Élaboration des consignes de gestion des barrages - réservoirs

Eric Parent

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXES

Eric PARENT

Mémoire de dissertation doctorale présenté pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.

Domaine : Environnement

DECEMBRE 1991

LISTE DES ANNEXES

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 1

Etude Hydrologique des apports de la Neste, des rivières de Gascogne et de la demande pour l'irrigation

OCTOBRE 91

E. PARENT

Introduction

Nous étudierons les régimes des rivières de Gascogne et de la Neste au pas de temps hebdomadaire. Les données ont été obtenues à partir des fichiers d'enregistrements journaliers fournis par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Nous étudierons successivement la modélisation statistique des grandeurs suivantes :

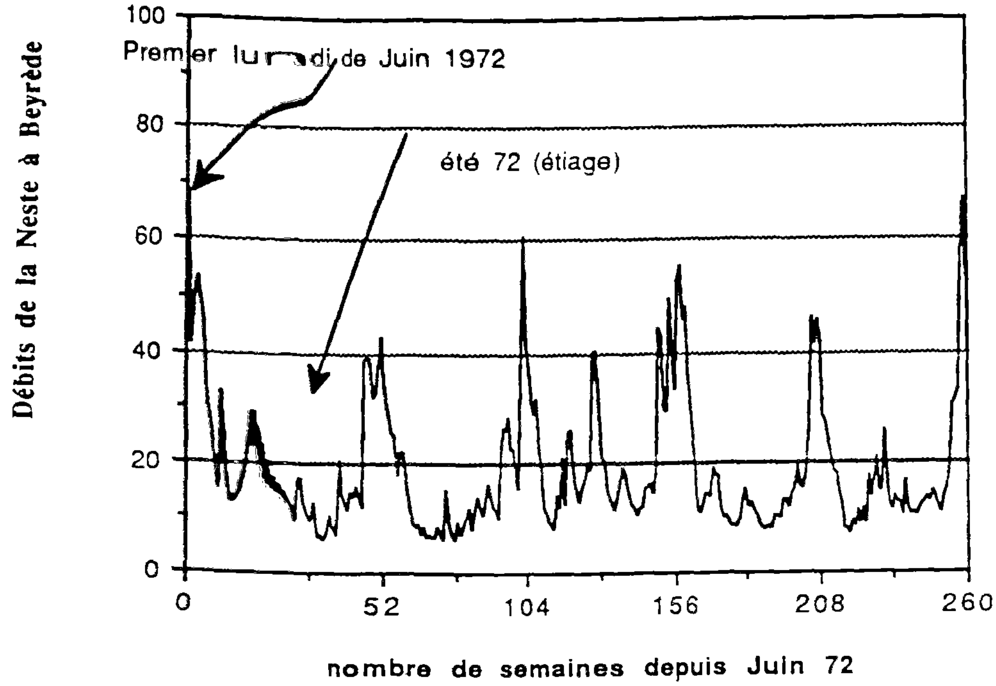
- le régime de la Neste à Beyrède, rivière de montagne à régime nival qui fournit l'essentiel des apports durant l'étiage au système Neste,
- la totalité des apports des rivières de Gascogne qui ont été regroupés en une seule rivière fictive (ce qui suffit car nous nous intéresserons dans un premier temps à la modélisation du système sous la forme d'un seul réservoir),
- la demande pour l'irrigation obtenue par multiplication des débits souscrits annuels par une fraction variable au cours des semaines du débit souscrit estimée à partir des mesures sur les stations de pompage des périmètres irrigués de la CACG.

La description des fichiers de données utilisées figurent à la fin de cette annexe. Nous disposons de données journalières essentiellement entre 1972 et 1987. L'Annexe 4 précise comment ces données ont été obtenues à partir des données brutes. L'année a été divisée en 52 semaines; la semaine n° 1 correspond au 1er Lundi du mois de Juin et la semaine n° 15 correspond à la mi-Septembre, date à laquelle s'achève généralement l'étiage.

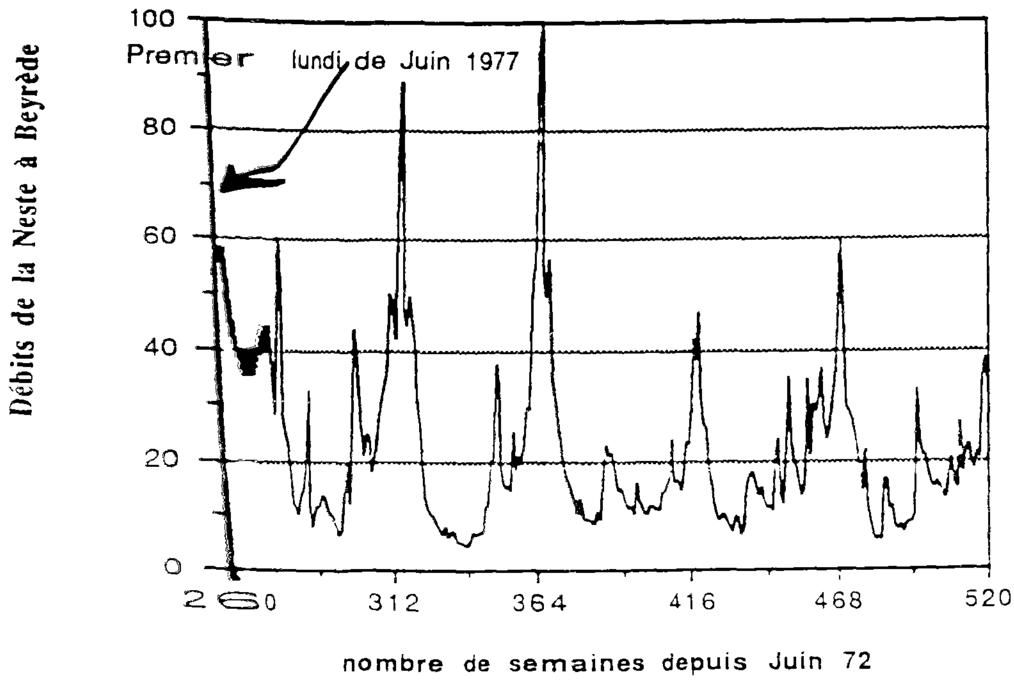
Le régime de la Neste

Il a été mesuré à Beyrède avant la dérivation sur le canal Neste. Il s'agit de quinze années de 1972 à 1987 de débits naturels (c'est à dire corrigés des lâchers des barrages de haute montagne). Les trois figures qui suivent montrent la grande variabilité de ces lâchers, qui, après une période d'étiage plus ou moins tardive, reprennent de la force après l'hiver au cours de la fonte des neiges, qui survient à partir de mars et bat son plein vers le mois de mai.

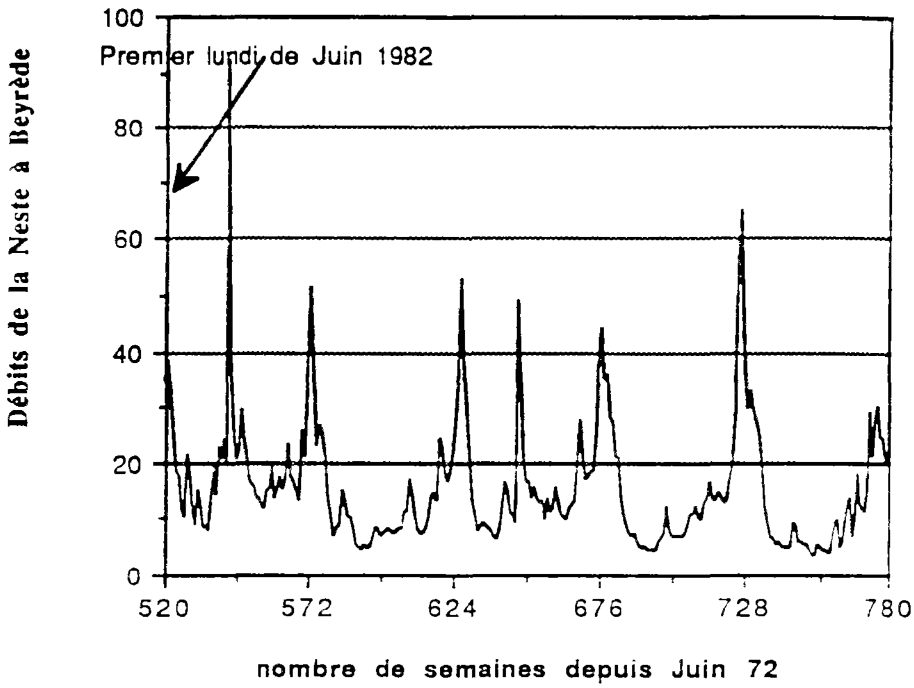
REGIME de la Neste 72 73 74 75 76



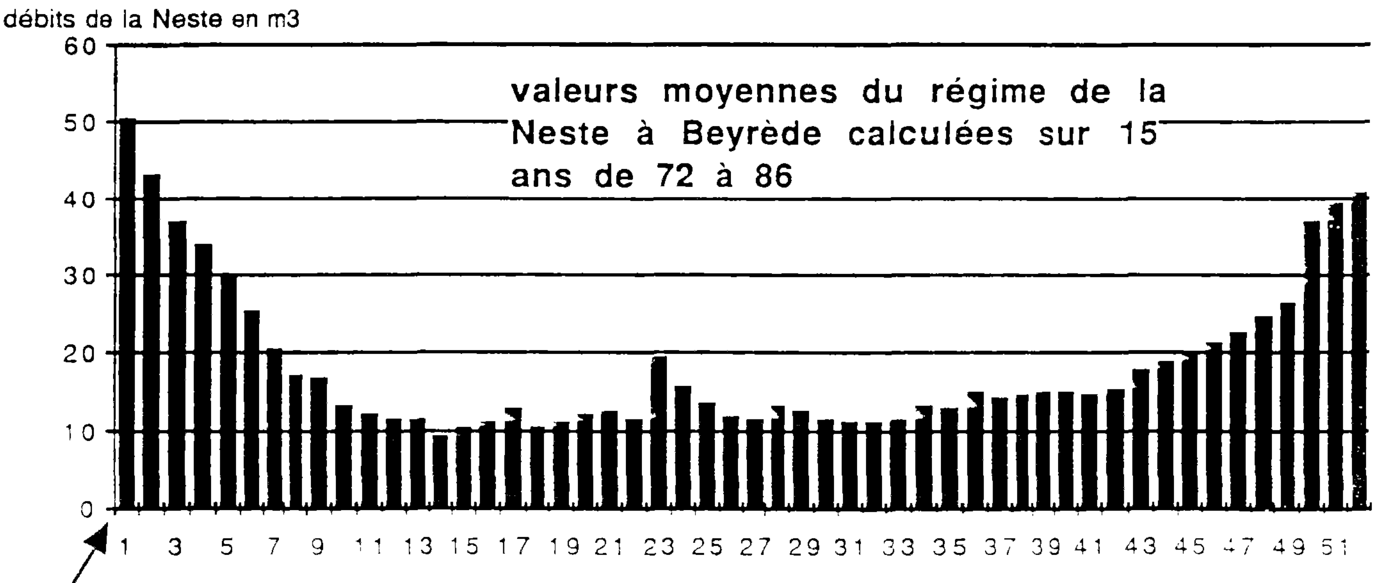
REGIME de la Neste 77 78 79 80 81



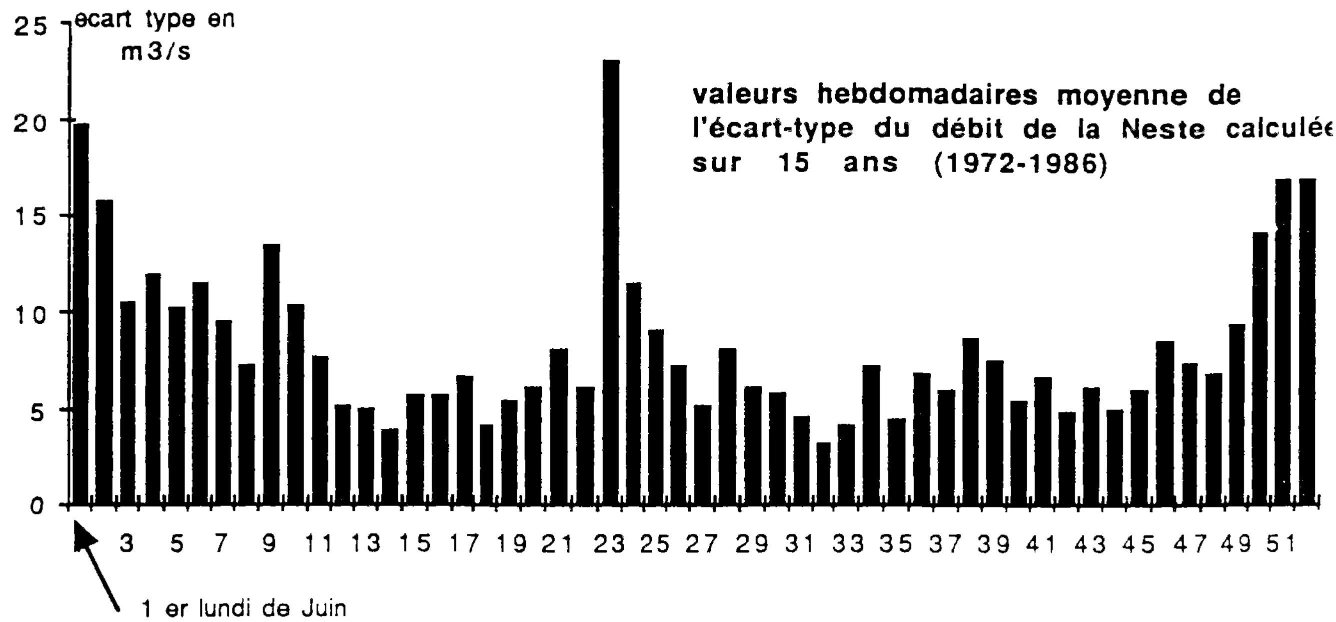
REGIME de la Neste 82 83 84 85 86



La figure ci-dessous indique le tracé des valeurs moyennes du régime de la Neste pour chaque semaine de 1 à 52.



