueur du rectangle équivalent

5.3.2 Géologie, pédologie

A partir des cartes géologiques et pédologiques, on estime la répartition des formations constituant le bassin versant en s'attachant à différencier les terrains selon leurs caractéristiques hydrodynamiques, c'est-à-dire sous l'aspect de leur aptitude à favoriser plus ou moins l'infiltration ou le ruissellement.

En attribuant des points à chacune des formations en fonction de son aptitude à l'écoulement, on peut éventuellement calculer un indice géologique du bassin versant en déterminant la superficie relative occupée par les diverses formations qui le constituent.

5.3.3 Couvert végétal

La végétation est un facteur important de l'écoulement. Elle contribue à l'interception de la pluie dont une partie sera reprise par évaporation avant d'atteindre le sol. Elle joue un grand rôle dans les processus d'infiltration et surtout d'évapotranspiration.

La nature de la végétation est très souvent représentative d'un écosystème qui intègre des facteurs climatiques et des facteurs physiques dont dépend l'écoulement. Le type d'occupation du sol constitue donc une information synthétique pouvant caractériser un comportement hydrologique.

Pour une étude régionale il est donc intéressant - après avoir regroupé les différentes formes de couvert végétal en grandes classes (allant du sol nu, aux cultures et à la forêt) - de caractériser le bassin versant par un indice de végétation établi de façon analogue à l'indice géologique (cf. paragr. 5.3.2)

5.4 Calcul des apports en eau

5.4.1 Transfert analogique

L'analogie hydrologique repose sur les similarités climatiques et physiques entre bassins de taille semblable.

Les données observées à une station A peuvent être transférées à un site S, où l'on ne dispose d'aucune donnée et dont le bassin versant est analogue à celui de A, en appliquant un coefficient correcteur C tenant compte des différences pluviométriques et topographiques.

Ce coefficient appliqué aux modules spécifiques (débits moyens annuels ramené à l'unité de surface de chaque bassin) peut être déterminé régionalement. Ainsi, pour la France métropolitaine, le CEMAGREF (OBERLIN, 1984) propose un coefficient C qui dépend de la pluviométrie annuelle P et de l'altitude médiane Z du bassin :

$$C = \frac{L(S)}{L(A)} = \frac{0,75 P(S) + 0,40 Z(S) - 450}{0,75 P(A) + 0,40 Z(A) - 450}$$

L(S) : Lamé d'eau annuelle écoulée au site S (en mm)

L(A) : Lamé d'eau annuelle écoulée à la station A (en mm)

P(S) : Précipitation annuelle moyenne sur le bassin versant S (en mm)

P(A) : Précipitation annuelle moyenne sur le bassin versant A (en mm)

Z(S) : Altitude médiane du bassin S (en m)

Z(A) : Altitude médiane du bassin A (en m)

Cette formule valable pour les débits annuels et mensuels ne reste acceptable pour les débits journaliers que lorsque A et S sont des points voisins d'une même rivière.

Cette méthode de transfert direct peut devenir dangereuse pour les débits de basses eaux qui sont très liés à l'hydrogéologie et à la géologie du bassin.

Pour les débits d'étiage, il est donc vivement conseillé d'établir une relation entre la station et le site en procédant à des campagnes de jaugeages et de suivre cette relation au cours du temps.

5.4.2. Courbe des débits classés

* La courbe des débits classés s'obtient en portant sur un graphique tous les débits journaliers observés se rapportant à une période donnée (saison, année) rangés par ordre décroissant (figure 1). Le temps de base porté en abscisse est généralement donné en pourcentage de la période considérée.

Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une année, cette courbe fournit la durée moyenne de dépassement d'un débit donné pendant un cycle annuel.

Cette courbe se prête bien au calcul du débit moyen dérivable pendant une période déterminée par un prélèvement au fil de l'eau.

La courbe des débits classés est souvent définie par quelques valeurs particulières appelées "débits caractéristiques" du cours d'eau :

- . Débit Caractéristique Maximum (DCM) : débit dépassé 10 jours par an
- . Débit Caractéristique d'étiage (DCE) : débit dépassé 355 jours par an
- . Débits Caractéristiques de n mois (DCn) : débits dépassés n mois par an

Dans une hypothèse de fonctionnement au fil de l'eau, la courbe des débits classés donne le nombre de jours annuels (ou saisonniers) "ne" où la centrale peut turbiner à son débit maximal QE (débit d'équipement) tout en assurant un débit réservé QR, c'est-à-dire le nombre de jours "ne" correspondant au débit classé $Q_{ne} = QR + QE$. Le volume turbinable au débit QE est alors :

$$VQE = QE \times ne \times 24 \times 3600$$

VQE étant exprimé en m³, QE en m³/s et ne en jours.

Lorsque le nombre de jours "ne" est connu pour toutes les années observées ou reconstituées, il peut faire l'objet d'une analyse de distribution statistique, ce qui permet de calculer le productible maximale pour diverses probabilités des "ne" et en particulier pour celle qui correspond à l'année décennale sèche.

De la même façon, on pourra calculer le productible à puissance minimale établi pour le débit minimal turbinable QN (qui, en général, varie dans la plage $0,2QE < QN < 0,6QE$, selon les turbines) en déterminant le nombre de jours "nn" correspondant au débit classé $Q_{nn} = QR + QN$.

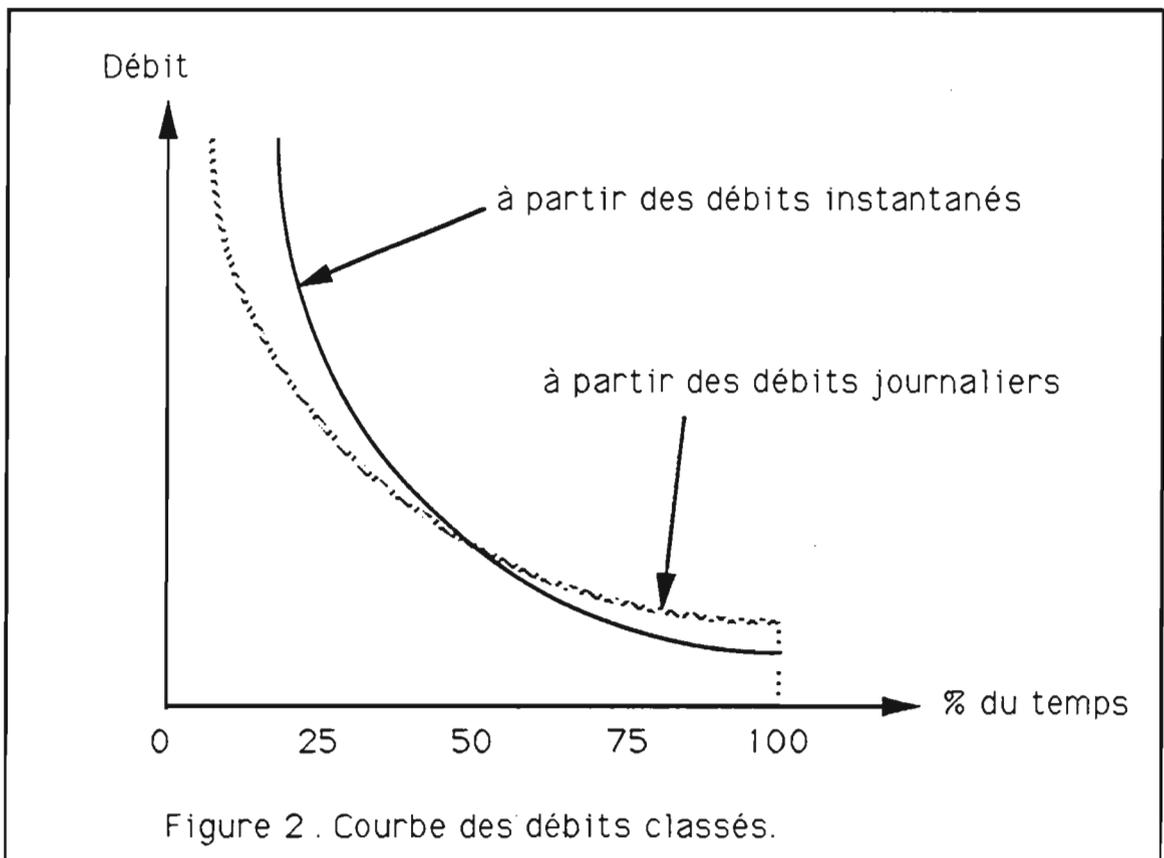
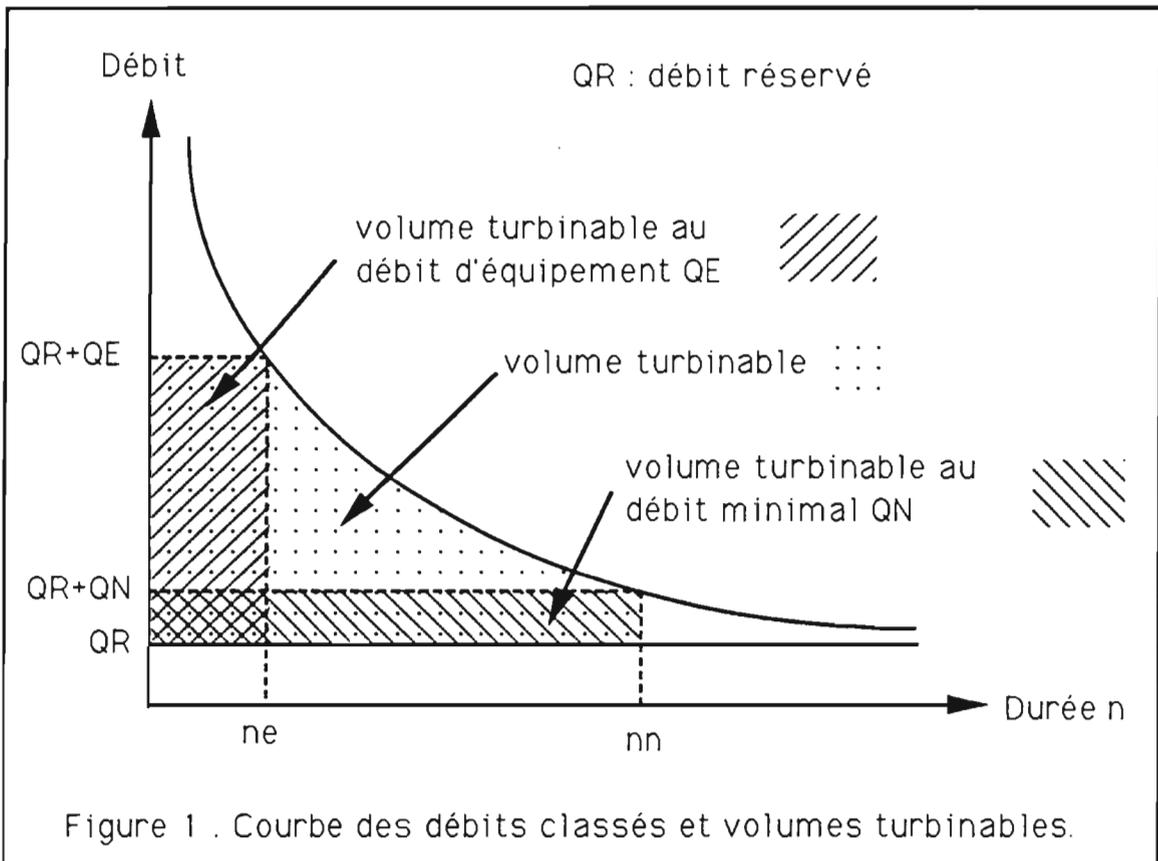
Remarque :