On note que, si l'étiage et le passage en dessous de la barre des 10 m^3/s ne se produisent en moyenne qu'à la fin du mois de Juillet, c'est à cette période, en général critique à cause du démarrage des irrigations, que persiste une grande variabilité relative : l'écart type avoisine alors des valeurs du même ordre de grandeur que le débit moyen : 10 m^3/s). Le schéma suivant représente les valeurs de l'écart type estimé sur les 15 ans de données pour chacune des 52 semaines.

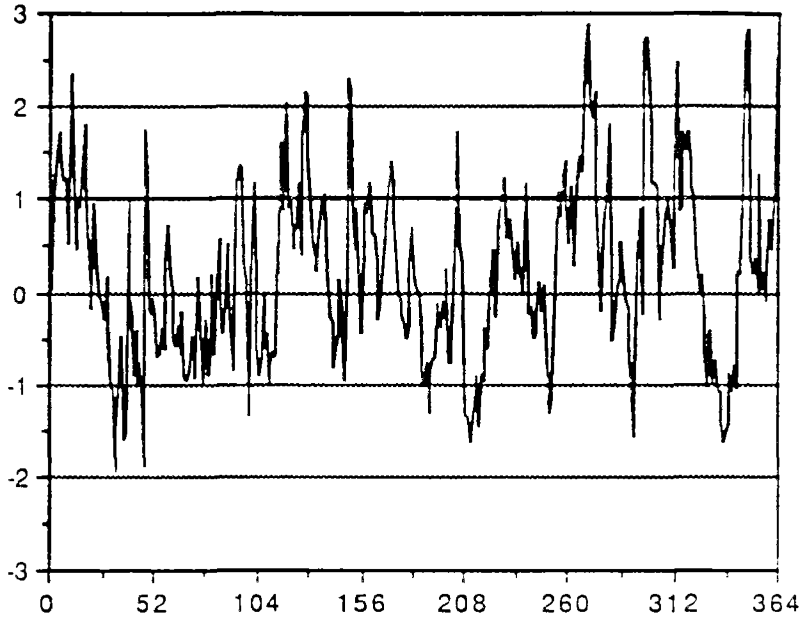


Modélisation statistique

La grandeur qui s'ajuste le mieux à une loi normale n'est pas le débit réel de la Neste mais le logarithme des débits. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour étudier l'adéquation des 52 échantillons de 15 valeurs. Les niveaux de signification sont très importants (de l'ordre de 95 % pour chacune des lois des 52 semaines que l'on a cherché à ajuster).

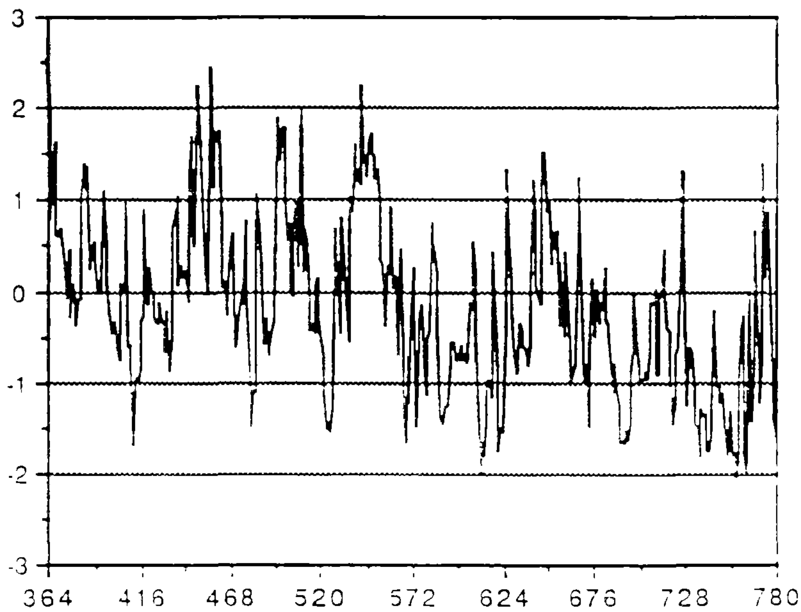
Les deux schémas qui suivent présentent la chronologie des valeurs "standardisées" du Logarithme des débits de la Neste, c'est à dire que pour chaque valeur du Logarithme du débit, on a centré en soustrayant la moyenne de la loi ajustée de la semaine correspondante, et réduit en divisant par l'écart type de la loi de la semaine correspondante.

Centrage et Reduction de LOG neste



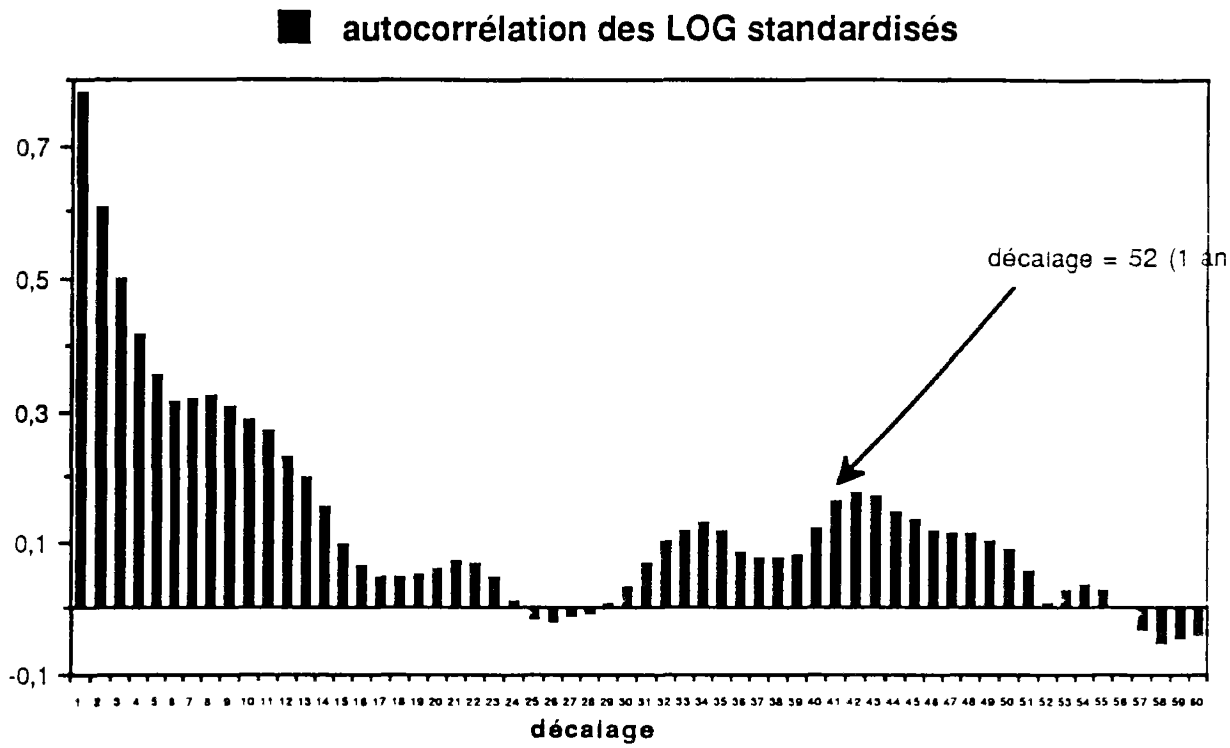
nombre de semaines depuis le premier lundi de JUIN 1972

Centrage et Reduction de LOG neste

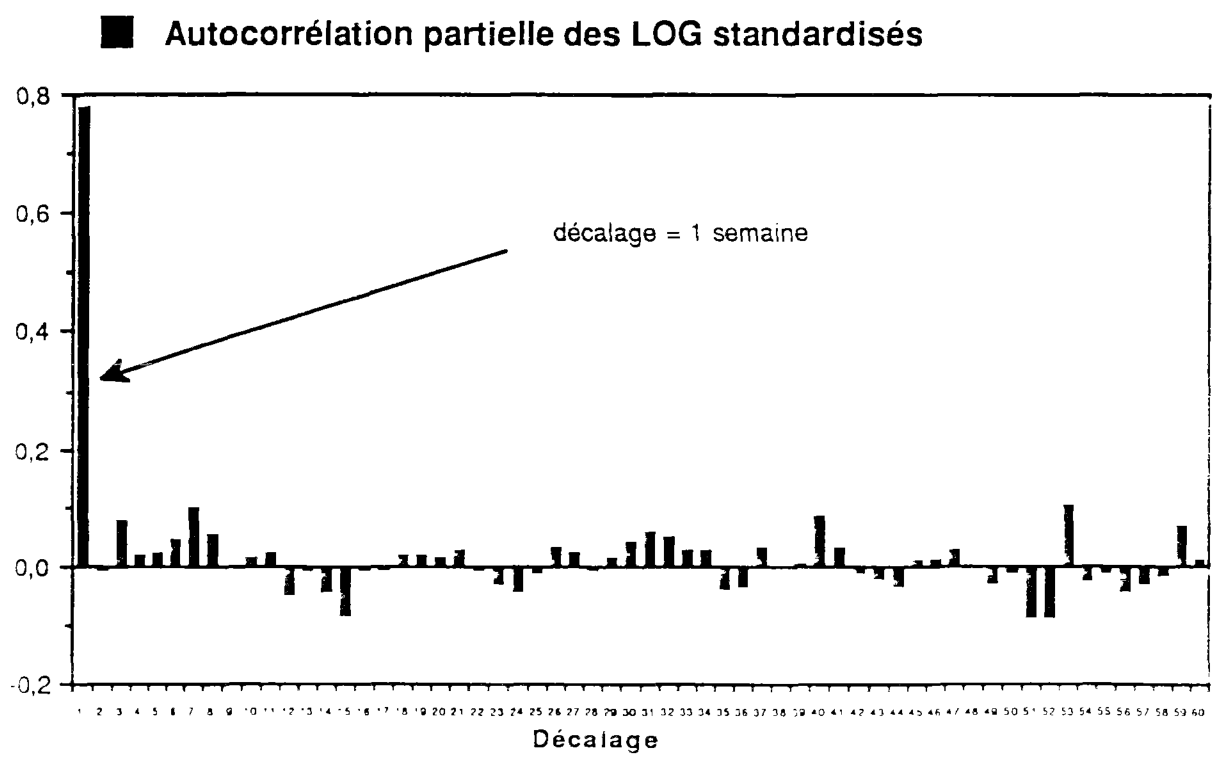


nombre de semaines depuis le premier lundi de JUIN 1972

On s'aperçoit que cette évolution n'est pas celle d'un bruit blanc mais qu'il reste une forte corrélation d'un pas de temps sur l'autre comme en témoigne le diagramme des autocorrélations suivant.



Cette impression est d'ailleurs confirmée par le graphe des autocorrélations partielles où transparaît une forte liaison du pas de temps t sur le pas de temps t + 1 et qui semble être la seule vraiment significative.



[illegible] le la loi LOG normale des débits et de son [illegible]

[illegible] er les caractéristiques statistiques (moyenne, vari[illegible] s 52 lois hebdomadaires des débits de la Neste par un [illegible] Fourrier, puisque il est naturel d'attendre une pé[illegible]

[illegible] des moyennes du Logarithme des déb[illegible]

[illegible] s termes de la série de Fourrier donne les résultats suiv[illegible]

[illegible]	[illegible]ent	écart type	Student	α
[illegible]	[illegible]	0.010668	255	0.000
[illegible]	[illegible]	0.015086	35	0.000
[illegible]	[illegible]11	0.015086	- 5	0.000
[illegible]	[illegible]5	0.015086	19	0.000
[illegible]	[illegible]24	0.015086	2.6	0.012
[illegible]	[illegible]34	0.015086	6.7	0.000
[illegible]	[illegible]13	0.015086	7.5	0.000

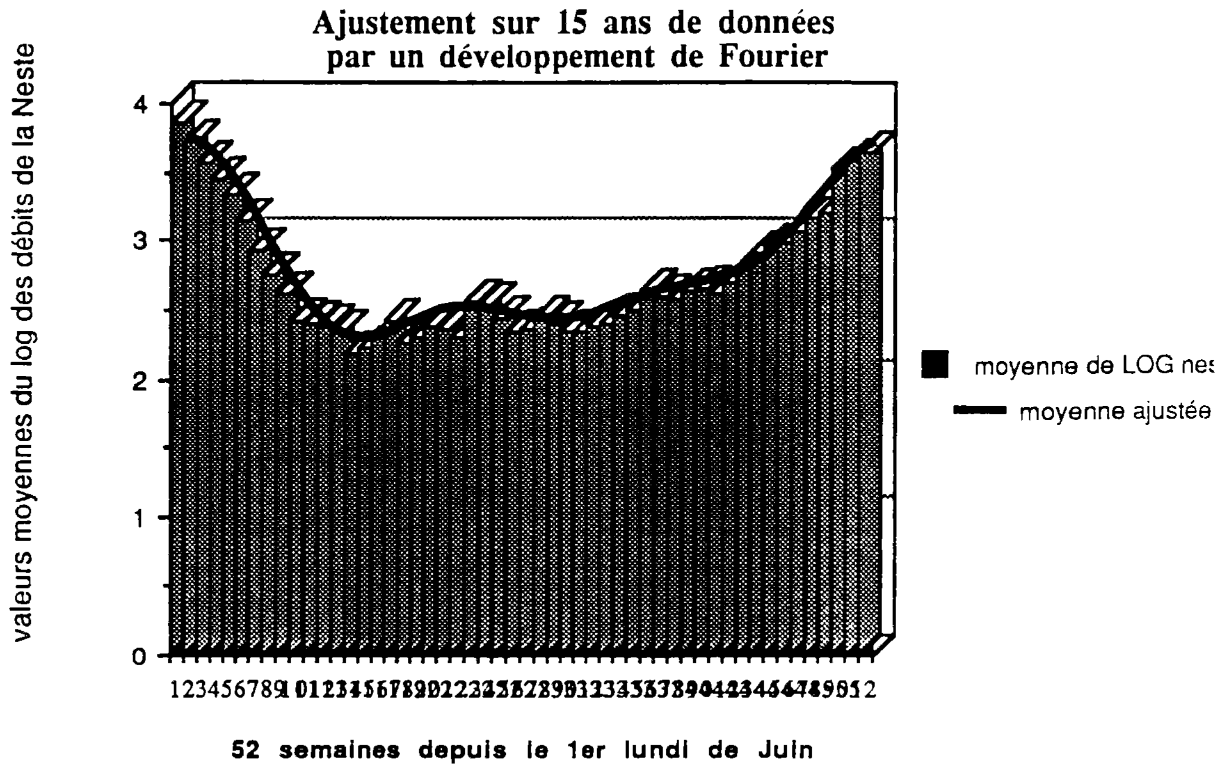
[illegible] ustement suivantes :

[illegible]
[illegible]
[illegible] résidus = 1.185

[illegible] n suivante :

[illegible] emaine t = 2.72 + 0.53 Cos(2π t/52) - 0.[illegible] t/52) + 0.04 Sin(4π t/52) + 0.10 Cos(6π t/52) + 0.[illegible]

[illegible] ustement réalisé en retenant ces 7 paramètres.



Ajustement de l'écart type de la loi LOG normale pour chaque semaine

La régression sur les six premiers termes de la série de Fourrier donne les résultats suivants :

variable explicative	coefficient	écart type	Student	α
constante	0.434824	0.010187	43	0.000
Cos (2π t/52)	- 0.097438	0.014407	- 7	0.000
Sin (2π t/52)	0.075159	0.014407	5	0.000
Cos (4π t/52)	0.0336111	0.014407	2.33	0.0242
Sin (4π t/52)	- 0.017217	0.014407	- 1	0.23
Cos (6π t/52)	- 0.031434	0.014407	- 2.2	0.03
Sin (6π t/52)	0.028105	0.014407	1.95	0.0573

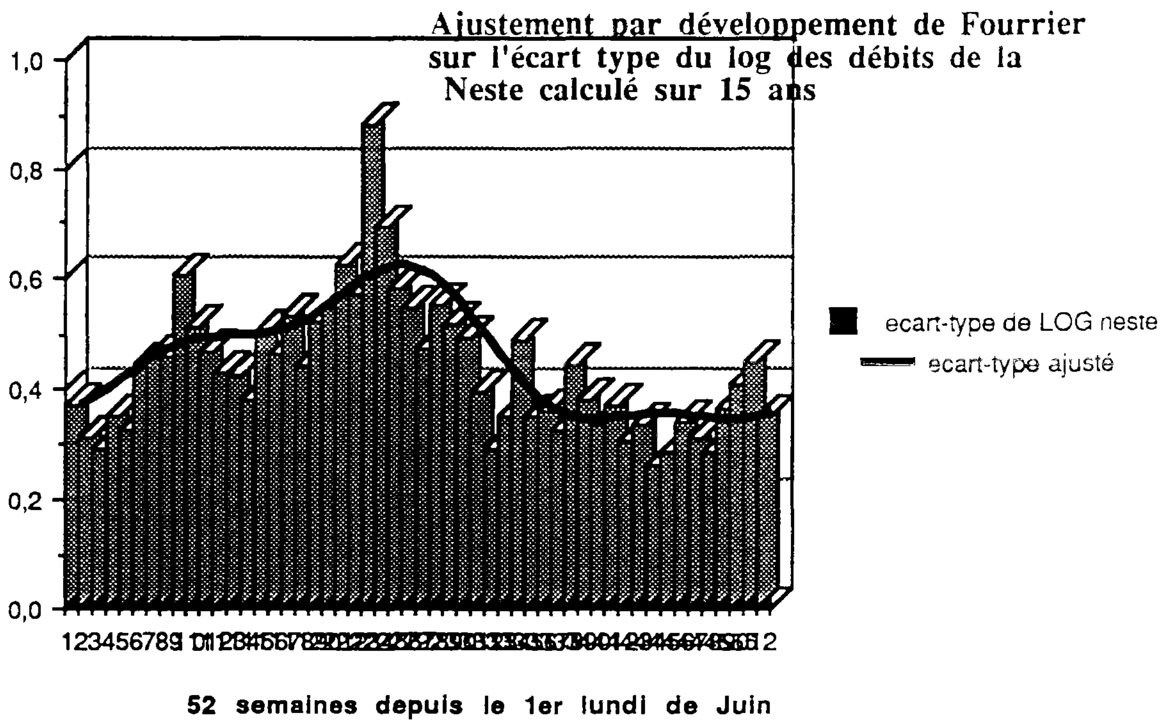
Avec les caractéristiques d'ajustement suivantes :

R^2 ajusté = 0.6177
écart type estimé = 0.073462
Test de Durbin Watson sur les résidus = 1.502

Nous garderons donc l'équation suivante :

Ecart type des LOG pour la semaine t = 0.43 - 0.10 Cos(2π t/52) + 0.08 Sin(2π t/52) + 0.03 Cos(4π t/52) + 0 Sin(4π t/52) - 0.03 Cos(6π t/52) + 0.03 Sin(6π t/52)

La figure suivante montre l'ajustement réalisé en ne retenant que les 6 paramètres significatifs.



Ajustement du coefficient de corrélation d'un pas de temps sur l'autre pour la loi LOG normale pour chaque semaine

La régression sur les six premiers termes de la série de Fourrier donne les résultats suivants :

variable explicative	coefficient	écart type	Student	α
constante	0.726486	0.015685	46	0.000
Cos (2π t/52)	- 0.0633	0.0221	- 3	0.006
Sin (2π t/52)	0.0804	0.0221	3.6	0.000
Cos (4π t/52)	0.0252	0.0221	1.1	0.26
Sin (4π t/52)	0.0435	0.0221	1.9	0.06
Cos (6π t/52)	- 0.0228	0.0221	- 1	0.30
Sin (6π t/52)	0.0175	0.0221	0.8	0.43

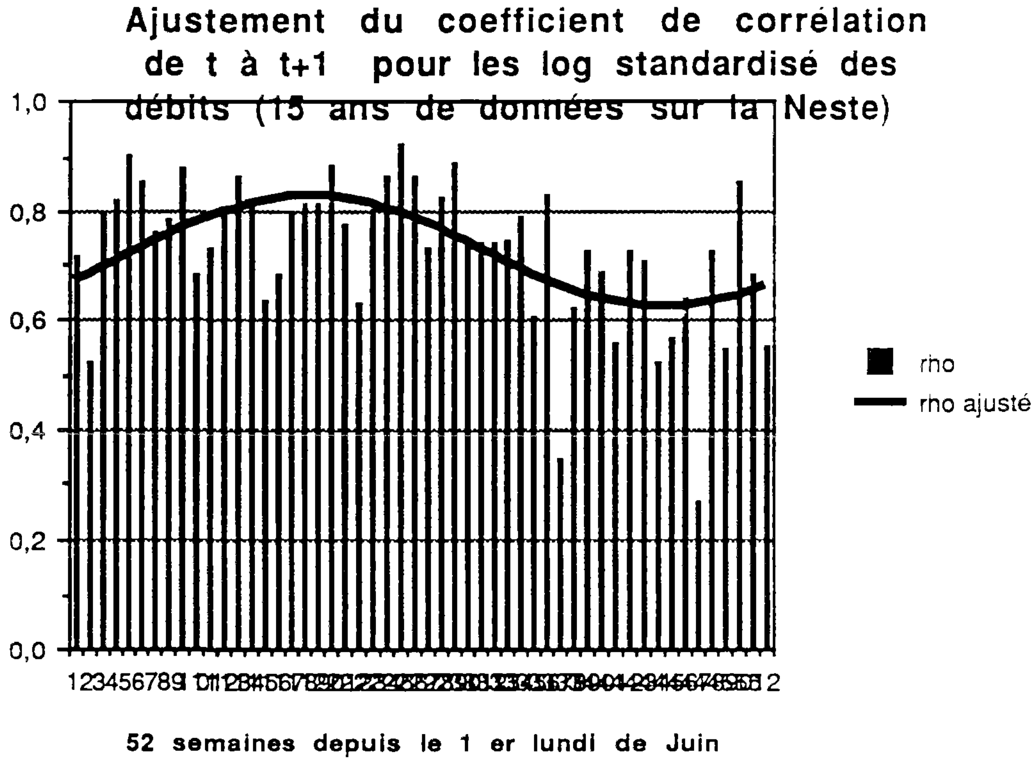
Avec les caractéristiques d'ajustement suivantes :

R^2 ajusté = 0.3028
(ce qui n'est pas très bon et montre qu'en fait on aurait pu se contenter d'une seule valeur moyenne et constante pour toutes les 52 semaines)
écart type estimé = 0.113110
Test de Durbin Watson sur les résidus = 2.422

Nous garderons donc l'équation suivante à 4 paramètres:

Autocorrélation des LOG pour la semaine t à t + 1 $= 0.73 - 0.06 \cos(2\pi t/52) + 0.08 \sin(2\pi t/52) + 0 \cos(4\pi t/52) + 0.43 \sin(4\pi t/52) - 0 \cos(6\pi t/52) + 0 \sin(6\pi t/52)$

La figure suivante montre l'ajustement réalisé.



Conclusions:

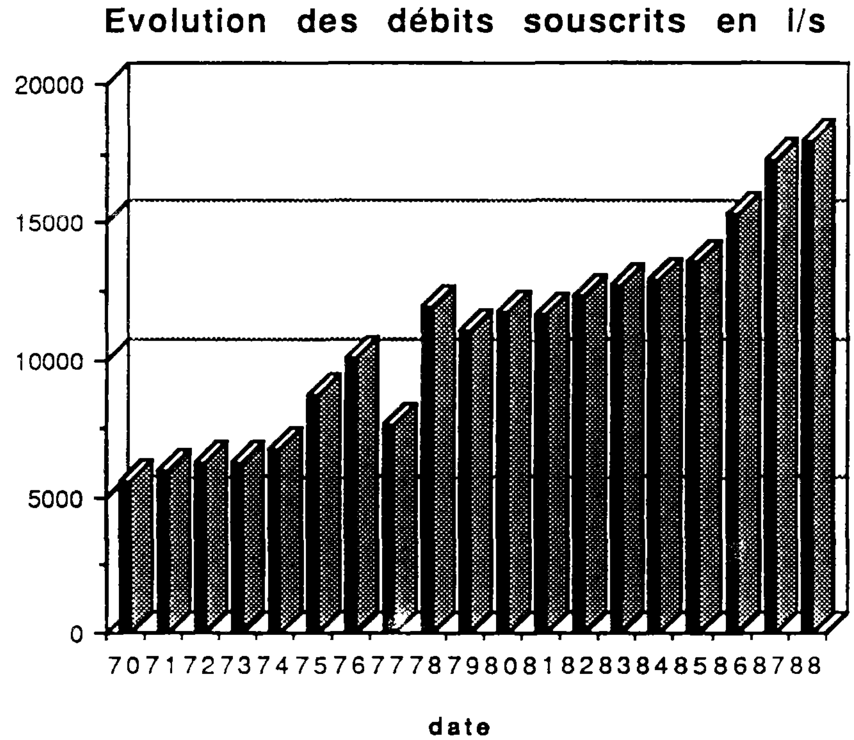
Munis de ces trois renseignements (moyenne, écart type, corrélation), il est aisé de simuler une chronique d'apports de la Neste à partir d'un tirage d'observations Gaussiennes N(0,1) indépendantes.