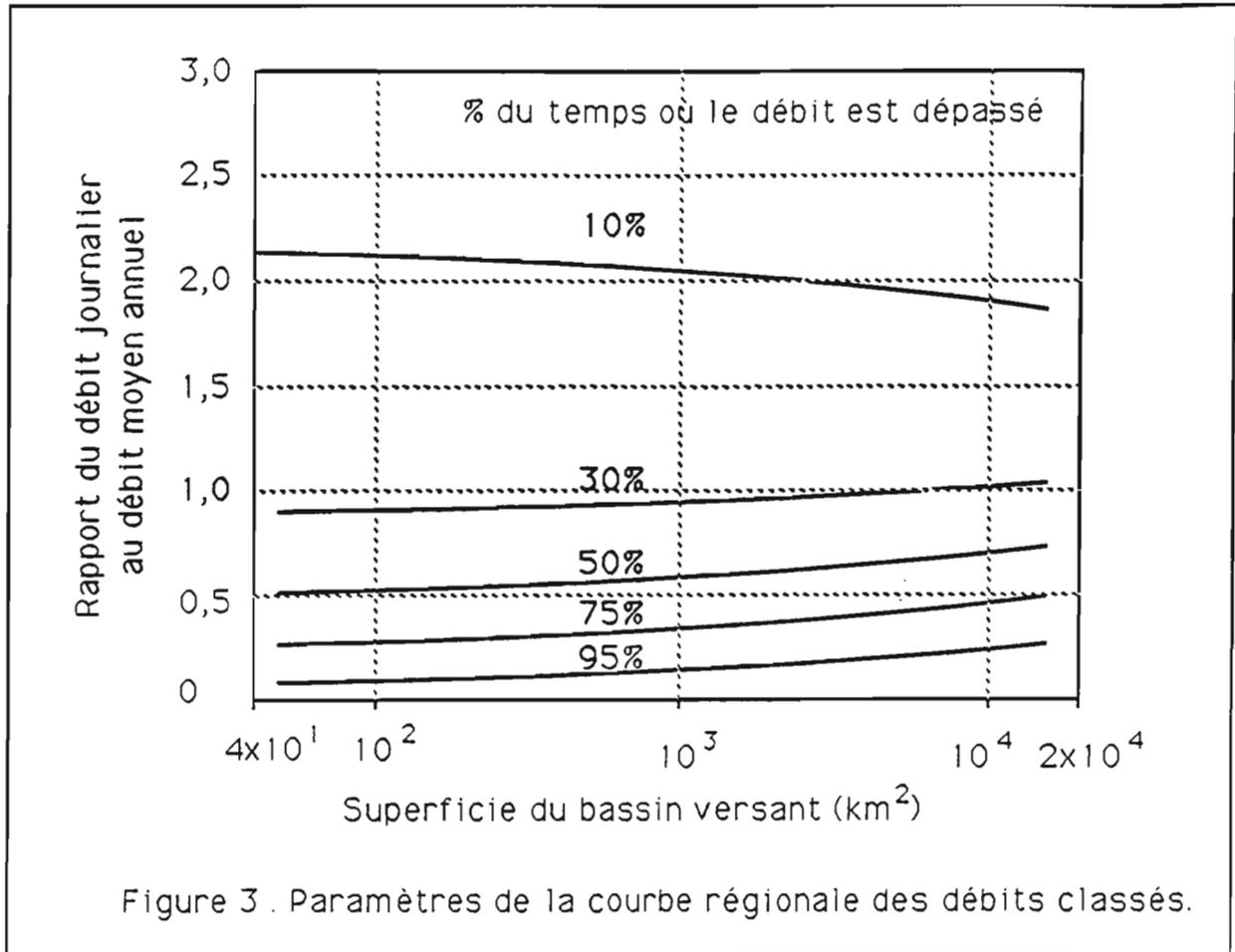
Compte tenu de la très grande variabilité des débits sur les petits bassins versants, le fait d'utiliser des débits journaliers entraîne une légère surestimation du nombre de jours pendant lequel un débit donné est dépassé, par rapport au résultat qui serait obtenu avec un pas de temps plus petit (débits instantanés) (figure 2). D'autre part, on sait que, même dans le cas d'une usine très automatisée, le fonctionnement des ouvrages ne permet pas de turbiner la totalité des débits turbinables. Par prudence, il convient donc dans les calculs de productible de procéder à un abattement de l'ordre de 10 % sur le volume turbinable obtenu à partir de valeurs journalières du débit.

- * Les courbes de débits classés peuvent être régionalisées. Pour cela on établit des courbes adimensionnelles pour chaque station en divisant les débits par le débit moyen annuel et on les porte sur un même graphique.

En général, pour une même région, la forme des courbes ainsi tracées peut être simplement reliée à la superficie du bassin versant pourvu que celui-ci ne comporte pas de lacs et de marécages et que le régime des précipitations ne soit pas trop variable.

On peut alors établir une relation régionale donnant le taux de débit journalier (par rapport au débit moyen annuel) dépassé pour différents pourcentages de temps, en fonction de la superficie du bassin versant (figure 3). Cette relation permet ensuite de construire la courbe des débits classés à n'importe quel site de la région dont on a préalablement déterminé la superficie du bassin versant.





5.4.3 Détermination du débit moyen annuel

- * Rappelons tout d'abord l'existence de synthèses régionales ou nationales permettant d'évaluer l'écoulement moyen annuel sur un bassin non jaugé (annexe 4). En particulier, l'ORSTOM a réalisé de telles synthèses pour la zone intertropicale africaine.
- * Pour un site non observé se trouvant en amont ou en aval d'une station hydrométrique, sans apport ou prélèvement souterrain intermédiaire, on peut admettre qu'en année hydrologique, le débit moyen au site est proportionnel à la superficie du bassin versant et de la précipitation :

$$Q_1 = \frac{S_1}{S_2} \times \frac{P_1}{P_2} \times Q_2$$

Q_1 : débit moyen annuel au site

Q_2 : débit moyen annuel à la station

S_1 : superficie du bassin versant au site

S_2 : superficie du bassin versant à la station

P_1 : précipitation annuelle sur le bassin versant du site

P_2 : précipitation annuelle sur le bassin versant de la station

- * Dans un cas plus général, lorsqu'il n'existe aucune donnée au site, on peut utiliser une méthode simple de bilan hydrologique effectué à l'échelle régionale. Cette méthode consiste à établir une relation régionale entre écoulement et précipitation de la façon suivante :

En schématisant les processus hydrologiques, on peut considérer que durant les périodes d'excédent des précipitations, l'évapotranspiration réelle (ETR) peut être supposée égale à son maximum potentiel, c'est-à-dire à l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est un facteur climatique calculable. Par contre, pendant les périodes déficitaires, les précipitations restent inférieures à l'ETP.

On peut alors définir mois par mois une pluie nette PN à partir de la pluie brute P en considérant le modèle simple suivant :

. Si $P - ETP \leq 0$ (période de déficit) $PN = 0$

. Si $P - ETP > 0$ (période d'excédent) $PN = P - ETP$

Pour estimer l'ETP du mois on utilisera de préférence la formule de PENMAN qui nécessite de disposer au minimum de données de température et humidité relative de l'air, de durée d'insolation et de vitesse du vent.

La pluie nette annuelle au poste pluviométrique considéré sera la somme PNA des 12 pluies nettes mensuelles ainsi calculées. Ce calcul, effectué pour tous les postes de la région, permettra de tracer les isohyètes de pluie nette interannuelle et d'estimer ensuite par planimétrie la pluie nette moyenne sur n'importe quel bassin versant.

En réalité, toute cette pluie nette ne donnera pas de l'écoulement car une partie S des pluies excédentaires, sert à la recharge en eau du sol et sera, soit perdue par infiltration profonde, soit reprise par évapotranspiration en saison sèche.

L'écoulement total annuel R est donc égal à la pluie nette PNA diminuée de cette quantité S, :

$$R = PNA - S$$

Or on constate très souvent que régionalement le terme S varie très peu d'un bassin à l'autre. Il est donc possible d'établir une telle relation à partir de toutes les stations hydrométriques et ensuite de l'appliquer au site étudié pour lequel on aura au préalable calculé PNA.

- * Quelle que soit la méthode utilisée pour déterminer le débit moyen annuel, il est conseillé de contrôler le résultat en comparant l'écoulement annuel (exprimé en lame d'eau sur le bassin) à la lame d'eau annuelle précipitée.

Il faut également comparer le débit spécifique annuel aux valeurs caractérisant le régime des cours d'eau voisins.

A titre indicatif, pour la France, on retiendra les ordres de grandeur suivant :

40 à 50 l/s.km ²	:	maxima observés sur des petits bassins versants de haute altitude dans les Alpes de Savoie et du Dauphiné et dans les Pyrénées Centrales et Atlantiques,
30 à 40 l/s.km ²	:	en altitude moyenne dans les Alpes et les Pyrénées et sur les zones culminantes du Massif Central, des Cévennes et des Vosges,
20 à 10 l/s.km ²	:	sur les contreforts des Pyrénées et des Alpes, le Jura, les Vosges, les monts de Bretagne,
5 à 10 l/s.km ²	:	en région de plaine.

On se rappellera cependant que des conditions géologiques locales peuvent considérablement modifier ces valeurs et cela d'autant plus que le bassin est petit.

5.4.4 Utilisation de modèles hydrologiques

* Généralités

Un modèle hydrologique est la représentation mathématique simplifiée de la réalité complexe que constitue ce bassin versant. Il schématise le processus de la transformation de la pluie en débit sur un bassin versant et permet donc de valoriser l'information pluviométrique généralement beaucoup plus abondante que l'information hydrométrique.

Il constitue un outil particulièrement intéressant pour générer les chroniques des débits nécessaires à l'étude de simulation du fonctionnement de l'aménagement, dans la mesure où l'on dispose de séries pluviométriques d'assez longue durée.

Compte tenu de la complexité des processus hydrologiques, le modèle physique universel de bassin versant reste une utopie et les modèles existants sont plutôt de type conceptuel tout en conservant une part d'empirisme et nécessitent un calage. Ce calage consiste à régler les paramètres du modèle par comparaison des débits calculés aux débits observés sur quelques années.

* Choix du modèle

Pour les études des petits aménagements hydro-électriques, il convient d'utiliser des modèles fonctionnant en continu au pas de temps journalier, qui soient fiables, faciles à mettre en oeuvre et restituant le mieux possible des débits de basses et moyennes eaux.

Opérant sur des petits bassins versants, nous préconisons les modèles globaux qui considèrent le bassin versant comme une seule entité et sont plus simples d'emploi que les modèles à discrétisation spatiale.

Parmi les nombreux modèles existants nous avons retenu trois modèles français adaptés sur micro-ordinateur et largement éprouvés :

- **Le modèle CREC** mis au point au début des années 1970 par la division Hydrologie de la DER-EDF en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc,
- **Le modèle GR3** élaboré en 1989 au CEMAGREF par C. MICHEL et EDIJATNO,
- **Le modèle MODGLO** élaboré à l'ORSTOM par G. GIRARD en 1974.

La description sommaire de ces trois modèles est donnée en annexe 6. Il s'agit de modèles conceptuels globaux à réservoirs, c'est-à-dire dans lesquels les opérateurs simulant les mécanismes de la formation et du transfert de l'écoulement, sont des ensembles de réservoirs munis d'un ou plusieurs orifices et ayant chacun leur loi de remplissage et de vidange.

Le logiciel informatique "EMILE", en cours de test à l'ORSTOM, regroupera ces trois modèles en assurant, sous une forme très "conviviale", leur calage automatique ou manuel et leur exploitation.

* Prédétermination des paramètres

Dans le cas général de l'absence de données au site, on peut procéder, dans un premier temps, à une prédétermination régionale des paramètres du modèle. On affinera ensuite ce réglage au fur et à mesure de l'acquisition de l'information complémentaire directement observée au site.

La prédétermination régionale des paramètres consiste à caler le modèle sur toutes les stations voisines et à établir (généralement par corrélations multiples) les relations entre ces paramètres et les caractéristiques physiques des bassins versants correspondants.

Lorsque le nombre de stations de la région est insuffisant, on peut se contenter d'un simple transfert analogique des valeurs attribuées aux paramètres du modèle obtenus sur le bassin versant le plus proche et ayant les caractéristiques physiques les plus voisines de celles du bassin versant du site.

5.5 Calcul des valeurs extrêmes

5.5.1 Les étiages

- On peut chiffrer les étiages par diverses valeurs caractéristiques dont on pourra faire l'analyse statistique :

le débit journalier minimum annuel,

le débit minimum instantané annuel,

le débit caractéristique d'étiage = débit dépassé 355 jours par an,

le débit moyen du mois le plus sec,...

Les faibles débits sont généralement connus avec une grande imprécision. Dès le début de l'étude, on s'efforcera donc de préciser les débits de basses eaux par une série de jaugeages consécutifs au cours de la saison sèche.

- En France, la loi de la pêche et de la gestion des ressources piscicoles en eau douce du 29 juin 1984 fixe **le débit réservé** (débit minimal à respecter dans le lit du cours d'eau) à 10 % du débit moyen annuel (voir paragraphe 5.4.3.). La valeur du débit réservé ainsi estimée devra être comparée aux différents débits caractérisant l'étiage.
- En région montagneuse, avec l'effet de rétention neigeuse on pourra avoir, selon l'altitude du site, soit des étiages estivaux, soit des étiages hivernaux.

5.5.2 Les crues

Il est nécessaire d'estimer la crue de projet et le niveau des plus hautes eaux possibles à la centrale.

- * Un aménagement au fil de l'eau n'aggrave pas le risque naturel de crue à l'aval ; le risque encouru par les crues est donc limité à la détérioration ou à la destruction des seuls ouvrages. La crue de projet à prendre en compte sera donc la crue de période de retour comprise entre 100 et 500 ans.
- * Il existe des synthèses régionales ou nationales qui permettent en général l'estimation de la crue décennale sur des petits bassins versants non jaugés (voir annexe 4).

Cela est vrai en particulier pour la France grâce aux travaux du Ministère de l'Agriculture (méthode SOCOSE et méthode CRUPEDIX - 1960), ainsi que pour la zone intertropicale africaine grâce aux travaux de l'ORSTOM.

A partir de la valeur décennale, l'extrapolation aux fréquences plus rares pourra être effectuée par **la méthode du gradex** dont on trouvera un rappel sommaire en annexe 7.

- * Lorsque l'on ne dispose pas de synthèse régionale, une méthode simple consiste à procéder de la façon suivante :

Dans une première étape, on effectue à chacune des stations hydrométriques de la région l'analyse des débits maximum annuels dont on calcule la moyenne \bar{Q} et le coefficient de variation Cv (rapport de l'écart-type à la moyenne).

Ensuite on établit les relations donnant \bar{Q} et Cv en fonction de la superficie du bassin versant. Si toutefois la corrélation n'est pas satisfaisante, on peut ajouter d'autres variables explicatives comme par exemple la pente, l'altitude, un indice de végétation ou la précipitation annuelle reçue par le bassin versant. Ces relations établies régionalement permettent donc la prédétermination du débit de crue annuel moyen \bar{Q} et du coefficient de variation Cv au site étudié.

En faisant l'hypothèse d'une loi de distribution des crues annuelles de type GUMBEL (double exponentielle), on peut estimer le débit de crue $Q(T)$ de période de retour T par l'expression :

$$Q(T) = \bar{Q} [1 + C_v (0,78 u(T) - 0,45)]$$

avec $u(T) =$ variable réduite de Gumbel = $\text{Log} (- \text{Log}(1 - 1/T))$

Comme dans le cas précédent, l'extrapolation aux fréquences rares peut être faite à partir de la valeur décennale ou vingtennale par la méthode du Gradex.

- * Pour de très petits bassins (superficie $< 100 \text{ km}^2$) relativement imperméables, on peut utiliser **la méthode rationnelle** qui donne le débit de pointe $Q(T)$ de la crue de période de retour T années par l'expression :

$$Q(T) = K C i_T S$$

K : coefficient dépendant des unités (pour Q_T en m^3 , i_T en mm/h , S en km^2 on a $K = 0,2778$),

C : coefficient de ruissellement ($0 \leq C \leq 1$) généralement considéré comme dépendant des caractéristiques du bassin versant et de l'averse,

i_T : intensité de l'averse de durée égale au "temps de concentration" du bassin et de période de retour T ,

S : superficie du bassin versant.

- Le temps de concentration t_c est théoriquement défini comme le temps nécessaire à une particule d'eau pour se mouvoir du point le plus éloigné hydrauliquement du bassin jusqu'à l'exutoire. En pratique, ce temps de concentration est estimé sur les hydrogrammes de crue en utilisant en fait le temps de réponse du bassin qui sépare le centre de gravité (ou la pointe) du hétérogramme (moyen du bassin) du centre de gravité (ou de la pointe) de l'hydrogramme correspondant.

Ce temps de concentration t_c peut être approché par la formule de PASSINI :

$$t_c = \alpha \frac{\sqrt[3]{SL}}{\sqrt{p}}$$

t_c en heures, S : superficie du bassin versant en km^2 ,

L : longueur total du thalweg le plus long en km , p : pente moyenne en % défini par :

$$\frac{1}{\sqrt{p}} = \frac{1}{L} \sum \frac{\Delta l}{\sqrt{p_1}}$$

Δl = longueur de la partie du thalweg de pente p_1

α : coefficient variant de 0,5 à 4 (si la pente est en %) en fonction de la fréquence des pluies et de l'état du sol. En première approximation, on prendra $\alpha = 1$, la pente P étant exprimée en %.

- Le coefficient de ruissellement C est défini par le rapport du volume total ruisselé au volume total de la pluie. Il est généralement estimé régionalement en fonction des caractéristiques physiques du bassin versant,
- l'intensité de "l'averse de projet" (durée égale à t_c et de période de retour T) est obtenue à partir des courbes "intensité - durée - fréquence" résultant de l'analyse statistique des averses sur une station régionale proche du site. Pour passer de cette intensité à l'intensité moyenne sur le bassin versant, on procède généralement à un abattement qui dépend de la taille du bassin et de la durée de l'averse.
- * Un contrôle de l'estimation de la crue de projet peut être fait en utilisant la méthode des courbes enveloppes qui donne en principe la limite supérieure des pointes de crues possibles pour une région considérée.
Ainsi la formule de FRANCOU-RODIER, établie à partir de 1500 crues-record observées dans le monde, s'écrit :

$$Q_{\max} = 10^6 (S \cdot 10^{-8})^{1 - K/10}$$

Q_{\max} : débit maximum de crue en m^3/s

S : superficie du bassin versant en km^2

K : coefficient compris entre 0 et 6, fonction de facteurs climatiques et géographiques

Le coefficient K est une constante dans des régions hydrologiquement homogènes.

$$K = 10 - 10 \frac{\log Q - 6}{\log S - 8}$$

On comparera donc la valeur de K obtenue pour la crue de projet du site aux valeurs locales de K correspondant aux crues maximales observées aux stations voisines. Il faut cependant considérer que la formule de FRANCOU RODIER n'est plus valable pour les très petits bassins versants (superficie inférieure à $50 km^2$) pour lesquels la crue maximale est de plus en plus dépendante de l'intensité pluviométrique maximale.

- * Enfin, nous recommandons vivement de procéder à une visite de terrain afin de recueillir le maximum de renseignements sur les conditions d'écoulement sur le bassin versant et les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau au niveau du site (profil en travers, observation du lit pour en déduire les coefficients de rugosité, examen des laisses de crues, examen des dépôts solides,...). On complétera cette visite par une enquête auprès de la population sur les plus fortes crues observées dans le passé.

- * Pour estimer les plus hautes eaux possibles à l'usine, il faudra établir, au moins sommairement, la relation hauteur/débit au site et disposer de relevés topographiques. Cette relation hauteur/débit pourra être ébauchée avec quelques jaugeages mais nécessitera une forte extrapolation pour laquelle on utilisera l'information recueillie sur le terrain (profil en travers, coefficients de rugosité, etc...)

5.6 Qualité de l'eau

5.6.1 Transports solides

- * Il convient d'évaluer sommairement le risque causé par les transports solides et leur sédimentation au niveau de la prise : comblement et abrasion.

Les données sur les transports font généralement défaut sur les petits bassins versants et leur mesure est difficile.

On pourra se contenter d'une estimation globale à partir de l'évaluation du taux d'érosion annuel sur le bassin versant.

Pour cela on pourra utiliser la formule empirique de FOURNIER (1960) qui est une adaptation de l'équation universelle de perte au sol :

$$E = \frac{1}{36} \frac{(Px^2)^{2,65} (H^2)^{0,46}}{(Pa) (S)}$$

E : apport solide annuel moyen spécifique (en tonne/km².an)

Px : précipitation mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (en mm)

Pa : précipitation annuelle moyenne (en mm)

H : dénivelée moyenne d'après la courbe hypsométrique (en m)

H \approx 45 % de la différence (altitude max - altitude min)

S : superficie du bassin versant (en km²)

Cette formule donne un ordre de grandeur de l'apport solide total sur un bassin versant (transport en suspension et transport par charriage).

- * Le processus d'abrasion est lié à la taille, à la forme et à la nature minéralogique des matériaux transportés.

On procédera à un examen des sédiments déposés dans la rivière et, éventuellement, à une analyse de leur répartition granulométrique.

5.6.2 Composition chimique

Pour les travaux de génie civil et l'équipement en matériel hydraulique, il est important d'avoir des informations sur la qualité chimique de l'eau et en particulier sur le pH et la dureté totale.

Ainsi, certaines eaux pures de montagne ou de régions volcaniques peuvent avoir des actions dissolvantes sur certains liants (les ciments Portland notamment).

On effectuera donc à divers moments de l'année quelques prélèvements qui seront analysés par un laboratoire spécialisé.

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- OUVRAGES GENERAUX D'HYDROLOGIE

CHOW (V.T.) 1964 "Handbook of applied Hydrology".
Mc Graw-Hill book Company, New York.

DUBREUIL (P.) 1974 "Initiation à l'analyse hydrologique".
Masson & C^{ie}, éditeurs, Paris.

GRAY (D.M.) 1972 "Manuel des principes d'Hydrologie".
Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale,
Ottawa.

LLAMAS (J.) 1985 "Hydrologie générale : Principes et Applications".
Edition Gaëtan Morin, Québec.

REMIERAS (G.) 1965 "L'hydrologie de l'ingénieur". 2^{eme} édition Eyrolles ,
Paris.