On reproduit d'abord la chaine Gaussienne Markovienne d'ordre 1 respectant les autocorrélations décrites ci dessus puis,connaissant la moyenne et l'écart type hebdomadaires, par transformation de variables normales à Lognormales, on peut alors génerer une chronique de débits de la Neste.

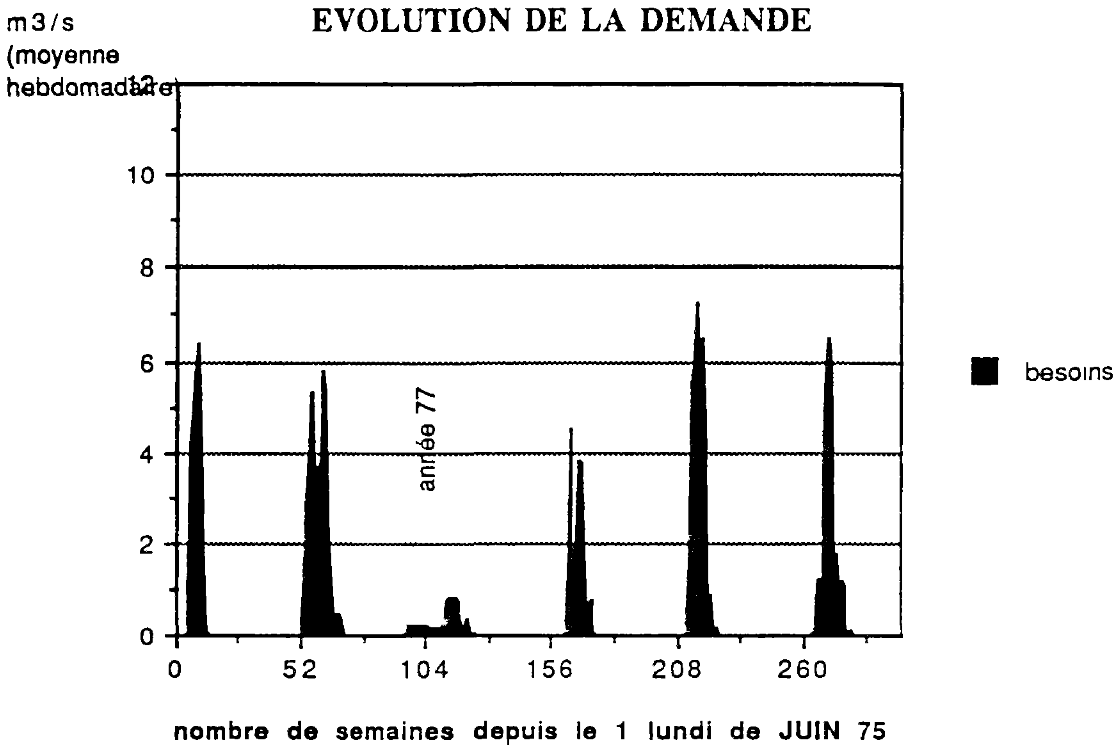
Le régime des rivières de Gascogne

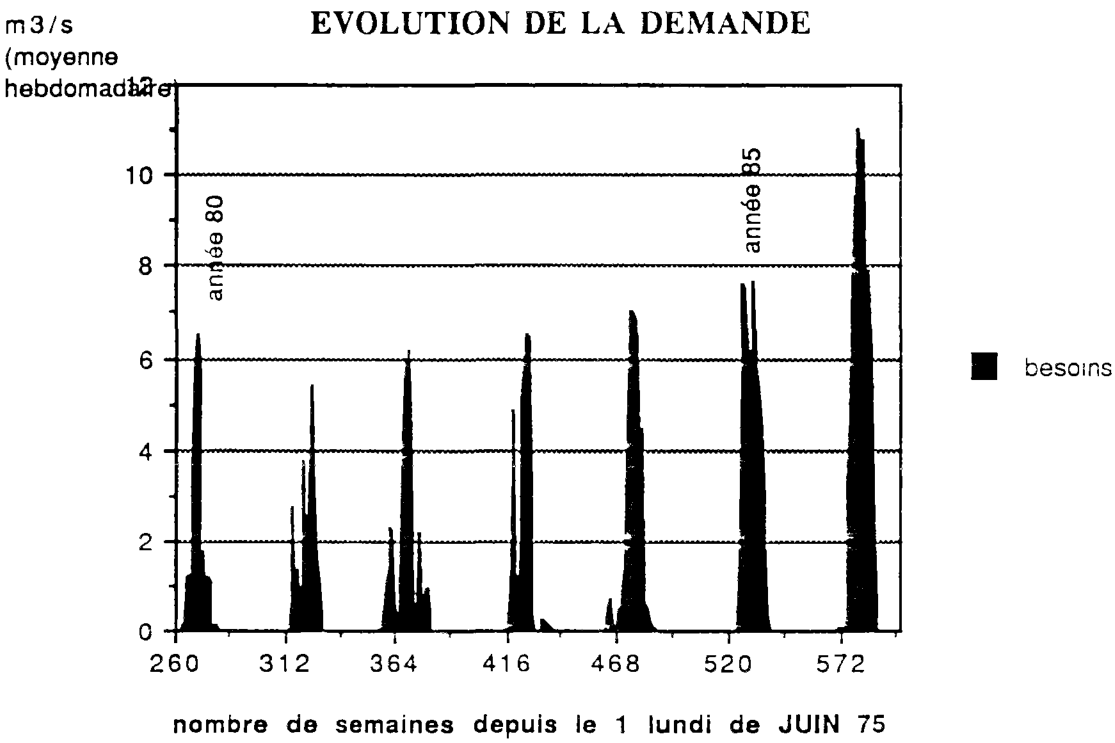
Dans le modèle de gestion à un seul réservoir, il nous suffit de connaître la totalité des apports des rivières de Gascogne pour proposer une première règle de gestion. Or, n'ont été mesurés que les débits réels sortant du système Neste, c'est à dire qu'ont été soustraits aux débits naturels les prélèvements pour l'irrigation. Dans un premier temps, il faut donc reconstituer ces prélèvements à l'échelle de l'ensemble du système Neste. nous disposons de deux grandeurs :

1) l'évolution des débits souscrits depuis 1975 : ils sont constitués de l'agglomération sur l'ensemble des rivières du système Neste des déclarations de débits souscrits pour tous les utilisateurs. Nous avons ainsi totalisé les débits souscrits par les individuels, les associations syndicales autorisées (ASA), les concessions CACG, les autorisations de prélèvements type 1909, ainsi que la moitié des débits souscrits pour l'adduction d'eau potable (il a été considéré qu'à cause des rejets dans la rivière la moitié de l'AEP retournait dans le système). La figure ci-après résume l'évolution de la consommation (en l/s) pour les dix-huit dernières années. On remarque un triplement de la consommation depuis 1970.



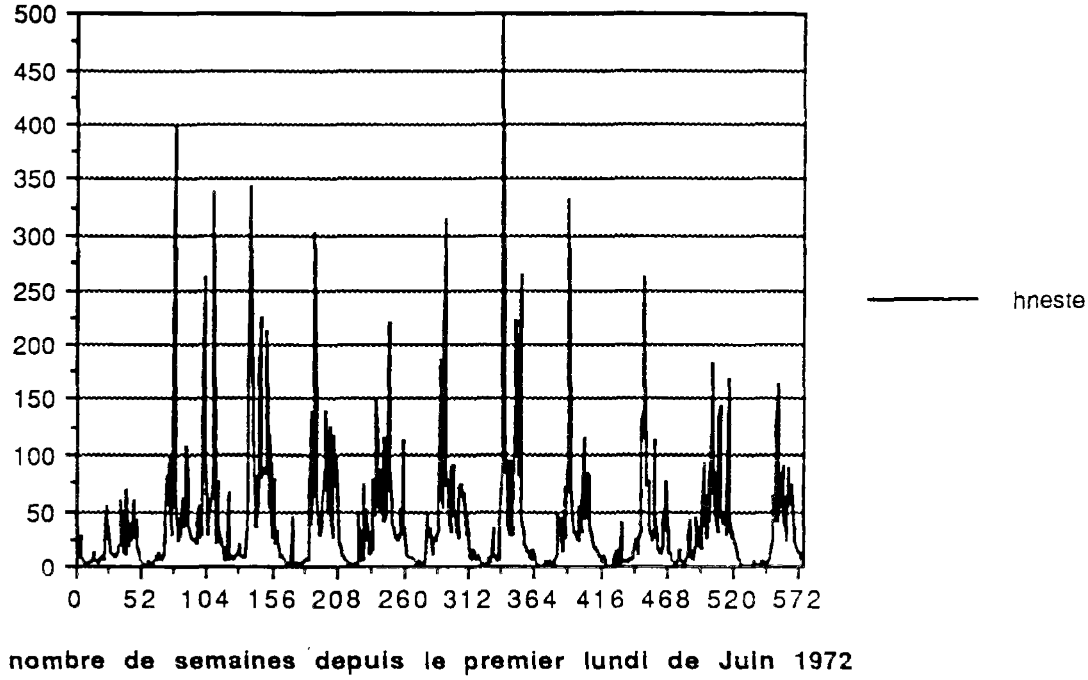
2) d'autre part, il faut connaître l'évolution au cours de la saison de la façon de prélever des irrigants. Pour cela, nous avons utilisé la moyenne de stations de pompage CACG du système Neste pour lesquelles nous avions les enregistrements depuis 1975. Nous avons ainsi fabriqué un indicateur donnant pour chaque semaine le pourcentage du débit souscrit réellement consommé. Par multiplication du débit souscrit annuel de l'ensemble du système, on arrive ainsi à estimer l'évolution semaine après semaine de la politique de prélèvement. Les deux figures ci-après retracent ces prélèvements au cours du temps. On constate que la saison d'irrigation démarre début Juin (t = 1) pour se poursuivre jusque la mi-Septembre (t = 15) voire jusque début Octobre (t = 20) et atteint son maximum vers le mois d'Août. L'année 1977, très humide, apparaît un cas particulier très différent de l'année moyenne d'irrigation.





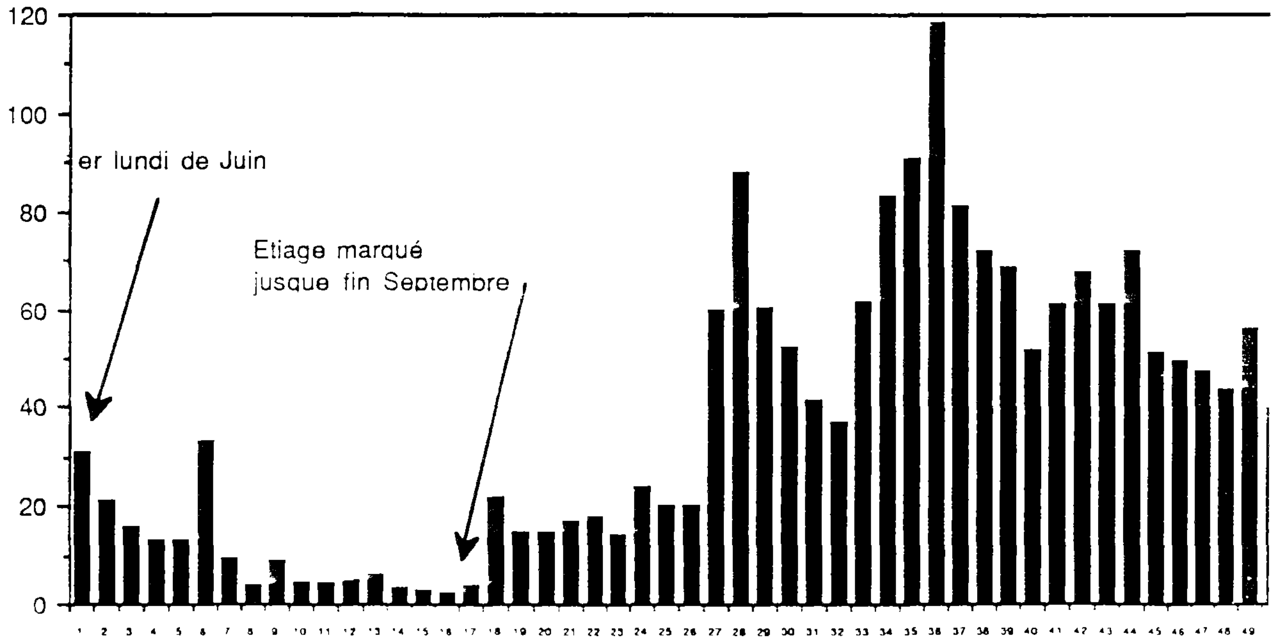
Le régime naturel des rivières de Gascogne a été ainsi reconstitué par l'addition des quantités mesurées et des prélèvements reconstitués. On obtient une série, représentée par le graphe qui suit. Seules, huit valeurs négatives très proches de zéro (inférieures à 500l/s), dues aux erreurs de mesure et à l'imprécision des calculs, sont apparues lors de la reconstitution à l'échelle globale (ce sont les dates 8609, 8610, 8407, 8408, 7610, 8205, 8206, 8216). Elles ont été exclues de l'analyse qui suit.