ROCHE (M.) 1963 "Hydrologie de surface". Gauthier - Villars , Paris.

- HYDROLOGIE DES PETITS AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

CACAS (J.), DUMONT (B.) 1985 "Petite hydraulique et débit réservé"
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME,
Sophia Antipolis , octobre 1985.

DEGOUTTE (G.), LAVABRE (J.) 1985 "Méthodologie d'un inventaire de sites
potentiellement équipables en micro-centrales hydro-électriques.
évaluation des productions électriques".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME,
Sophia Antipolis , octobre 1985.

DOSSEUR (H.) 1985 "Hydrological study for mini hydros projects in west
Sumatra (Indonesia).
ORSTOM , Renardet Engineering, Paris, décembre 1985.

DUBREUIL (P.) 1973 "Le transfert d'information hydrologique à des bassins
versants non observés".
Colloque sur l'élaboration des projets d'utilisation des ressources en
eau sans données suffisantes. UNESCO - WMO - AISH, Madrid, juin 1973.

EMSELEM (Y.) 1985 "Reconstitution des données manquantes".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia
Antipolis , octobre 1985.

FAFOURNOUX (P.Y.) 1985 "Etude hydrologique des projets de mini-centrales
hydro-électriques. Quelques réflexions sur les méthodes utilisables".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME,
Sophia Antipolis , octobre 1985.

- FILIPPI (C.), SCHWARTZ (J.), THIERY (D.)** 1985 "Estimation des potentialités hydro-électriques d'une micro-centrale par utilisation d'un modèle hydrologique pluie-débit".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.
- FILIPPI (C.), SCHWARTZ (J.), THIERY (D.)** 1985 "La Banque de données PROPHETE pour l'estimation de la production potentielle hydro-électrique d'une micro-centrale sur tout le territoire français".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.
- LAMAGAT (J.P.)** 1985 "Inventaire de la ressource en eau et mini centrales. Etude de cas : Mali, Madagascar, Maurice".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.
- MONITION (L.), LE NIR (M.), ROUX (J.)** 1981 "Les micro-centrales hydro-électriques". chapitres I et II. Masson, Paris.
- OBERLIN (G.), GOUSSE (F.)** 1985 "Hydrologie des micro-centrales hydroélectriques. Propositions pour une méthodologie renouvelée".
CEMAGREF Etude N° 521 - 522 , mars - avril 1985.
- SKOKLAVSKY, MASAWA** 1986 "Hydrological aspects of mini hydropower plants in Tanzania".
Water Power & Dam construction. Second international conférence , Small Hydro , Hangzhou , avril 1986.
- THOMAS (A.), MICHEL (C.)** 1985 "Contribution à un inventaire national des potentialités hydro-électriques".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.
- TOURASSE (M.)** 1985 "Distribution des débits moyens journaliers et régime d'un cours d'eau".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.
- TUDOR Engineering Company** 1984 "A methodology for regional assessment of small scale hydropower".
World Bank Energy Department. Paper N°14 , San Francisco, may 1984.
- VIVIAN (H.)** 1985 "Régimes hydrologiques et nouvelle tarification d'achat de l'électricité : Pour une bonne implantation des micro-centrales".
Colloque "Petite Hydraulique. Problèmes de développement" , AFME, Sophia Antipolis , octobre 1985.

ANNEXES

ANNEXE 1

<p align="center">ORGANISMES DETENTEURS D'INFORMATION HYDROLOGIQUE</p>

1. INFORMATION CONCERNANT LA FRANCE**- Ministère de l'Environnement :**

Direction de l'Eau et de la Prévention des pollutions et des Risques : Service de l'Eau
14, bd Général Leclerc 92524 NEUILLY CEDEX - Tél.(1) 47.58.12.12 - Fax.(1)

47.45.04.74

Directions régionales de l'Environnement (DIREN) :

Vingt-trois DIREN ont été créées le 4 novembre 1991 par fusion :

- des Services Régionaux d'Aménagement des Eaux (SRAE),
- des Délégations de bassin,
- des Services Hydrologiques Centralisateurs (SHC),
- des Délégations Régionales de l'Architecture et de l'Environnement (DRAE).
- ALSACE : 8, rue Adolphe Seyboth, B.P.59 67067 Strasbourg CEDEX Tél.88.32.16.00
- AQUITAINE :59 bis, cours Victor Hugo, B.P. 44 33037 Bordeaux CEDEX Tél.56.52.13.12
Fax.56.81.82.20
- AUVERGNE : 15, rue Fontgiève 63000 Clermont-Ferrand Tél.73.30.82.10
- BASSE-NORMANDIE : 1 bis, rue Leroy 14037 Caen Tél.31.44.45.00 Fax.31.44.72.81
- BOURGOGNE : 6, rue Chancelier de l'Hôpital B.P. 1350 21035 Dijon CEDEX
Tél.80.63.66.00
- BRETAGNE : 10, rue des Dames 35000 Rennes Tél.99.65.34.34 Fax.99.30.85.61
- CENTRE : 131, faubourg Bannier 45000 Orléans Tél.38.54.16.48
Délégation de bassin Loire-Bretagne avenue Buffon Tél.38.51.74.60
S.H.C. avenue Buffon Tél.38.51.74.73
- CHAMPAGNE-ARDENNE : 15, avenue du Maréchal Leclerc 51037 Chalons-sur- Marne
Tél.26.64.69.04 Fax.26.21.11.57
- CORSE : 19, cours Napoléon, B.P.197 20179 Ajaccio Tél.95.21.71.81
- FRANCHE-COMTE : 5, rue du Général Sarrail B.P.137 25014 Besançon Tél.81.61.53.33
- HAUTE-NORMANDIE : 21, avenue de la porte des champs 76037 Rouen CEDEX
Service de l'Aménagement des eaux : 1, rue Dufay Tél.35.62.50.52 et Cité administrative
Saint Sever Tél 35.58.56.90
- ILE-DE-FRANCE 2, rue Goethe, 75116 Paris
- LANGUEDOC-ROUSSILLON : 38, rue Pitot 34000 Montpellier Tél.67.61.09.09.
- LIMOUSIN : 8, cours Bugeaud 87000 Limoges Service Aménagement des eaux :
19, Bd Corderie 87000 Limoges Tél.55.32.44.27 Fax.55.32.55.21

- LORRAINE : 29, rue des Murs 57000 Metz Tél.87.36.14.06 Fax.87.36.96.00
- MIDI-PYRENEES : 16, rue Rivals 31000 Toulouse Tél.61.21.90.93 Fax.62.27.16.98
- NORD-PAS-DE-CALAIS : 4, rue Gombert 59041 Lille CEDEX Tél.20.30.83.83
Service de l'eau : 41, rue Puébla 59000 Lille Tél.20.57.95.62
- PAYS DE LOIRE : 93, rue de la Bastille B.P.1015 44036 Nantes CEDEX Tél.40.99.58.00
Agence de Bassin Loire-Bretagne : 2, rue Eugène Varlin 44000 Nantes Tél.40.73.06.00
S.H.C. : 47, rue Bouillon 44000 Nantes Tél.40.43.18.35
- PICARDIE : 56, rue Jules Barni 80000 Amiens Tél.22.82.90.40 Fax.22.97.97.89
- POITOU-CHARENTES : 8, rue Jean Jaurès 86000 Poitiers Tél.49.41.23.00 Fax.49.60.23.71
- PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR : 28, bd François et Emile Zola 13100 Aix-en-Provence Tél.42.33.32.31
S.H.C. Rhône : Cap au Nord Couestes Coutero, chemin départemental 13 Tél 42.54.70.57
- RHONE-ALPES : 19, rue de la Villette 69425 Lyon 03 Tél.72.33.04.28
S.R.A.E : 3, quai Chauveau, 69009 Lyon CEDEX 3 Tél.78.83.88.77
S.H.C. : 1, place Antoine Perrin 69007 Lyon Tél.78.61.11.04
- ANTILLES-GUYANE : rue de la Ville d'Orly Bergevin B.P.1002 97110 Pointe à Pitre Tél.19.(590).83.53.26 et 19.(590).83.46.69
Délégation régionale de Guyane : 28, Bd Jubelin 97300 Cayenne Tél.19.(594).37.89.80
- **Ministère de l'Agriculture :**
C.E.M.A.G.R.E.F (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts) Division Hydrologie :
Parc de Tourvoie, BP 121 92185 ANTONY - Tél.(1) 40.96.61.21. - Fax.(1) 40.96.61.39
- **Agences Financières de Bassin :**
 - ADOUR-GARONNE : 90,rue du Férétra, 31078 Toulouse CEDEX Tél.61.36.37.38.
Fax.61.36.377.28.
 - ARTOIS-PICARDIE : 764, bd Lahure 59508 Douai Tél.27.87.01.94.
 - LOIRE-BRETAGNE : Avenue Buffon B.P.6339 45063 Orléans CEDEX 2 Tél.38.51.73.73.
Fax.38.51.74.74.
 - RHIN-MEUSE : Route de Lessy Rozerieulles B.P.19 57161 Moulins-les-Metz
Tél.87.34.47.00.
 - RHONE-MEDITERRANEE-CORSE : 31, rue Jules Guesde 69310 Pierre-Bénite
Tél.72.39.48.48.
 - SEINE-NORMANDIE : 51, rue Salvador Allende 92027 Nanterre CEDEX
Tél.(1)47.76.44.24.
- **Electricité de France :**
Production Hydraulique Division Technique Générale Service Ressources en Eau :
Siège Central de GRENOBLE : 37, rue Diderot B.P.41 38040 Grenoble CEDEX
Tél.76.20.80.00.
Echelon de BRIVE : 16, avenue Alsace-Lorraine B.P.423 19311 Brive CEDEX
Echelon de LYON : 12-14, rue Saint Sidoine B.P. 3065 69395 Lyon CEDEX 3
Echelon de TOULOUSE : 2 bis, rue Bernard Mulé B.P.4348 31029 Toulouse CEDEX

- **Compagnie Nationale du Rhône (C.N.R.) :**
2, rue André Bonin 69316 Lyon CEDEX 04
- **Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône-et du Languedoc :**
1105, avenue P.Mendès-France B.P.4001 30001 Nîmes CEDEX
- **Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne :**
chemin Lalette 65000 Tarbes Tél.62.51.71.49. Fax.62.51.71.30.

2.INFORMATION CONCERNANT LES DOM-TOM ET L'ETRANGER

- **O.R.S.T.O.M. (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) :**
Laboratoire d'Hydrologie :
911, avenue d'Agropolis B.P.5045 34032 Montpellier CEDEX Tél.67.61.74.00.
- **U.N.E.S.C.O. :**
Division des Sciences de l'Eau:
7, place de Fontenoy 75700 Paris Tél.(1)45.68.39.99. Fax (1)45.67.58.69.
- **O.M.M. :**
Département Hydrologie et Ressources en Eau :
41, avenue G. Motta , B.P.2300 CH 1211 Genève 2 Suisse
Tél. 41.22.730.81.11
L'O.M.M. tient à jour la liste des adresses des services hydrologiques nationaux des pays membres de cette organisation Ces informations sont fournies sous forme de 6 tableaux correspondant aux 6 régions OMM.

ANNEXE 2

LOGICIELS DE TRAITEMENT DES DONNEES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES

1. TRAITEMENT DES DONNEES HYDROMETRIQUES**- HYDROM**

Logiciel développé par l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération) permettant de stocker, gérer et traiter toute l'information hydrométrique.