Régime naturel des rivières de Gascogne



On remarque donc la forte saisonnalité de ces apports et le débit quasi nul qui transparaît en étiage (semaines 1 à 20). Le diagramme suivant des moyennes hebdomadaires permet de préciser cette constatation.

Moyennes hebdomadaires des apports naturels de Gascogne



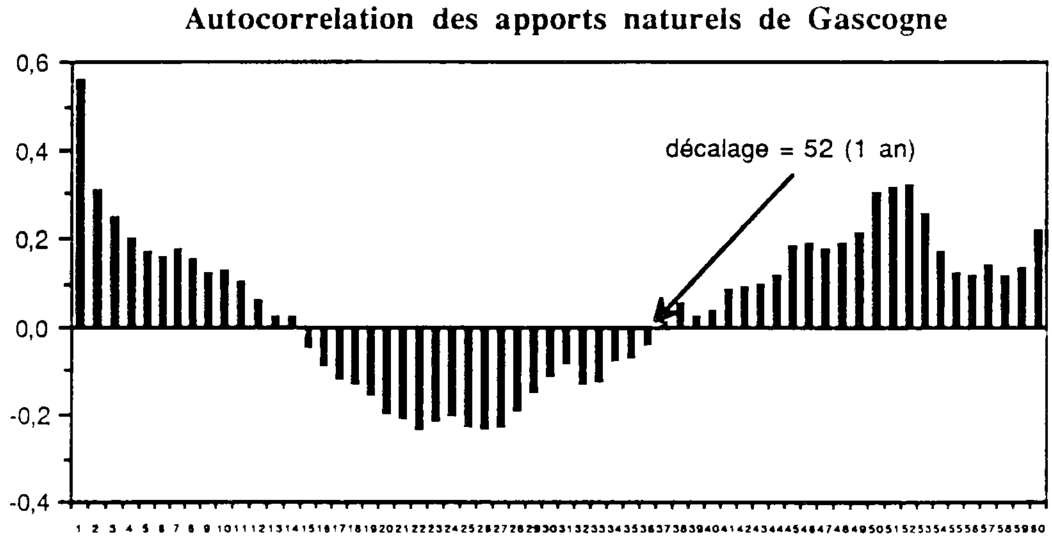
En rapprochant ce diagramme de celui des apports moyens du régime de la Neste, on comprend comment fonctionne globalement l'ensemble du système : on utilise les ressources hivernales et de printemps de la Neste pour stocker dans les barrages de coteaux. Lorsque démarre l'étiage (semaine 1), interviennent deux problèmes :

- l'étiage de la Neste démarrera-t-il tôt dans la saison, ce qui obligerait à utiliser de bonne heure les ressources stockées ?
- va-t-on avoir assez de ressources pour satisfaire jusqu'à la fin de la saison d'irrigation les prélèvements des agriculteurs, tout en maintenant un niveau de qualité acceptable dans les rivières de Gascogne (7 m^3/s) et dans la sortie Neste (4 m^3/s) ?

A partir de la semaine 15, d'autres questions se posent :

- les prélèvements pour l'irigation risquent-ils se prolonger tard dans la saison ?
- les apports naturels de Gascogne vont-ils reprendre et augmenter ?
- peut-on compter sur le régime moyen de la Neste durant cette période (10 m^3/s) et le reliquat de stockage dans les réserves de haute montagne pour satisfaire les exigences de qualité sur les rivières de Gascogne et la Neste ?

D'autre part, il semble, comme l'indique le schéma ci-après, qu'il existe une liaison temporelle pour le régime des rivières de Gascogne, qu'il nous faudra négliger dans un premier temps.



Modélisation statistique des apports de Gascogne

Comme dans le cas de la Neste, ce ne sont pas les débits réels, mais le Logarithme des débits, qui s'ajustent le mieux à la loi normale. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour tester l'adéquation des 52 échantillons de 13 valeurs et a été positif dans tous les cas (niveaux de signification très élevés pour chacune des 52 semaines). Nous allons chercher à ajuster les caractéristiques statistiques de chacune des 52 lois hebdomadaires par un développement en série de Fourrier avec une périodicité de 52 semaines.

Ajustement de la série des moyennes du Logarithme des débits des rivières de Gascogne

La régression sur les six premiers termes de la série de Fourrier donne les résultats suivants :

variable explicative	coefficient	écart type	Student	α
constante	2.6623	0.0398	67	0.000
Cos (2π t/52)	0.0498	0.0563	0.9	0.38
Sin (2π t/52)	- 1.5687	0.0563	- 28	0.000
Cos (4π t/52)	0.2013	0.0563	3.6	0.000
Sin (4π t/52)	- 0.0566	0.0563	- 1	0.32
Cos (6π t/52)	0.1368	0.0563	2.4	0.020
Sin (6π t/52)	0.0240	0.0563	0.42	0.67

Avec les caractéristiques d'ajustement suivantes :

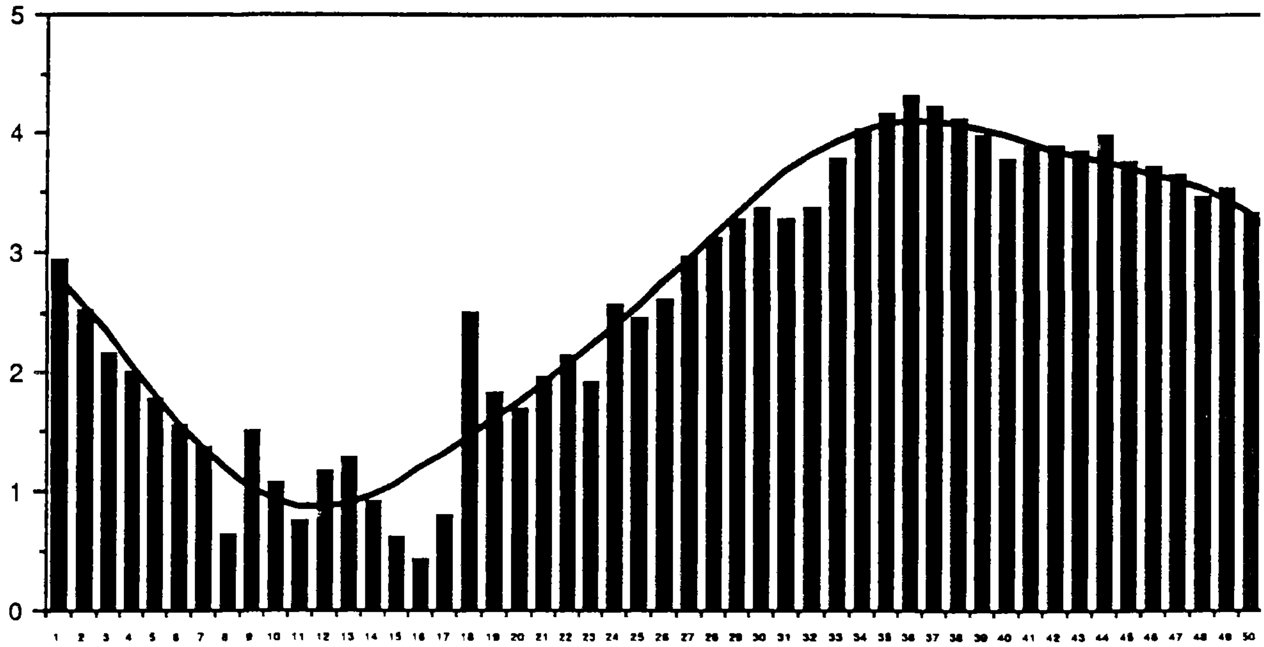
R^2 ajusté = 0.9394
écart type estimé = 0.2871
Test de Durbin Watson sur les résidus = 1.73

Nous garderons donc l'équation suivante à quatre paramètres significatifs:

moyenne des LOG pour la semaine t = 2.66 + 0 Cos (2π t/52) - 1.57 Sin (2π t/52) + 0.20 Cos (4π t/52) + 0 Sin (4π t/52) + 0.14 Cos (6π t/52) + 0 Sin (6π t/52)

La figure suivante montre l'ajustement réalisé.

Ajustement de la moyenne du LOG des apports naturels de Gascogne



On constate que, durant l'étiage, ce modèle a tendance à surestimer la valeur moyenne des apports.

Ajustement de la série des écarts types du Logarithme des débits des rivières de Gascogne

La régression sur les six premiers termes de la série de Fourrier donne les résultats suivants :

variable explicative	coefficient	écart type	Student	α
constante	1.1135	0.0278	40	0.000
Cos (2π t/52)	- 0. 0515	0.0393	- 1.3	0.20
Sin (2π t/52)	0.3228	0.0393	8.2	0.000
Cos (4π t/52)	0.1679	0.0393	4.2	0.000
Sin (4π t/52)	0.1406	0.0393	3.5	0.000
Cos (6π t/52)	- 0.0704	0.0393	- 1.8	0.08
Sin (6π t/52)	0.1103	0.0393	2.8	0.007

Avec les caractéristiques d'ajustement suivantes :

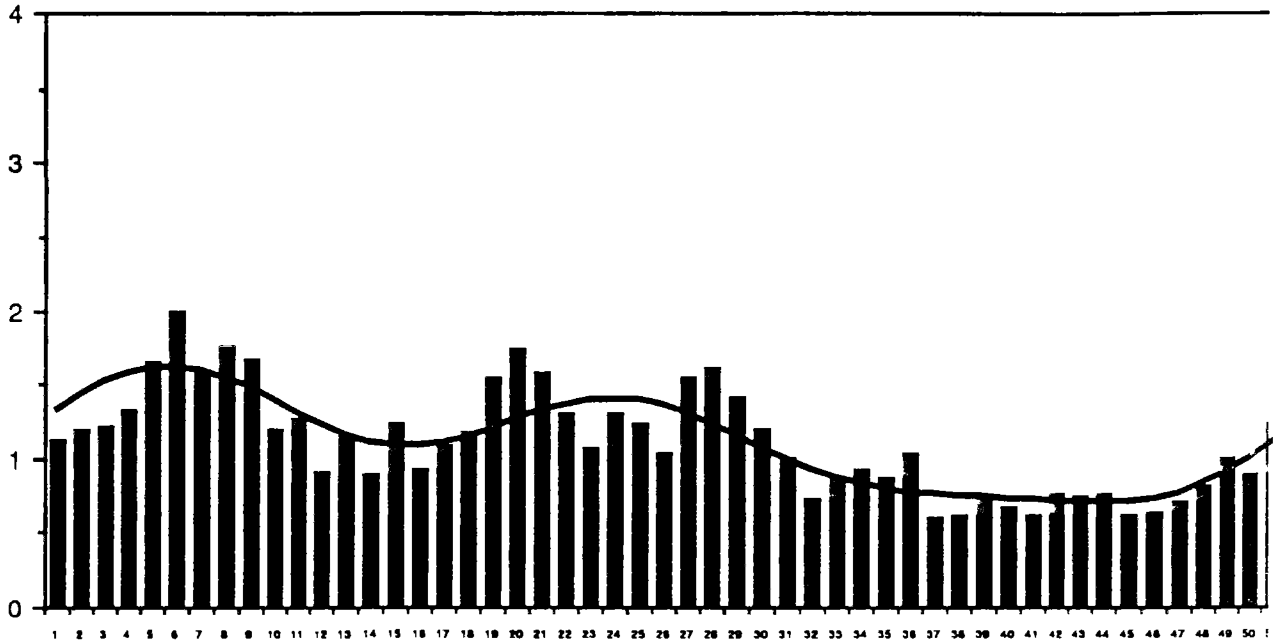
R^2 ajusté = 0.6727
écart type estimé = 0.20
Test de Durbin Watson sur les résidus = 1.28

Nous garderons donc l'équation suivante à cinq paramètres :

écart type des LOG pour la semaine t = 1.11 + 0 Cos $(2\pi\ t/52)$ + 0.32 Sin $(2\pi\ t/52)$ + 0.17 Cos $(4\pi\ t/52)$ + 0.14 Sin $(4\pi\ t/52)$ + 0 Cos $(6\pi\ t/52)$ + 0.11 Sin $(6\pi\ t/52)$

La figure suivante montre alors l'ajustement réalisé.

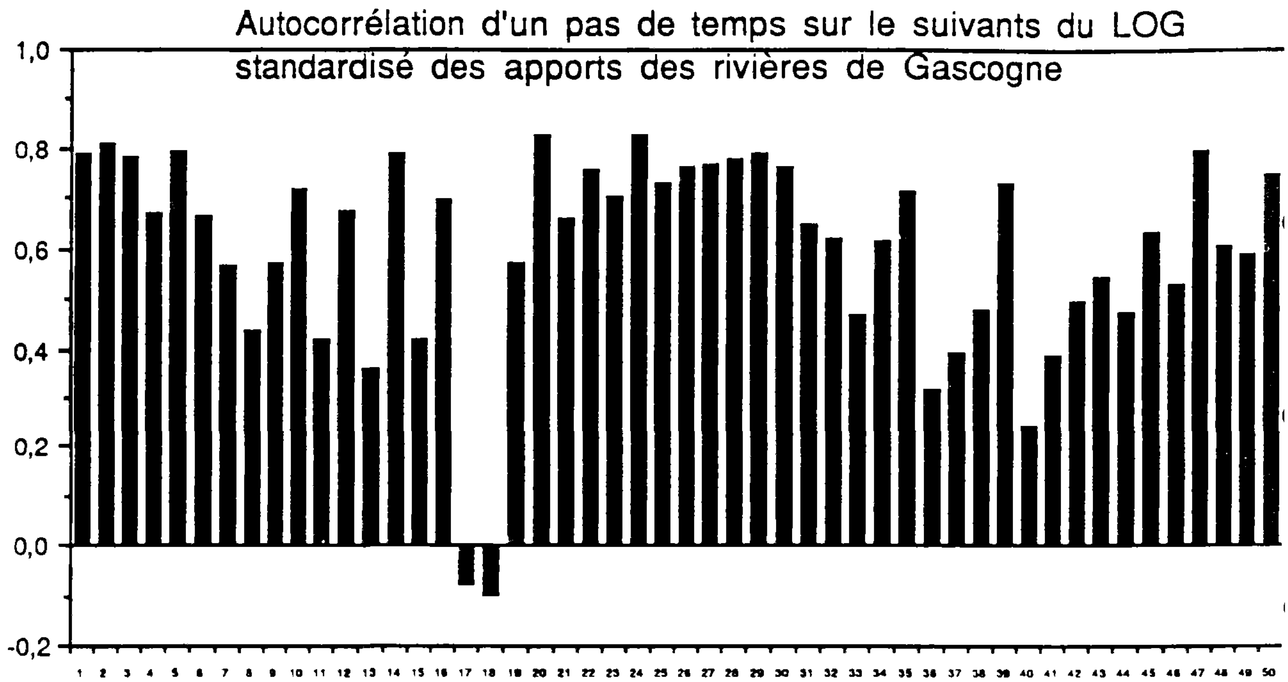
Ajustement du LOG de l'ecart-type des apports naturels de Gascogne



On note que ce modèle surestime la variabilité des apports naturels des rivières de Gascogne durant l'étiage, ce qui va dans le sens de la prudence et compense d'une certaine façon la surestimation précédente des valeurs moyennes.

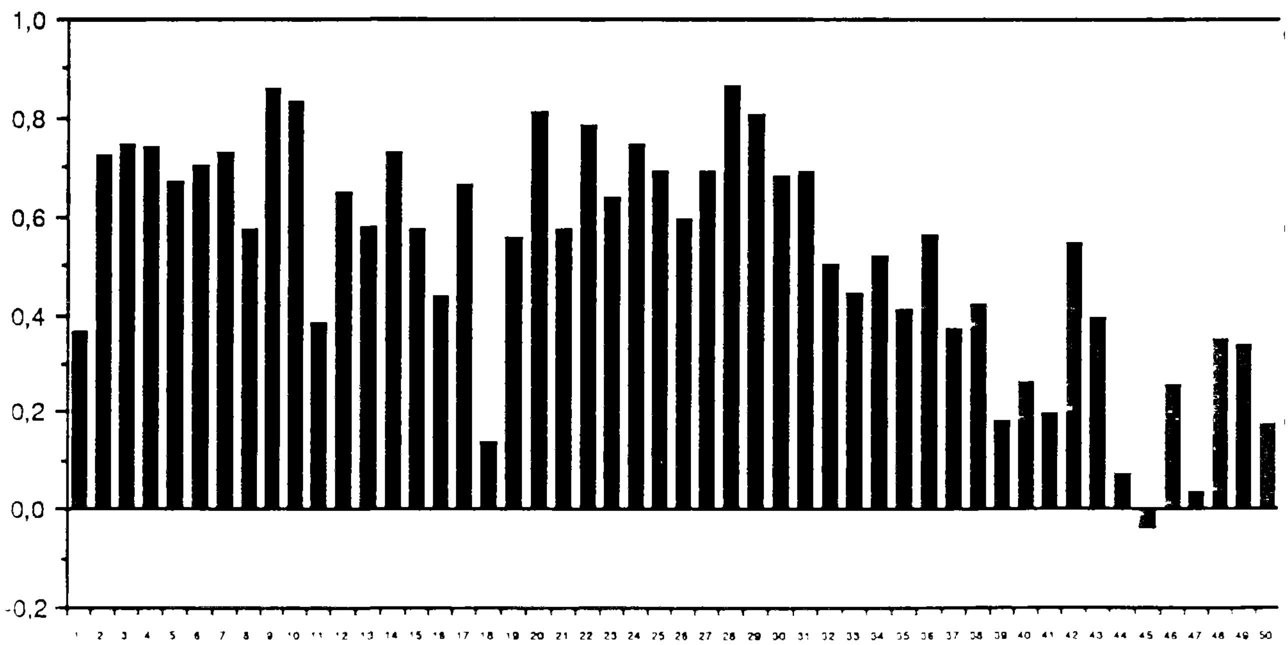
Etude de la liaison entre rivières de Gascogne et apports de la Neste

Il existe une forte corrélation temporelle des Logarithmes standardisés des apports de Gascogne et aussi une forte liaison entre ces derniers et les Logarithmes standardisés des apports de la Neste, ainsi que permettent de le voir les deux schémas suivants.



On remarque que la liaison est moins forte pour les périodes intéressantes critiques de la gestion que sont les périodes d'étiage.

Corrélation croisée entre les LOG standardisés de la Neste et des apports de



On note que l'interliaison entre Neste et Gascogne est quasiment inexistante dès le printemps, ce qui est dû à la différence des deux types de régimes, nival pour la Neste et, pour les rivièresde Gascogne, pluvial, tandis qu'il existe une liaison certaine durant la période d'étiage.

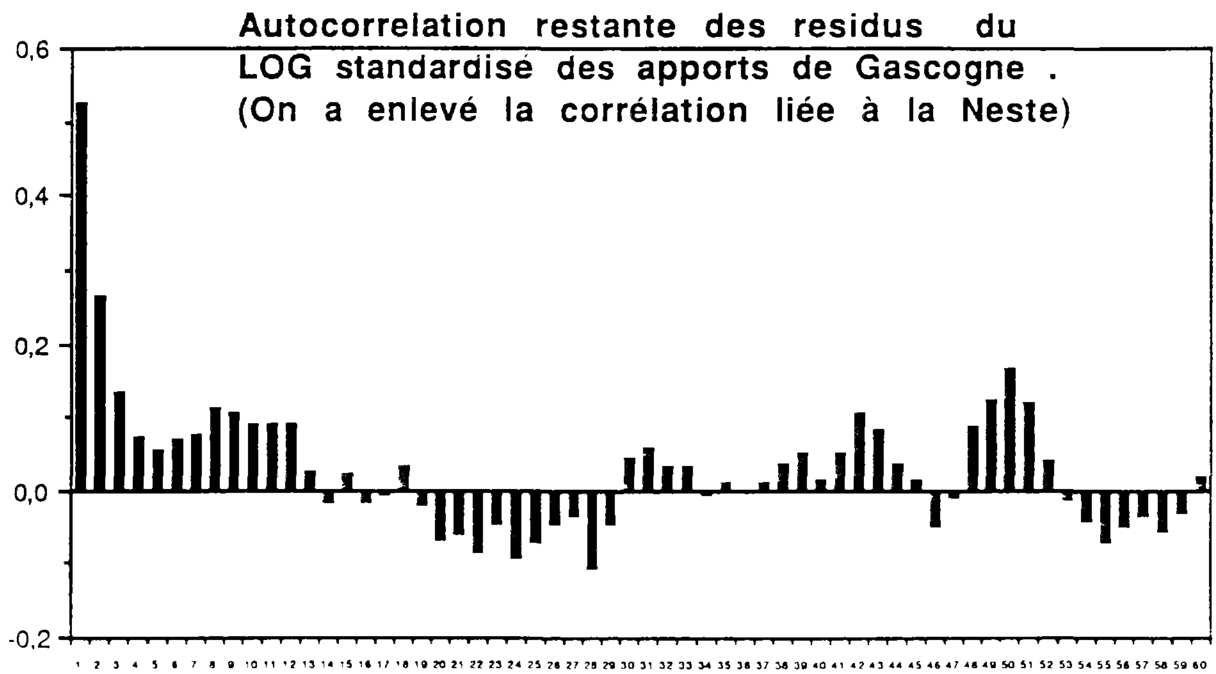
Nous avons cherché à étudier par régression la possible liaison entre le modèle des Logarithmes des apports de Gascogne et le modèle des Logarithmes des apports de la Neste. Le tableau suivant détaille les résultats de la régression linéaire des Logarithmes standardisés des apports de Gascogne sur les Logarithmes standardisés des apports de la Neste considérés comme variables explicatives. L'analyse porte sur 12 ans de données hebdomadaires.

variable explicative	coefficient	écart type	Student	α
constante	0.001	0.03243	0.05	0.96
Pente	0.54	0.03351	16	0.000

Avec les caractéristiques d'ajustement suivantes :

$R^2 = 0.30$ mais significatif avec un Fisher associé de 264
écart type de l'estimation = 0.80

Le schéma ci-après présente les autocorrélations des résidus de cet ajustement.



On constate qu'il subsiste une forte liaison d'ordre 1 que l'influence de la Neste ne nous a pas permis d'éliminer.

Dans un premier temps, nous nous contenterons, pour modéliser la stochasticité des apports naturels des rivières de Gascogne, d'un modèle simple de forme LOG normale à variables hebdomadaires indépendantes (ce qui est sûrement le cas sur la période d'étiage qui nous intéresse au premier chef pour une première règle de gestion), en négligeant toute corrélation temporelle interne (autocorrélation d'ordre 1) ou extérieure (influence de la Neste)

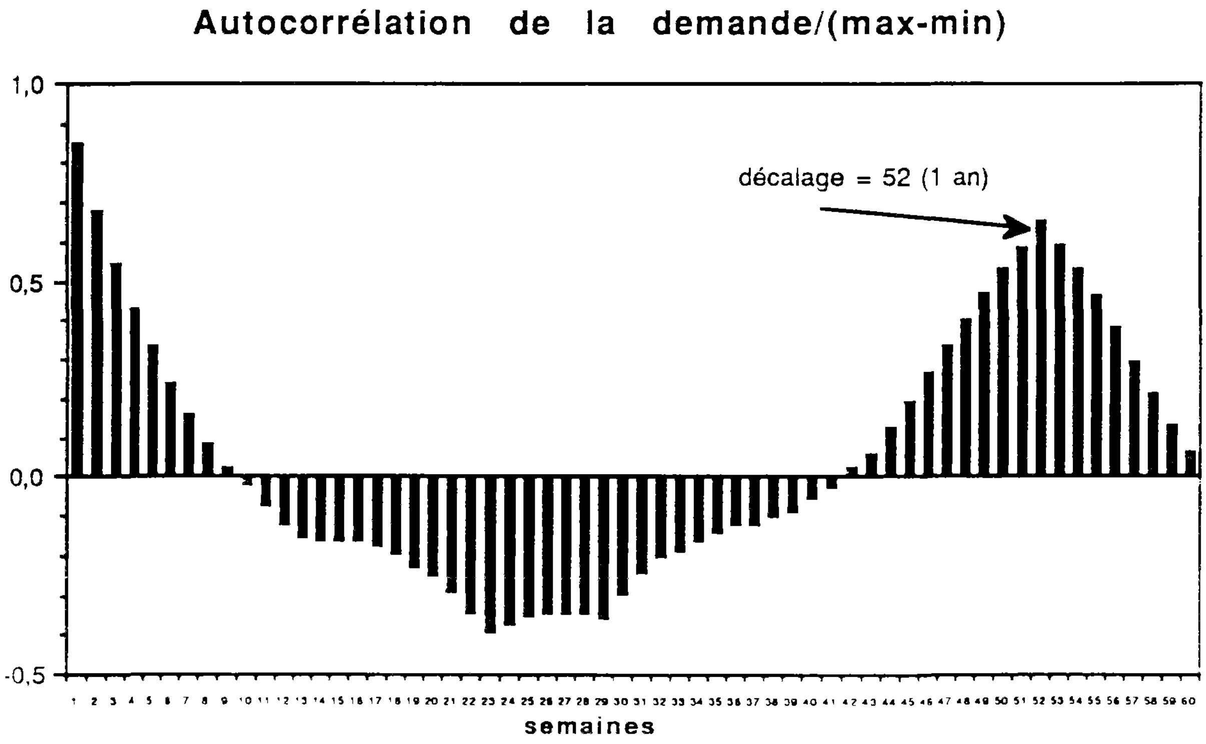
Modélisation de la demande en irrigation durant l'étiage

L'analyse a été conduite à partir de treize années de données collectées sur trois ensembles homogènes de stations de pompage CACG. Il s'agit des stations de l'ensemble de la Haute Save, de celles du Gers moyen, et de celles de la Baïse amont. Les données ont été exprimées au pas de temps de la semaine en millièmes du débit souscrit au cours de l'année pour chaque ensemble de stations de pompage.