Utilisable sur micro-ordinateur IBM ou compatible sous système DOS, ce logiciel est distribué par le Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM accompagné d'une documentation.

Adresse : Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM B.P.5045 34032 Montpellier CEDEX.
Tél.67.61.74.00.

- DEPLIMNI

Logiciel développé par le Service Hydrologique Centralisateur Rhône-Alpes permettant la gestion des fichiers limnimétriques : saisie, critique, édition des fichiers de hauteurs d'eau.

Adresse : S.H.C. de la Région Rhône-Alpes, Lyon

- DEPOUSSABLE

Logiciel de gestion des fichiers hydrométriques développé par le Service Régional d'Aménagement des Eaux de Champagne-Ardenne.

Adresse : S.R.A.E. Champagne-Ardenne Mont Bernard, 51037 Chalons-sur-Marne.
Tél.26.66.20.50.

- OMNHYDRO

Logiciel de gestion des fichiers limnimétriques développé par la Société HYDROLOGIC
Adresse : 2, rue du Tour d'Eau 38400 Saint-Martin d'Heres Tél.76.51.53.54.
Fax.76.42.40.70.

2. TRAITEMENT DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

- PLUVIOM

Logiciel développé par l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération) permettant de stocker, gérer et traiter toute l'information pluviométrique

Utilisable sur micro-ordinateur IBM ou compatible sous système DOS, ce logiciel est distribué par le Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM accompagné d'une documentation

Adresse : Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM B.P.5045 34032 Montpellier CEDEX.
Tél.67.61.74.00.

- CLICOM

Logiciel développé par l'O.M.M. (Organisation Mondiale de la Météorologie) permettant la gestion de fichiers climatologiques

Adresse : O.M.M. Boite Postale 2300 CH 1211 Genève 2 Suisse

ANNEXE 3

HOMOGENEISATION DES DONNEES

1.HOMOGENEITE DES SERIES

Une fois l'information hydropluviométrique rassemblée, il faut absolument tester l'homogénéité des séries observées afin de déceler les éventuels écarts systématiques dûs à des changements naturels (changements climatiques par exemple) ou artificiels imputables le plus souvent à des modifications du mode de mesure.

Nous résumons ici quelques méthodes simples permettant d'effectuer une vérification de l'homogénéité des chroniques.

1.1.Comparaison des séries de précipitations entre elles

Les séries longues de précipitations sont comparées deux à deux par la méthode suivante dite du "double cumul" (Roche 1963, Brunet-Moret 1971, Bois 1976):

Si P1 et P2 sont les précipitations annuelles concomitantes à deux stations voisines, on suppose une liaison linéaire entre P1 et P2 de la forme :

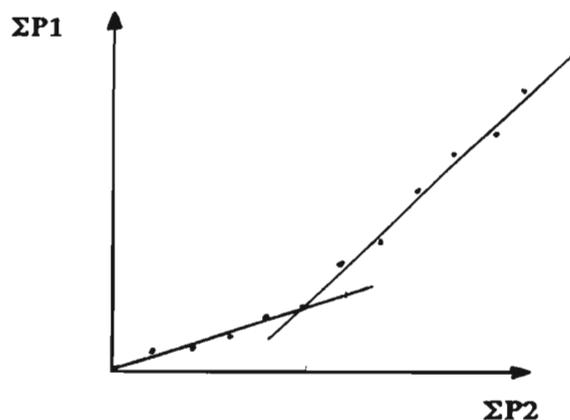
$$P1 = k.P2 \pm \epsilon_{p1} \quad (1)$$

Les écarts ϵ_{p1} sont indépendants d'une année à l'autre avec une distribution symétrique proche d'une loi Normale de moyenne 0 et d'écart-type $\sigma_{\epsilon p1}$

L'écart-type de ces écarts demeure très petit devant P1, soit :

$$\sigma_{\epsilon p1} \ll P1$$

Une modification dans les conditions de fonctionnement de l'un des postes pluviométriques se traduit par une augmentation ou une diminution systématique, brutale ou progressive, de la quantité de pluie captée. Elle apparaît dans la relation (1) par une évolution brutale ou progressive du coefficient k de la liaison entre P1 et P2, c'est à dire par une rupture de pente sur la droite du double cumul.



1.2. Séries de débits comparées aux séries de précipitations

L'écoulement annuel E sur un bassin versant est donné par le bilan hydrologique suivant :

$$E = PBV - D \pm S$$

E : Ecoulement annuel

PBV : lame d'eau annuelle précipitée sur le bassin versant

D : Déficit d'écoulement

S : Variation de stock dans le bassin versant (sol + nappe)
entre le début et la fin de l'année

L'utilisation des précipitations annuelles à une station à la place de la lame d'eau moyenne sur le bassin PBV conduit à un écart systématique auquel s'ajoute une dispersion aléatoire ϵ_{PBV} ; on a :

$$PBV = k.P \pm \epsilon_{PBV}$$

Le déficit d'écoulement est assez peu variable d'une année à l'autre. Il se représente à partir de la moyenne interannuelle D par $D \pm \epsilon_D$

En définitive on a :

$$E = k.P - D \pm \epsilon_{PBV} \pm \epsilon_D \pm S = k.P - D \pm \epsilon_E$$

La liaison $E = f(P)$ n'est pas tout à fait linéaire et les résidus des écoulements ne sont pas totalement indépendants d'une année à l'autre. En double cumul les séries homogènes d'écoulements et de précipitations font apparaître des oscillations autour d'une direction théorique rectiligne qui demeure prépondérante.

2.HOMOGENEISATION PAR LA METHODE DU VECTEUR REGIONAL

Cette méthode qui a été mise au point par G.HIEZ (ORSTOM), repose sur deux principes fondamentaux :

- Les séries de totaux pluviométriques de postes voisins, situés dans une même région climatique, sont *pseudo-proportionnelles entre elles*; cela signifie que les variations de la pluviosité entre tous les postes de la région sont concomitantes.
- *L'information la plus probable* est celle qui se répète la plus fréquemment; cela signifie que la pluviosité d'une année donnée sera celle indiquée par le plus grand nombre de postes.

Le processus de calcul utilisé, basé sur le principe du maximum de vraisemblance, est conçu de manière à ce que toute l'information contenue dans chacune des séries composant la matrice régionale, contribue à l'élaboration d'une série de référence "la plus probable", appelée *vecteur régional*.

Chaque poste est ensuite comparé à ce vecteur par l'intermédiaire d'un procédé graphique de double cumul. Pour chaque année, l'écart entre la valeur observée et la valeur calculée à partir de la valeur correspondante du vecteur, permet d'estimer si l'année est en concordance avec la tendance régionale ou, si ce n'est pas le cas, de connaître l'amplitude de l'écart.

Le logiciel MVR développé par l'ORSTOM permet la mise en oeuvre de cette méthode.

Références bibliographiques :

Bernier J. (1977) Etude de la stationnarité des séries hydro-météorologiques. La Houille Blanche, no 4 - 1977.

Bois Ph. (1976) Contribution à la critique et à la prévision de variables hydro-météorologiques.
Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

Brunet-Moret Y. (1971) Etude de l'homogénéité des séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses.
Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. VIII-4

Hiez G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques.
Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIV-2

Masson J.M. , Saurin J. (1978a) "Tests ne mettant en jeu que la série elle même".
Analyse critique des séries limnimétriques.
Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, USTL, Montpellier.

Masson J.M. , Saurin J. (1978b) "Tests mettant en jeu deux séries voisines et concomitantes de hauteurs". Analyse critique des séries limnimétriques.
Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, USTL, Montpellier.

ORSTOM (à paraître) Homogénéisation des données pluviométriques par la Méthode du Vecteur Régional; Logiciel MVR
Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier.

ANNEXE 4

ETUDES ET SYNTHES REGIONALES

1.FRANCE**1.1 Etudes générales**

de BEAUREGARD J. (1978) Les bas débits des cours d'eau en France; étiages normaux et exceptionnels, fréquence, répartition.

Bulletin du BRGM, sect.III, n°3, 1978 , p.215-223.

FILIPPI C. , SCHWARTZ J. , THIERY D. (1985) La Banque de données "PROPHETE" pour l'estimation de la Production Hydroélectrique d'une microcentrale sur tout le territoire français (BRGM).

Colloque "Petite Hydraulique - Problèmes de développement". AFME - Sophia Antipolis, octobre 1985

THOMAS A. , MICHEL C. (1985) Contribution à un inventaire national des potentialités hydroélectriques (CEMAGREF).

Colloque "Petite Hydraulique - Problèmes de développement". AFME - Sophia Antipolis, octobre 1985

MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1980) Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants

- Fascicule 1 : Elements de pluviométrie

- Fascicule 2 : La méthode SOCOSE - Méthode sommaire d'estimation de la crue décennale sur un petit bassin versant non jaugé.

- Fascicule 3 : La méthode CRUPEDIX - Méthode d'estimation du débit de crue de fréquence décennale sur un bassin versant non jaugé à partir des précipitations et d'un paramètre régional.

SRAE, Direction de l'Aménagement - CTGREF, Division Hydrologie, Hydraulique Fluviale.

1.2 Etudes régionales

DDA , ENITRTS , CEMAGREF-Aix en Provence (1982) Méthodologie d'un inventaire de sites potentiels de microcentrales en Haute-Savoie.

EPR , SRAE , CEMAGREF-Antony (1982) Etude de la potentialité des petits cours d'eau de Bourgogne.

SMA , DDA , CEMAGREF-Antony (1982) Aménagement hydroélectrique de la moyenne vallée de l'Ognon. Faisabilité technico-économique.

DACHARY M. (1974) Hydrologie de la Loire en amont de Gien

Publication du département de géographie de l'Université de Paris Sorbone N° 1

ORSTOM Monographies Hydrologiques :

- Les Ressources en Eau de surface de la MARTINIQUE (1976)
- Les Ressources en Eau de surface de la GUADELOUPE (1985)

2.AFRIQUE

2.1 Etudes générales

RODIER J.A. (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo.
Mémoires ORSTOM , n° 6 , Paris 1964.

RODIER J.A. (1975) Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain.
Travaux et Documents de l'ORSTOM , n° 46 , Paris 1975.

RODIER J.A. (1976) Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches de l'Afrique occidentale.
Cahiers ORSTOM , série Hydrologie , vol. XIII , n° 4 , 1976.

RODIER J.A., AUVRAY C. (1965) Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km².
ORSTOM, CIEH , juillet 1965, réimpression octobre 1972.

RODIER J.A. (1976) Estimation des crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale.
Cahiers ORSTOM , série Hydrologie , vol. XIII , n° 4 , 1976.

RODIER J.A. (1984) Caractéristiques des crues sur des petits bassins versants représentatifs au Sahel.
Cahiers ORSTOM , série Hydrologie , vol. XXI , n° 2 , 1984-1985.

2.2 Etudes régionales

ORSTOM Monographies Hydrologiques :

- Le Bassin du Fleuve SENEGAL (1974)
- Le Bassin du Fleuve CHARI (1974)
- Le Bassin de la Rivière SANAGA (1975)
- Le Bassin du Fleuve VOLTA (1977)
- Le Bassin de la MEJERDAH (1981)
- Le Bassin du Fleuve NIGER (1986)
- Fleuves et Rivières du CAMEROUN (1986)
- Monographie Hydrologique du Fleuve GAMBIE (1990)
- Les Ressources en eaux superficielles du Bénin (à paraître)
- Monographie de l'Oubangui (à paraître)
- Monographie du Lac Tchad (à paraître)
- Fleuves et Rivières de Madagascar (à paraître)
- Fleuves et Rivières du Gabon (à paraître)

ANNEXE 5

HYDROMETRIE

1.INTRODUCTION

La connaissance du régime d'un cours d'eau ne peut être correctement appréhendée que par un contrôle continu des débits sur une longue période.