Il est difficile de traduire par une loi statistique simple les probabilités liées à la quantité d'irrigation délivrée au cours de chacune des 20 semaines de la saison d'irrigation.

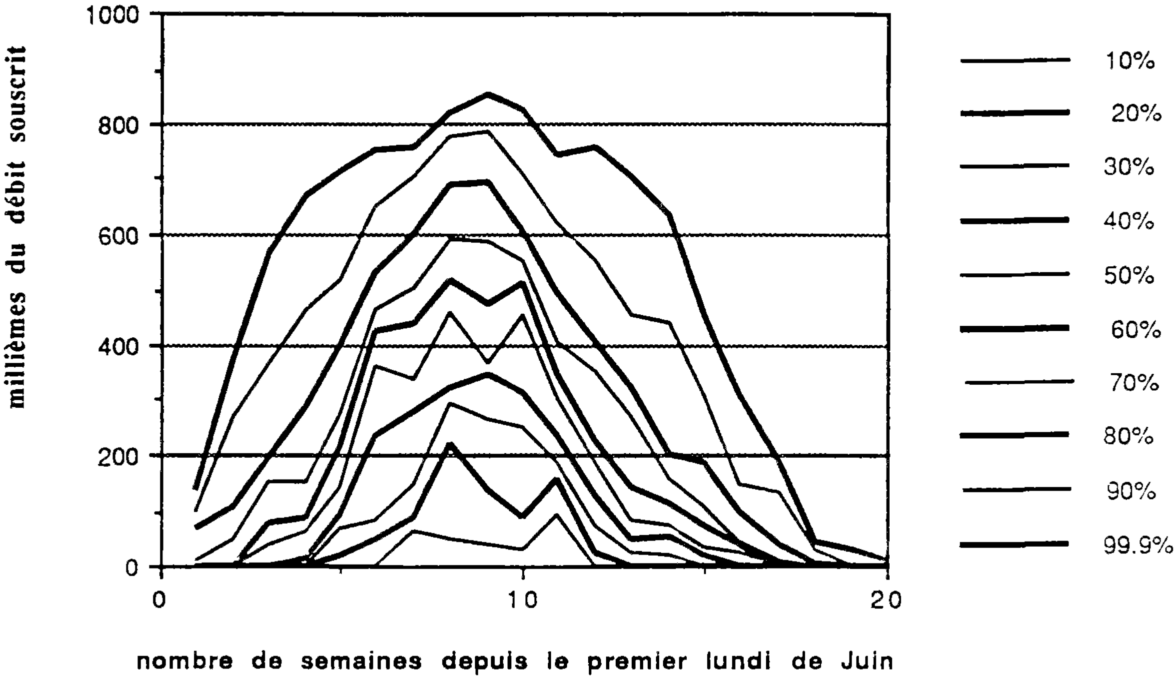
Il y a deux effets qui se mélangent : d'abord, il faut savoir si l'irrigation a effectivement démarré, puis quelle quantité a été demandée. Les histogrammes que l'on observe (39 données pour chaque semaine en mélangeant les trois ensembles de stations) exhibent en effet, au début et à la fin de la saison, des points d'accumulation autour de zéro.

Il est certain que l'on ne peut considérer de façon indépendante la succession des quantités délivrées pour l'irrigation. Le graphe des autocorrélations calculées pour la série des demandes normalisées par l'écart entre le maximum et le minimum enregistrés pour la semaine considérée, indique une forte liaison temporelle.



Néanmoins, dans un premier temps, nous simplifierons la réalité en décrivant les pourcentages de débits souscrits prélevés pour l'irrigation en les supposant indépendants et obéissant à la répartition des quantiles expérimentaux décrits par le schéma suivant.

Quantiles empiriques de demandes pour l'irrigation issus de 3 stations durant l



Dans un second temps il faudra préciser la description statistique de cette demande pour l'irrigation soit en introduisant un conditionnement d'une semaine sur la suivante (il y a continuité des politiques d'irrigation), soit en introduisant des variables extérieures explicatives (besoins en eau de la plante liée à l'évapotranspiration et à la pluviométrie),ce qui dans tous les cas aura pour conséquence d'augmenter la dimension de la variable d'état décrivant le système à la semaine t.

DESCRIPTION DES FICHIERS UTILISES

Toutes les quantités relatives à des débits ont été exprimées en moyennes hebdomadaires en m^3/s à partir des fichiers de données journalières fournis par la CACG.

Les dates sont exprimées par l'année et le numéro de la semaine, calculé à partir du premier lundi de Juin. Ainsi, par exemple :

- 7504 désigne la quatrième semaine du mois de Juin 1975
- 7715 désigne la quinzième semaine comptée à patir du mois de Juin 77, soit la mi-Septembre 1977
- 7250 désigne la cinquantième semaine comptée à partir du premier Lundi de Juin 72, c'est à dire la fin de mai 1973.

Les fichiers sont, soient issus directement des données de la CACG (data1, data2, data3), soient issus de manipulations statistiques sur ces données (stat0, stat1, stat2, stat3, stat4). Les extensions sont soient en.wks (fichiers lotus) soient en.txt (fichiers texte ascii standard).

Les fichiers de données

data1.wks

C'est le fichier des apports, il contient 15 années de données hebdomadaires dans les variables suivantes de longueur 780 (15 x 52)

Neste : apports de la Neste à Beyrède, non compris les lâchers de haute montagne (calcul à partir des fichiers CACG BEYR.GAR)

Date appor : dates correspondantes de 7201 à 8752

Hneste : Gascogne + transfert par la dérivation dûe au canal de la Neste (calcul à partir des fichiers CACG TOTE; QAR)

Gascogne : totaux des débits mesurés aux stations les plus en aval du système Neste. Ces débits sont égaux aux débits naturels, auxquels on a retranché la demande pour l'irrigation (calcul à partir des fichiers CACG TRGE. QAR)

Résidus : 780 valeurs correspondant aux Logarithmes des débits de la Neste standardisés (voir fichiers Stat1)

data2. wks

C'est le fichier correspondant aux besoins pour l'irrigation. On y trouve les variables :

Dateb : date des besoins (13 années, soit une longueur des variables égale à 13 x 52 = 676)

BAA : variable exprimant en millièmes la fraction du débit souscrit à satisfaire chaque semaine, calculée pour les stations de pompage de la BAise Amont

HSA : idem pour les sations de la Haute SAve

MGE : idem pour les stations du Moyen GErs (les trois variables précédentes ont été calculées à partir des fichiers CACG de données journalières BAA.PJV, HSA.PJV et MGE.PJV respectivement)

Datea : est une variable index donnant l'année de Total et Totalbesoins

Total : laquelle contient la somme des débits souscrits pour l'irrigation année par année pour le système Neste en litres/secondes. Elle cumule pour chaque année tous les usagers ayant souscrit pour l'irrigation et la moitié du débit souscrit pour l'AEP.

Totalbesoins : est une variable de travail remettant en forme Total de façon à correspondre à Dateb (mise sous forme hebdomadaire pour les 13 années où l'on connait les fractions de débits souscrits pompées).

Data3

C'est un fichier qui contient les variables :

Dl : date des lâchers depuis le 1er lundi de Juin 1975 jusqu'à la fin Mai 1986

Lhm : lâchers des barrages de haute montagne sur la même période, alimentant la Neste en amont de Beyrède

Lmn : lâchers du barrage Mielan sur la même période

Lpx : lâchers du barrage de Puydarrieux (pour mémoire : nul jusqu'en 1986)

Lac : lâchers du barrage d'Astarac

Les quatre variables précédentes ont été calculées à partir des fichiers CACG LBHM.QJM, LBMN.QJM, LBPX.QJM et LBAC.QJM, données journalières.

Lgascogne : débits mesurés hors demande sur le total des rivières de Gascogne

Lbesoins : besoins pour l'irrigation sur la même période

Lneste : apports naturels de la Neste

Lhneste : débits mesurés hors demande sur le total des rivières de Gascogne incluant le transfert par la Neste.

Lcanal : transfert par la Neste

Lrivneste : lâchers vers la Garonne via la rivière Neste à partir de la prise de Sarrancolin.

Les fichiers de résultats

Stat0

Il contient les moyennes hebdomadaires et les écart-types hebdomadaires pour la variable Neste.

Stat1

IL contient :

- la moyennne hebdomadaire de LOG Neste
- l'écart type hebdomadaire de LOG Neste
- l'autocorrection de LOG Neste standardisé
- l'autocorrection partielle de LOG Neste standardisé
- la corrélation de LOG Neste standardisé d'un pas de temps sur le suivant
- la moyenne hebdomadaire de LOG Neste ajusté par les premiers termes significatifs de la série de Fourrier
- l'écart type correspondant ajusté
- la corrélation d'un pas de temps sur le suivant, ajustée.

Stat2

Il contient :

Besoins : variable correspondant à totalbesoins x 1/3 (baa + mge + hsa) exprimée en m^3/s donnant une estimation des besoins pour l'irrigation sur 12 années, commune avec

Hn : variable identique à Gascogne, mais pour les douze années concernées

Datebesoi : semaines correspondant à ces valeurs

Acfbrut : autocorrélation de (hn + besoins)

Moyhn : moyennes hebdomadaires de (hn + besoins)

Varhn : variances hebdomadaires de (hn + besoins)

M : moyenne sur les LOG (hn + besoins)

V : variance sur les LOG (hn + besoins)

Reshn : LOG (hn + besoins) standardisé

Rhohn : autocorrélation d'un pas de temps sur le suivant de reshn

Rr : corrélation de LOG (hn + besoins) standardisé sur LOG Neste standardisé

Efitted : ajustement de l'écart type de LOG (hn + besoins)

Mfitted : ajustement de la moyenne de LOG (hn + besoins)

Stat3

C'est le fichier qui contient les quantiles 12, 20, 30, 40, 50, 60,70, 80, 90, 99.9 % des millièmes des débits souscrits au cours des 20 premières semaines suivant le1er Lundi de Juin

Stat4

Il contient la variable 10, 20, 30, 40, 50, ..., 99 % et l'autocorrélation de la demande, divisée pour chaque semaine par les valeurs du Max - Min calculées pour chaque semaine sur 13 ans de données.

COMMENTAIRES ET DISCUSSIONS

A propos des débits mesurés en gascogne

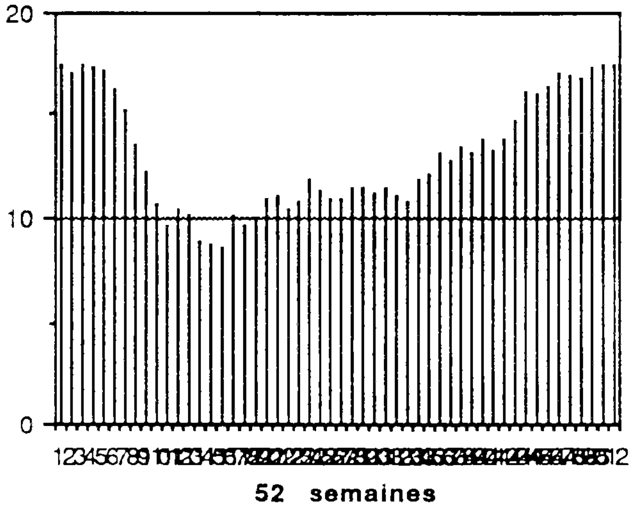
Le régime de la totalité des rivières de Gascogne est très variable, avec des pointes très accentuées. On obtient ainsi de très fortes valeurs moyennes, notamment au cours du mois de Janvier.