Sauf de rares exceptions (stations-usines par exemple), ce contrôle continu ne se fait que par le suivi des variations du niveau de l'eau au droit d'une section de la rivière pour laquelle on établit un étalonnage, c'est à dire la relation hauteur d'eau/débit. Cet étalonnage est réalisé point par point par des mesures simultanées du débit et de la hauteur (jaugeages) couvrant si possible toute la gamme de variation du niveau.

Nous ne soulignerons ici que les aspects importants des techniques hydrométriques concernant les petits bassins versants.

2.LIMNIMETRIE**2.1 Echelle limnimétrique**

Le dispositif usuel permettant la mesure continue du niveau d'eau est l'échelle limnimétrique qui est en principe inamovible. Elle est généralement constituée de plusieurs éléments pouvant être séparés. Elle doit être nivelée par rapport à un système de référence et ce nivellement doit être contrôlé au cours du temps. Lorsqu'elle n'est pas doublée d'un appareil enregistreur du niveau, elle doit être lue par un observateur avec une fréquence suffisante et d'autant plus grande que le débit varie rapidement, ce qui est généralement le cas sur les petits bassins versants en période de crue.

2.2 Capteurs limnimétriques

Ce sont des dispositifs de nature variée qui restituent avec une plus ou moins bonne précision les mouvements du plan d'eau. Cette restitution se fait, soit sur un graphe, soit sur un support d'enregistrement magnétique, soit sur une mémoire statique. La précision souhaitée est de l'ordre de 1 cm pour une étendue de mesure pouvant dépasser 10 m.

On se bornera ici à citer les trois grandes familles de capteurs usuels:

- **Le flotteur** qui est le plus simple et le plus courant mais nécessite une installation coûteuse dans un puits de tranquillisation vertical très vulnérable aux crues et aux risques d'ensablement.

Exemples : limnigraphes OTT types X, R16 ou R20.

- **Le capteur pneumatique** (système "bulle à bulle" notamment) qui est moins vulnérable et dont la mise en place est plus facile et moins coûteuse mais dont l'infrastructure reste importante, et l'autonomie limitée.
Exemples : limnigraphe OTT type 20.501, limnimètre pneumatique numérique HYDRLOGIC type LPN8.
- **Le capteur de pression** basé sur l'effet piézoélectrique qui est robuste, assez précis, peu encombrant et très facile à installer (sonde immergeable)
Exemples : limnimètre statique EDF-DTG, sonde SPI III ELSYDE

2.3 Centrales d'acquisition automatiques

Il existe actuellement des systèmes fiables, autonomes, faciles à installer et à exploiter, permettant l'acquisition automatique et éventuellement la télétransmission de l'information hydrométrique. Ces nouveaux matériels de mesure font appel à une technologie de pointe en électronique et en informatique. L'utilisation complémentaire de la télétransmission accroît considérablement leur fiabilité en permettant le contrôle à distance de leur fonctionnement.

Une structure type comprend les éléments suivants :

- **Un capteur limnimétrique** "intelligent" qui est en général une sonde piézorésistive à codage numérique.
- **Une centrale de mesure** qui assure l'interrogation programmée du capteur, la mémorisation de l'information hydrométrique et des paramètres de contrôle du fonctionnement.
Le stockage sur le site se fait en général sur des mémoires statiques EPROM qui constituent des supports très robustes de grande capacité et réutilisables après déstockage direct dans une banque de données informatisée.
- **Un émetteur** permettant la télétransmission radio ou satellitaire (systèmes ARGOS ou METEOSAT)

Exemples : centrale ELSYDE type CHLOE, centrale AUTEG type EMAC 90, plate-forme CEIS ESPACE types PH11 et PH18.

3. MESURE DES DEBITS

La mesure des débits est une affaire de spécialistes.

Les deux procédés usuels de mesure des débits des rivières sont le jaugeage au moulinet et le jaugeage par la méthode de dilution. Nous n'insisterons pas sur ces techniques déjà anciennes et largement décrites dans de nombreux ouvrages spécialisés (voir bibliographie en fin de cette annexe)

3.1 Jaugeage au moulinet

La méthode consiste à explorer à l'aide d'un moulinet le champ des vitesses dans une section de la rivière dont on détermine simultanément la géométrie.

On utilise surtout des moulinets à hélice axiale (OTT, NEYRPIC, SIAP) et dans le cas des petites rivières à faible tirant d'eau et faibles vitesses, le moulinet est le plus souvent fixé sur une perche (jaugeage à partir d'une passerelle) ou d'une microperche (jaugeage dans la rivière). Pour des rivières plus importantes, le moulinet est porté par un "saumon" (lest profilé) suspendu à un câble à partir d'un treuil mobile (cyclopotence), d'une traille téléphérique (installation fixe) ou d'un bateau.

Il est important de bien choisir la section de jaugeage et d'utiliser un matériel bien adapté à l'état de la rivière. On recherchera une section peu éloignée de l'échelle limnimétrique où l'écoulement présente un bon parallélisme des filets liquides, ceux-ci étant perpendiculaires à la section de mesure. On s'assurera que la totalité du débit passe à travers la section jaugée et que le fond est suffisamment régulier pour que sa détermination et la mesure de la vitesse à sa proximité soient relativement aisées (éviter les gros blocs).

Les mesures de vitesse sont effectuées point par point sur une verticale, puis en procédant de même sur un certain nombre de verticales de la section (10 à 20 verticales avec 5 à 8 points de mesure sur chacune selon la régularité du fond). Il faut opérer rapidement pour éviter une évolution importante du débit pendant la mesure.

Le dépouillement de la mesure se fait en calculant d'abord la vitesse moyenne sur chaque verticale (planimétrage, méthode des rectangles ou méthode des trapèzes) puis le débit total dans la section (courbes isovitesses, méthode des paraboles élémentaires, méthode des rectangles ou méthode des trapèzes). Auparavant, il convient de s'assurer de la validité du tarage du moulinet utilisé; ce tarage est généralement spécifique (non interchangeable des hélices, axes, roulements à billes) et peut être modifié à la suite d'un choc même faible.

Lorsque l'écoulement est à peu près uniforme et que l'on procède correctement, l'erreur sur le débit ne doit guère excéder 5%.

3.2 Jaugeage par dilution

Cette méthode est tout à fait complémentaire de la précédente car elle s'applique particulièrement bien aux petits cours d'eau turbulents. Elle consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée de sel et à rechercher à l'aval dans quelle proportion cette solution a été diluée. Dans certaines conditions dites de "bon mélange", on obtient une relation linéaire entre le débit Q de la rivière et le rapport $C1/C2$ de la concentration $C1$ de la solution injectée à la concentration $C2$ d'échantillons prélevés à l'aval :

$$Q = k(C1/C2)$$

k étant un coefficient dépendant du procédé et du matériel utilisé

On distingue deux procédés :

- Le procédé par injection à débit constant
- Le procédé par injection instantanée (méthode par intégration)

- **L'injection prolongée à débit constant** d'un débit q connu de solution d'un traceur à la concentration $C1$ provoque, dans une section située à l'aval au delà de la distance de "bon mélange" (dilution homogène), un palier de concentration $C2$ uniforme et permanents l'hypothèse de l'absence de pertes ou d'apports de traceur dans le bief de mesure et de la quasi constance du débit Q de la rivière, on a , durant le palier de concentration $C2$, conservation de la masse de traceur, soit :

$$q \cdot C1 = (Q + q) \cdot C2 \quad \text{avec} \quad q \ll Q$$

$$\text{d'où :} \quad Q = q \cdot (C1/C2)$$

Ce procédé nécessite un matériel d'injection étalonné.

- **L'injection instantanée** d'un volume V de solution de traceur à la concentration $C1$ est suivi du prélèvement, à l'aval de la distance de "bon mélange" et durant toute la durée T du passage du nuage de traceur, d'échantillons répartis dans la section de mesure. Cela permet d'obtenir l'évolution en fonction du temps de la valeur moyenne $C2$ de la concentration dans la section de prélèvement. Avec les mêmes hypothèses que pour l'injection à débit constant, la conservation de la masse s'écrit :

$$C2 \cdot Q \cdot T = V \cdot C1$$

$$\text{d'où :} \quad Q = (V/T) \cdot (C1/C2)$$

Ce procédé ne nécessite aucun matériel complexe. Il est plus rapide mais moins précis et nécessite davantage d'expérience que le procédé par injection à débit constant

Dans les deux procédés, il faut choisir très correctement le tronçon de mesure de façon à obtenir la condition de "bon mélange". Pour des petites rivières n'excédant pas 20 m de large, la distance de "bon mélange" peut varier de 50 à 1000 m selon la largeur et le brassage. Cette distance est souvent déterminée expérimentalement par une injection de colorant (fluorescéine par exemple). Il est important de vérifier l'existence éventuelle d'apports ou de pertes entre la section d'injection et la section de prélèvement.

Le bief de mesure doit comporter le moins possible de zones d'eau morte et il faut au contraire rechercher les éléments favorisant le brassage vertical et surtout le brassage latéral généralement plus difficile à obtenir (méandres, gros blocs rocheux détournant le courant d'une rive à l'autre,...).

Le traceur employé doit avoir une forte solubilité dans l'eau, une bonne stabilité chimique en solution , ne pas préexister dans le cours d'eau et ne pas être absorbé par les argiles en suspension. De nombreux traceurs chimiques (bichromate de sodium, chlorure de lithium,..) ou fluorescents (fluorescéine, rhodamine B ou Wt, sulforhodamine,...) sont employés, le plus couramment utilisé actuellement en France étant le bichromate de sodium, malgré sa toxicité.

Le dépouillement du jaugeage, qui revient à déterminer le facteur de dilution $C1/C2$ des échantillons prélevés dans la rivière, se fait par comparaison à des dilutions-étalons, parfaitement connues et réalisées avec la solution-mère injectée de concentration $C1$ et de l'eau de la rivière prélevée au moment du jaugeage.

Cette opération, réalisée en laboratoire, nécessite beaucoup de soins, compte tenu des très faibles concentrations. L'analyse comparative des dilutions est effectuée avec un colorimètre ou un spectro-fluorimètre selon le type de traceur utilisé.

4.CALCUL DES DEBITS

4.1 Etalonnage

Le calcul des débits à partir des hauteurs limnimétriques observées passe par l'étalonnage de la station, c'est à dire l'établissement de la relation hauteur/débit à cette station pour toute l'intervalle de variation des niveaux d'eau dans la rivière. Une fois établi cet étalonnage devra être contrôlé au cours du temps et éventuellement revu.

Le tracé de la courbe d'étalonnage doit être fait avec beaucoup de soins en utilisant tous les résultats de jaugeages disponibles. Lorsque ceux-ci sont insuffisants, il est souvent nécessaire de procéder à des extrapolations qui doivent reposer sur des bases physiques (géométrie de la section limnimétrique, contrôles hydrauliques,...)

- **L'extrapolation vers les cotes élevées** implique une bonne connaissance du fonctionnement hydraulique de la station. Il existe plusieurs procédés :
 - L'extrapolation logarithmique**, trop souvent utilisée en raison de sa simplicité, n'est en fait applicable que dans des conditions très restrictives pour des sections au profil très régulier.
 - L'extrapolation par la méthode de STEVENS** qui utilise la formule de CHEZY n'est applicable qu'aux écoulements pseudo uniformes.
 - L'extrapolation par surface mouillée et vitesse moyenne** s'applique aux sections de forme irrégulière mais relativement stables (absence de creusement/remblaiement). Elle consiste à séparer les deux composantes du débit :
 - . la surface mouillée qui peut être connue avec précision par un profil en travers au droit de l'échelle,
 - . la vitesse moyenne d'écoulement qui croît avec la hauteur plus lentement que le débit.
 - L'extrapolation par utilisation des formules d'écoulement** (CHEZY, MANNING, STRICKLER) nécessite de mesurer la pente hydraulique.
- **L'extrapolation vers les cotes basses** est une opération toujours délicate pour les sections en lit naturel (non équipée d'un seuil) qui se fait "en respectant la courbure" de la courbe de tarage. Les stations naturelles sont très peu sensibles pour les faibles niveaux et les étalonnages de basses eaux sont très instables car influencés par la moindre variation du profil.

L'existence d'une relation hauteur/débit biunivoque et permanente caractérise une station à géométrie et contrôle aval stables.

La non univocité qui entraîne l'existence de plusieurs courbes d'étalonnage correspond à deux types d'instabilité qui peuvent affecter la section de l'échelle et/ou la section de contrôle :

- **L'instabilité géométrique** qui peut être progressive ou brutale et avoir des causes variées (remblaiement ou creusement de la section, croissance de la végétation, nettoyage du lit, relèvement ou abaissement naturel ou artificiel de l'échelle,...)
- **L'instabilité hydraulique** qui se caractérise par une pente superficielle variable pour une même hauteur d'écoulement.

4.2 Basses eaux

Pour la plupart des stations à lit naturel la limnimétrie en basses eaux ne permet pas un contrôle correct des débits (forte instabilité et faible sensibilité). Il est alors recommandé, pour reconstituer la courbe de tarissement, d'exécuter des jaugeages périodiques plutôt que d'utiliser la partie basse de la courbe d'étalonnage

Cela est particulièrement important pour la petite hydraulique qui s'intéresse plus spécialement aux débits dérivables de basses eaux.

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALDEGHERI (M.) 1979 Manuel d'Hydrométrie - Tome IV : Mesure des débits à partir des vitesses.

ORSTOM Initiations - Documentations techniques N° 41.

ANDRE (H.), AUDINET (M.), MAZERAN (G.), RICHER (C.) 1976 Hydrométrie pratique des cours d'eau

Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. - Eyrolles.

HERSCHY (R.W.) 1978 Hydrometry - Principles and Practices

Editeur : John Wiley & Sons.

JACCON (G.) 1979 Manuel d'Hydrométrie - Tome V : Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits.

ORSTOM Initiations - Documentations techniques N° 70.

ROCHE (M.) 1963 Hydrologie de surface

Gauthier - Villars éditeurs.

ROCHE (P.A.) 1987 Guide de prévision des crues. Tome 1, chapitre IV Hydrométrie , Tome 2 Annexes A.IV.1 à A.IV.3.

Société Hydrotechnique de France - Groupe Prévision des crues , Ministère chargé de l'Environnement.

ANNEXE 6

MODELES HYDRO-PLUVIOMETRIQUES

1. MODELE CREC

CREC est un modèle conceptuel global élaboré à la fin des années 1960 par la Division Hydrologie de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF (Cormary, 1967) et repris par la suite par le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc et adapté sur micro-ordinateur (Combes, 1985; Guilbot, 1986; Servat et Dezetter, 1988).

Ce modèle, qui fonctionne au pas de temps journalier, est basé sur un schéma de type "à réservoirs" identifiant une fonction de Production et une fonction de Transfert. Ce schéma est donné par la figure 1 qui représente la version de CREC à 10 paramètres $(X_1, X_2, \dots, X_{10})$.

La fonction de Production répartit d'abord la lame d'eau précipitée entre l'écoulement de surface qui parvient très rapidement à l'exutoire et le volume de pluie nette qui s'infiltré. Elle prend en compte l'état d'humidité du sol par le biais du réservoir S (assimilé à un réservoir "sol") qui alimente l'évapotranspiration et répartit la pluie nette entre l'écoulement souterrain soumis à la fonction de Transfert et la part alimentant ce réservoir S.

La fonction de Transfert comprend un système à deux réservoirs permettant de simuler un terme d'écoulement rapide (réservoir "superficiel" H) et un terme d'écoulement lent (réservoir "profond" G) à décroissance exponentielle.

Les différents paramètres sont optimisés à l'aide des méthodes de Rosembrock (1960) et de Nelder et Mead (1964) utilisées en séquence.

Références bibliographiques :

CORMARY Y. , GUILBOT A. (1971) Ajustement et réglage des modèles déterministes. Méthodes de calage des paramètres. Société Hydrotechnique de France , La Houille Blanche 2/1971,pp. 131-140

COMBES V. (1985) Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. Thèse Docteur Ingénieur USTL Montpellier

SERVAT E. (1986) Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes : CREC 5 , MODGLO et MODIBI . Centre ORSTOM de Montpellier

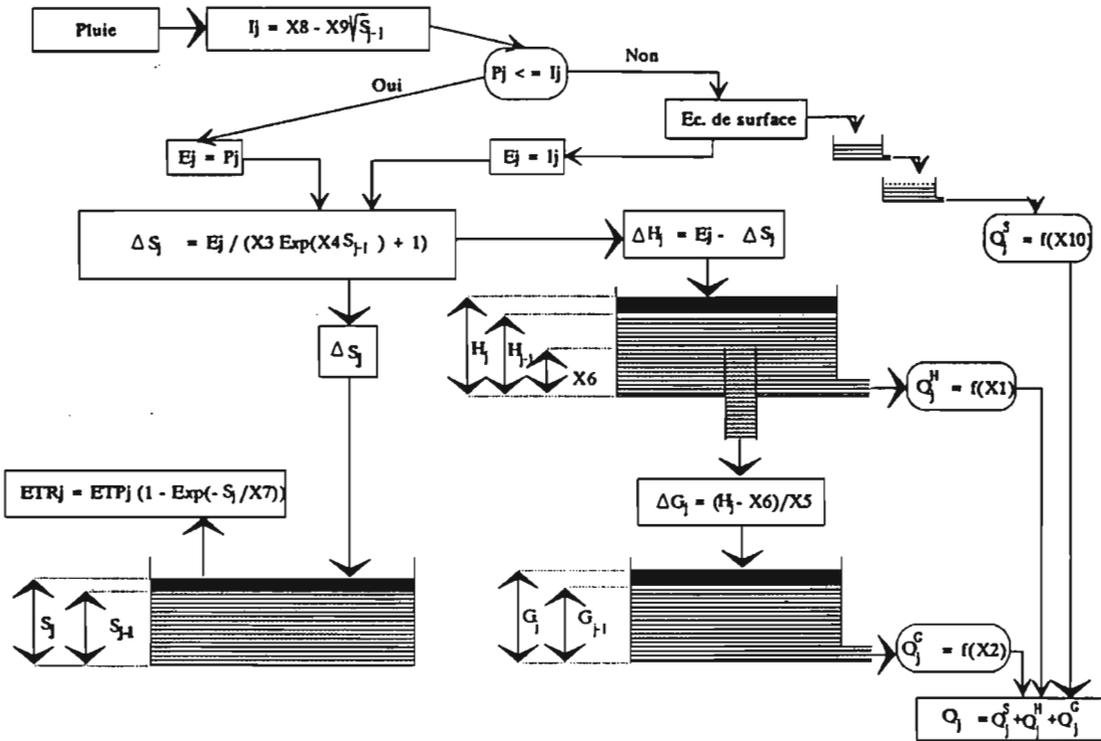


Figure 1 Schéma conceptuel du modèle CREC

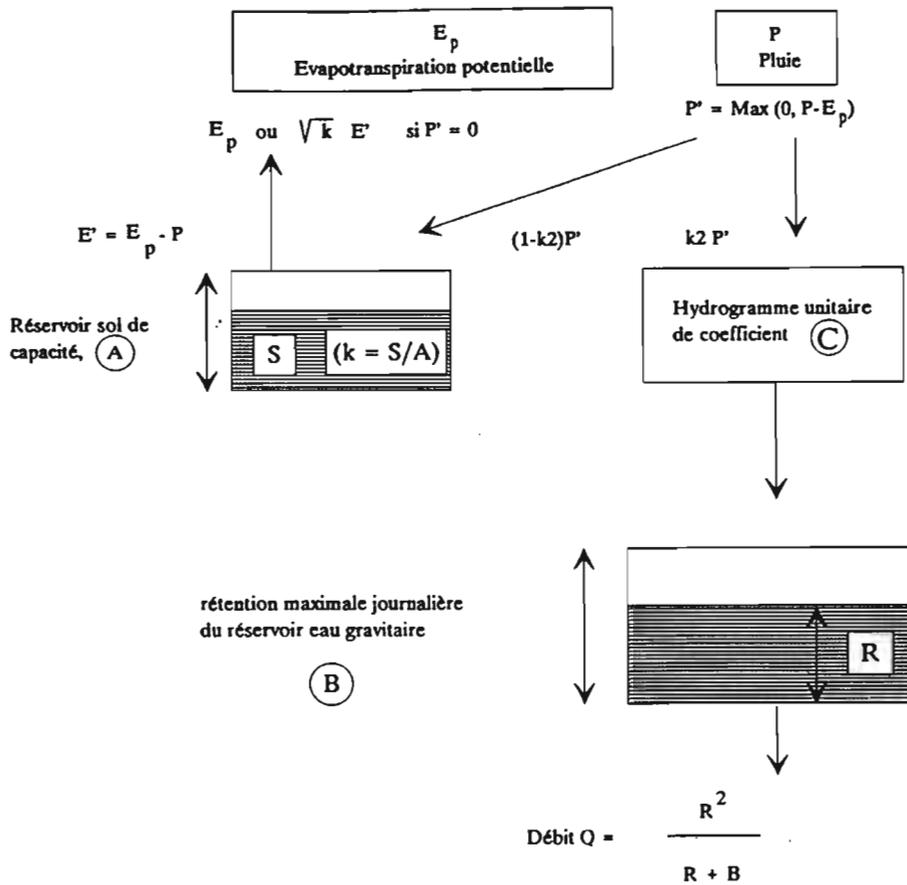


Figure 2. Schéma conceptuel du modèle GR3

2. MODELE GR3

GR3 est un modèle conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier et appartenant à la catégorie des modèles à réservoirs qui a été élaboré par le CEMAGREF en 1989 (Edijatno et Michel, 1989).

Il est basé sur un schéma simple comprenant deux réservoirs et un hydrogramme unitaire

La figure 2 représente le schéma de ce modèle qui ne possède que trois paramètres:

- Le réservoir "sol" qui alimente l'évapotranspiration et commande la répartition de la pluie entre sa propre alimentation et la part transférée à l'exutoire. Ce réservoir est caractérisé par sa capacité maximale A (premier paramètre du modèle)
- L'hydrogramme unitaire assure la fonction de transfert du volume de pluie nette déterminé par le réservoir "sol" et le réservoir "eau gravitaire". Cet hydrogramme unitaire permet d'étaler la pluie nette selon une répartition contrôlée par un coefficient C (deuxième paramètre du modèle).
- Le réservoir "eau gravitaire" est un réservoir à un seul orifice d'où sort le débit journalier. Sa loi de vidange est de type quadratique et il est caractérisé par sa "rétention maximale à un jour" B (troisième paramètre du modèle)

Les différents paramètres sont optimisés à l'aide des méthodes de Rosebrock (1960) et de Nelder et Mead (1964) utilisées en séquence.

Références bibliographiques :

EDIJATNO, MICHEL C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres
La Houille Blanche n°2, 1989, p.113-121.

MICHEL C. (1983) "Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètre?"
La Houille Blanche n°1, 1983, p.339-44.

3. MODELE MODGLO

MODGLO est un modèle conceptuel global fonctionnant au pas de temps journalier et appartenant également à la catégorie des modèles à réservoirs qui a été mis au point à l'ORSTOM en 1974 par G. Girard puis adapté sur micro-ordinateur (Servat, 1986; Dezetter, 1987; Estèves, 1990).

Ce modèle considère le bassin versant dans son ensemble, mais il peut prendre en compte un certain degré d'hétérogénéité des averses, de l'évaporation, de l'infiltration et de la capacité de rétention en eau des sols

La fonction de Production fait appel à certains concepts du processus physique de la transformation pluie-débit (capacité de rétention en eau des sols, infiltration,...) avec cependant de nombreuses hypothèses simplificatrices.

Elle assure tout d'abord la répartition de l'eau précipitée entre la part reprise par évapotranspiration (ETR), la part de la pluie au sol pouvant donner de l'écoulement (ABSO) qui est dirigée vers un réservoir "sol" et éventuellement la part donnant du ruissellement de surface (RS).

Ensuite la quantité d'eau gravifique livrée à l'écoulement (EAUG) est prélevée dans le réservoir "sol" selon le niveau (SH) de ce réservoir et la capacité de rétention du sol (CRT).

La fonction de Transfert est constituée par un système de trois (quatre dans la version initiale) réservoirs en parallèle munis d'orifices et permettant l'étalement du volume d'eau gravitaire EAUG pour donner l'écoulement RB qui forme, avec le ruissellement superficiel RS, le débit journalier.

Les différents paramètres sont optimisés à l'aide des méthodes de Rosebrock (1960) et de Nelder et Mead (1964) utilisées en séquence.

Références bibliographiques :

SERVAT E. (1986) Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes : CRECS, MODGLO, MODIBI. Note interne ORSTOM, UR 604 Montpellier.

SERVAT E. (1986) Notice d'utilisation du modèle global type "ORSTOM 1974" Note interne ORSTOM, Département F, UR 604, Montpellier.

DEZETTER A. (1987) Modèle global "ORSTOM74". Analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. DEA USTL Montpellier.

SERVAT E., DEZETTER A. (1988) Modélisation globale de la relation pluie-débit: des outils au service de l'évaluation des ressources en eau. Hydrologie continentale vol. 3, n° 2 1988.

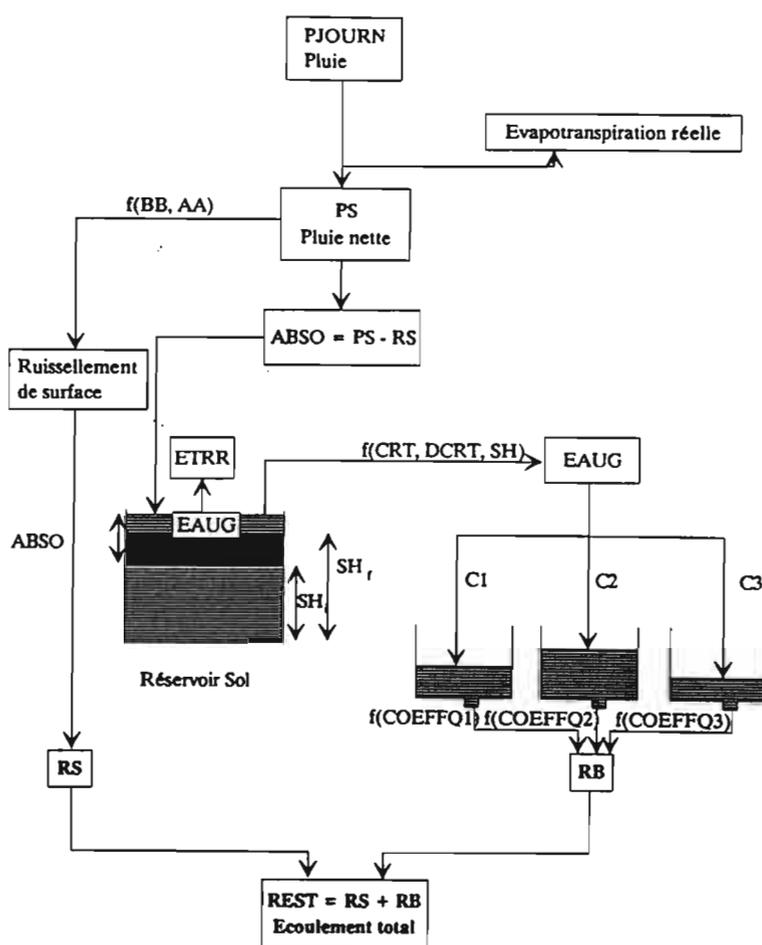


Figure 3 Schéma conceptuel du modèle MODGLO

ANNEXE 7

METHODE DU GRADEX

La méthode du GRADEX (gradient des valeurs extrêmes), mise au point par la Division Technique d'EDF dès 1965, est une méthode d'évaluation des crues de faible probabilité d'occurrence à partir de la distribution de fréquence des pluies extrêmes.

Elle repose sur un minimum d'hypothèses physiques et statistiques simples, sans faire référence à un mécanisme précis de la relation pluie-débit, mais en considérant le processus spatio-temporel précipitation, infiltration, évaporation, débit de ruissellement direct sur le bassin versant- comme un "processus statistique".

Nous nous contenterons ici de rappeler les hypothèses de base de cette méthode :

- Première hypothèse

La fréquence $F(P)$ de la précipitation P en H heures ($H = 2, 4, 6, \dots, 24,48$ heures) en un lieu et pendant une saison donnée est à décroissance exponentielle simple et lorsque P est grand on a :

$$1 - F(P) \simeq \lambda e^{-P/a}$$

Le paramètre a qui est appelé gradex (gradient des valeurs extrêmes) est calculé à partir de quelques dizaines d'années d'observations journalières ou à un pas de temps plus fin si on dispose de pluviographes. C'est un paramètre climatique qui peut être cartographié et caractérise le risque de pluie extrême. Ses variations spatiales peuvent être importantes : ainsi en France, pour les précipitations journalières, il varie de 5 mm/jour à 70 mm/jour selon la région et la saison. On peut l'estimer soit d'après la distribution empirique de toutes les précipitations observées (pour un même pas de temps), soit d'après la distribution des maxima mensuels si l'on dispose de longues séries historiques.

- Deuxième hypothèse

Quand on approche de la saturation du bassin versant (au delà de la crue décennale ou vingtennale en France), tout accroissement dP de la précipitation produit un accroissement dQ du débit qui tend à devenir égal à dP . La rétention moyenne atteint alors sa limite pratique et les deux distributions de valeurs extrêmes de la pluie $F(P)$ et du volume de crue $G(Q)$ sont asymptotiquement parallèles sur le graphique de Gumbel. On a donc lorsque Q est grand :

$$1 - G(Q) \simeq \psi e^{-Q/a}$$

La distribution empirique des débits extrêmes observés peut donc être extrapolée au-delà de la crue décennale ou vingtennale selon le gradex de la pluie moyenne sur la partie active du bassin versant.

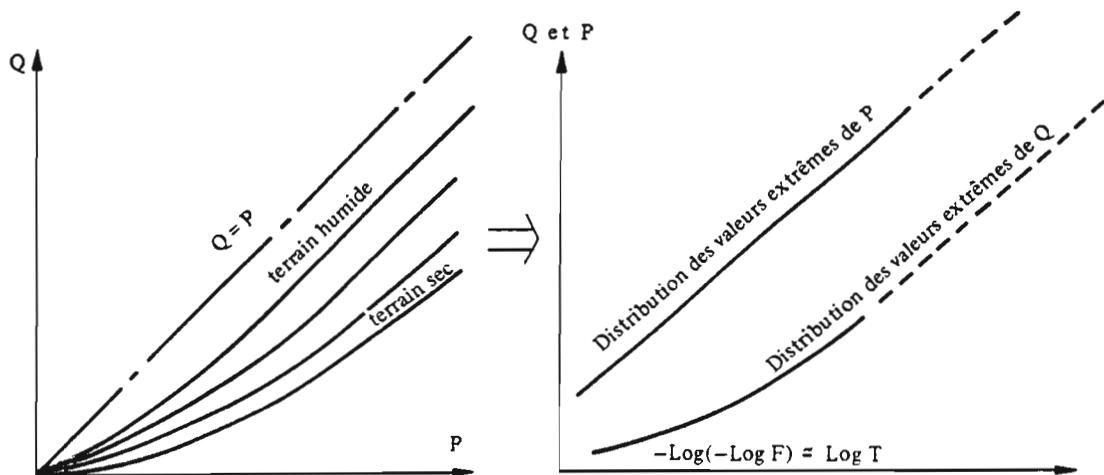
- Troisième hypothèse

Pour passer de la probabilité du débit moyen QM en H heures au débit de pointe de crue Q_{max} , on admet que le rapport moyen $r = Q_{max}/QM$ est indépendant du débit (ce qui a été vérifié pour de nombreux cours d'eau).

A partir de l'échantillon des crues observées on estime la moyenne arithmétique des rapports r (généralement comprise entre 1,2 et 2) et on en déduit la distribution des valeurs extrêmes du débit de pointe de celle des débits moyens en H heures par une simple affinité de valeur r .

La méthode du gradex s'applique aux bassins versants dont la superficie est inférieure à 10 000 km² et éventuellement aux bassins de plus grande taille dans le cas favorable d'une bonne homogénéité spatiale des précipitations.

Cette méthode a l'avantage d'être simple, rustique et cohérente dans ses applications. Elle utilise essentiellement l'information pluviométrique généralement abondante et ne nécessite pas de longues séries de débits de crue. Faisant référence aux probabilités, elle permet un choix de crue de projet basé sur un calcul économique.



Références bibliographiques

GUILLOT P., DUBAND D. (1967) La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies.

Colloque international sur les crues et leur évaluation, Leningrad, 15-22/08/1967. IASH Publication n° 84, 560-569.

GUILLOT P. (1973) Précision sur la méthode du gradex. Utilisation de l'information hydrométéorologique pour l'évaluation de la crue de projet.

XI^e Congrès international des grands barrages. Madrid, 11-15 juin 1973. Q.41 R8, p.123-144

C.T.G.R.E.F. (CEMAGREF) (1972) L'application de la méthode du gradex à l'estimation des crues de faible fréquence. Antony.

MICHEL C., OBERLIN G. (1987) Seuil d'application de la méthode du gradex.

La Houille Blanche, n° 3, 1987.

DUBAND D., MICHEL C., GARROS H., ASTIER J. (1988) Evaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du gradex.

XVI^e Congrès international des grands barrages. San Francisco, 1988. Q63, R60.