Les valeurs correspondantes fournies, notammenet celles du fichier TRGE sont-elles totalement fiables ? On a par exemple pour les 16, 17, 18, 19 Janvier 1981 des valeurs supérieures à 400 m^3/s ! Néanmoins, durant l'été, les valeurs fournies semblent correctes lorsqu'on rajoute la consommation totale estimée : les débits d'étiage sont quasi nuls. Huit valeurs négatives ont été exclues de l'analyse (pour les dates 8609, 8610, 8407, 8408, 7610, 8205, 8206, 8216).

A propos de la reconstitution de politique de gestion

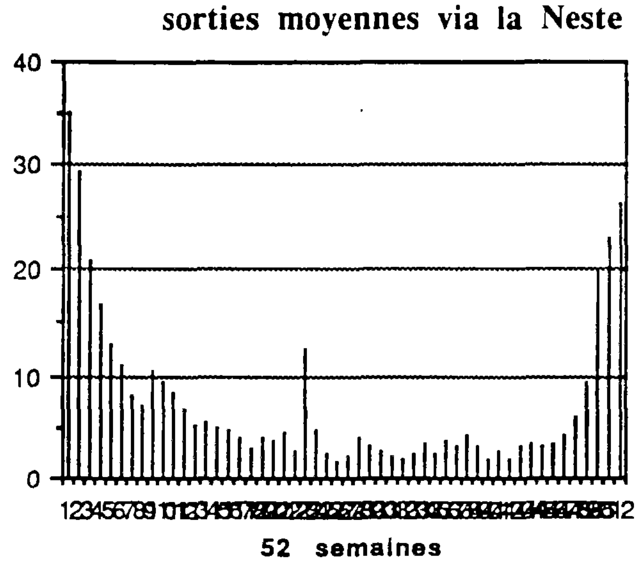
La différence entre les fichiers CACG, TOTE et TRGE donne en théorie le transfert par le canal Neste Les valeurs que l'on obtient sont comprises en moyenne hebdomadaire (variable lcanal) entre 4 et 18 m^3/s et même en considérant 6 % de perte, cela fait beaucoup pour les maxima.

Transferts moyens par le canal



Y-a-t-il eu prise en compte d'apports parasites dûs à la pluviométrie ?

Lorsqu'on calcule :"(lâcher de haute montagne + Neste à Beyrède - transfert par le canal)" pour estimer ce qui s'en va vers la Garonne via la rivière Neste à Sarrancolin, on a quelques surprises sur les données historiques (variable lrivnest).



Si, en moyenne sur les 11 ans traités, on tourne à 10 puis à 4 m^3/s, puis à 3 m^3/s durant les 20 premières semaines suivant Juin, il y a des années où le niveau descend très bas, et on peut estimer que 30 % des valeurs sont bien en deça des1,5 m^3/s. Plus tard dans la saison jusqu'en Janvier, il existe aussi des séquences où l'on n'a pas su tenir les 3 m3/s. On peut donc se poser la question de savoir si le respect des débits réservés sur la Neste était si strictement observé.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 2

Exemple de requête de la CACG
auprès du Service de Distribution des Eaux
de la Neste

DECEMBRE 91

E. PARENT

COMPAGNIE D'AMENAGEMENT
DES COTEAUX DE GASCOGNE

Année : 1987

Direction de l'Equipement

UTILISATION DES EAUX
DU CANAL DE LA NESTE

DEMANDE DE FOURNITURE N° 12

Destinataire : Monsieur l'Ingénieur en chef du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Chargé du Service Spécial d'aménagement hydraulique des coteaux de Gascogne,

Service de distribution des eaux de la Neste
45, rue Victor Hugo

65000 T A R B E S

Points de livraison	Débit l/s
CANAUX DE LA COMPAGNIE	
. en tête du canal d'ARNE	500
. en tête du canal de MONLAUR	
1 250	
RIVIERE (en plus du débit réservé par le décret de 1909)	
. en tête du BOUES	350
. en tête du LIZON	70
. en tête de la BAISE-DARRE	200
. en tête de la BAISOLE	
. en tête de la Petite BAISE orientale	1 100
. en tête de la SOLLE	60
. en tête du GERS	1 300
. en tête du CIER	40
. en tête de l'ARRATS	
. en tête de la GIMONE	760
. en tête de la SEYGOUADE	80
. en tête de la GESSE	150
. en tête de la SAVE	300
. en tête de la LOUGE + NERE (Franquevieile) 130 + 230	350
. en tête de la NOUE	30
. en tête du LAVET	10
TOTAL	6 550

à compter du 30/07/87 jusqu'à modification par une nouvelle demande de fourniture.

A TARBES , le 30/07/87 pour la Compagnie

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 3

Décret de 1909 répartissant les dotations
des rivières du système Neste

DECEMBRE 91

E. PARENT

PREFECTURE DES
HAUTES PYRENNEES

8 Août 1909

REPUBLIQUE FRANCAISE

DECRET

Le président de la République,

Sur le rapport du Ministre de l'Agriculture,

Vu la loi du 31 mai 1846, déclarant d'utilité publique l'exécution de travaux de dérivation des eaux de la Neste ;

Vu le décret du 27 Juillet 1886, portant répartition générale des eaux du Canal de la Neste, entre les 19 rivières énumérées à l'article 1er de ce décret ;

Vu notamment l'article 5 dudit décret ainsi conçu :

"Si la dotation attribué à l'une des rivières mentionnées à l'article 1er restait inutilisée et devenait par suite disponible, l'Administration en reprendrait la libre disposition et pourrait l'affecter à d'autre rivières".

"Dans ce cas, il serait statué par décret rendu dans la forme des règlements d'administration publique".

Vu les décisions ministérielles des 4 Janvier et 22 Mai 1907, autorisant la mise à l'enquête, dans les cinq départements des Hautes-Pyrénées, du Gers, de la Haute-Garonne, et du Tarn-et-Garonne, d'un projet de révision du décret du 27 Juillet 1886 ;

Vu le dossier de l'enquête ouverte dans les départements intéressés, conformément aux décisions précitées ;

Vu le procès-verbal de la conférence tenue les 12 Mars et 13 Juillet 1908 entre les ingénieurs en Chef des Hautes-Pyrénées, du Gers et de la Haute-Garonne ;

Vu le rapport des ingénieurs des 8-24 Octobre 1908 sur les résultats de l'enquête ;

Vu les lois des 12-20 Août 1790, 28 Septembre-6 Octobre 1791 et l'arrêté du Gouvernement du 19 Ventôse an VI ;

Le Conseil d'Etat entendu,

DECRETE :

Article 1er - Les rivières alimentées par le Canal de la Neste et leurs dotations sont indiquées ci-après :

Rivières	Dotations en litres par seconde	Rivières	Dotations en litres par seconde
1° Gers	1 044	10° Nère	121
2° Solle	127	11° Ruisseau du Rieutort	
3° Galavette	70	12° Saygouade	91
4° Baïse Devant Or.	372	13° Lavet	91
5° Baïse Devant Oc.	47	14° Louge	586
6° Baysolle	256	15° Save	574
7° Baïse Darré	916	16° Gesse	430
8° Arrats	500	17° Gimone	500
9° Noue	209	18° Bouès	350
		TOTAL	6 284 litres

Article 2 - Le canal de la Neste fournit en outre 568 litres pour l'alimentation de prises d'eau faites en vertu de concessions sur le canal lui-même ou sur les rigoles alimentaires.

Article 3 - Les débits seront mesurés au moyen d'un déversoir en mince paroi, à lame libre, établi immédiatement en aval de l'appareil de manoeuvre commandant le débit de chaque rivière ou prise d'eau concédée.

Article 4 - Dans le cas où dans un délai de 5 ans, à partir de l'émission du présent décret, les travaux nécessaires pour assurer l'alimentation de la Solle ne seraient pas terminés, la dotation de cette rivière serait considérée comme disponible et les 127 litres seraient répartis entre la Baïse-Devant Orientale et la Baysolle proportionnellement aux dotations de ces rivières, soit 75 litres pour la Baïse-Devant Orientale et 52 litres pour la Baysolle.

Article 5 - Aucune nouvelle concession ne sera accordés à l'avenir sur le canal ou les rigoles alimentaires.

Article 6 - Dans le cas où par l'effet de mesures prises par l'Administration, dans l'intérêt de l'entretien du canal, de la police et de la répartition des eaux, de la navigation du flottage, de la salubrité publique, en dehors des eaux concédées, ne serait pas suffisant pour assurer les dotations complètes des rivières, le service de la distribution répartirait la disponibilité proportionnellement aux chiffres des dotations.

Toutefois, un volume d'eau minimum de 1 200 litres par seconde sera réservé en tout temps, sauf cas de force majeure, dans l'intérêt de la navigation, à l'ensemble des six cours d'eau formant la Baïse navigable (Solle, Galavette, Baïse Devant Orientale, Baïse-Devant Occidentale, Baysolle et Baïse-Darré).

Un volume d'eau minimum de 600 litres sera, dans les mêmes conditions réservé au Gers dans l'intérêt de l'alimentation et de l'hygiène des villes d'Auch et de Lectoure.

Article 7 - Les manoeuvres de prise d'eau en tête du canal de la Neste devront être opérées de manière à laisser, en tout temps, dans le lit de la Basse-Neste, un débit minimum de 4 mc par seconde.

Article 8 - En aucun cas, les usagers ne pourront prétendre à une indemnité ou à un dédommagement quelconque si, à quelque époque que ce soit, l'Administration reconnaît nécessaire, pour les raisons énumérées à l'article 6, de prendre des mesures qui les privent d'une manière temporaire ou définitive, de tout ou partie des avantages résultant du présent décret.

Article 9 - Le taux et le mode de perception des redevances à imposer, pour l'usage des eaux prises sur le canal de la Neste ou les rigoles dérivées demeurent fixés par le décret du 22 Novembre 1906.

Article 10 - Le Ministre de l'Agriculture est chargé de l'exécution du présent décret.

Fait à Rambouillet le 8 Août 1909

Signé : A. FALLIERES

Par le Président de la République
Le Ministre de l'Agriculture,

Signé : RUAU

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 4

Etudes préliminaires des données brutes et reconstitution de la demande sur la Neste

DECEMBRE 91

E. PARENT

CALCUL DES PRELEVEMENTS

Les Données

Nous disposions de 33 stations CACG de mesures journalières de pompage (dont 17 hors système NESTE mais voisines sur la Garonne) de l'année hydrologique 1969 à 1987(l'année hydrologique commence le 1erOctobre) avec les informations suivantes:

- débit souscrit,
- volume consommé,
- surface irriguée,
- chronique des débits journaliers.

La CACG avait classé ces 33 stations en huit groupes supposés homogènes du point de vue des irrigations :

gr	GROUPE	STATIONS
1	ADOUR	RISCLE
2	BAISE Amont	CUELAS, DUFFORT, ST ELIX
3	Haut GERS	PEYRET, SAMARAN
4	Moyen GERS	ORBESSAN, PAVIE
5	Haute SAVE	AVEZAC, La COUTERE, Les CABANETTES, ANAN, BOISSEDE
6	LOT et GARONNE	BUZET,S T LAURENT 1, ST LAURENT 2, ST COLOMBE, BEQUIN
7	Bas ARRATS	DONZAC, MERLE, LAVIT, CAUMONT, CASTELNAU
8	SAVE GIMONE GARONNE	LAFITTE, ST SARDOS, CAMBEROUGER, BOUILLAC, ST CRICQ, VERDUN, AUCHANVILLE, Notre DAME, SAVENNES, MERVILLE

Pour chaque unité (bassin versant) construite pour la modélisation, la CACG avait proposé un jeu de pondération reflétant la participation d'un groupe particulier à la constitution du prélèvement global pour l'unité.Ainsi par exemple, pour l'unité OSSE, il est proposé:

(unité **OSSE**) = **9.5%**. (Groupe **ADOUR**) + **34.5%**. (Groupe **BAISE Amont**) + **56%**.(Groupe **LOT et GARONNE**)

Une première lecture des stations fait apparaitre le diagnostic résumé dans le tableau ci après ou chaque station est identifiée par ses premières initiales.

On constate:

- qu'aucune donnée n'est disponible avant l'été 1975 (année hydrologique 74-75)

- que les stations PEYRET,SAMARAN,Les CABANETTES, MERLE, CAUMONT, ST LAURENT 2, ST COLOMBE, CASTELNAU sont inexploitables pour la totalité des périodes.

Par conséquent le groupe 3 Haut GERS constitué de PEYRET,SAMARAN n'existe plus. Les pondérations proposées par la CACG seront donc révisées pour les unités où intervenait ce groupe 3 et redistribuées sur les autres groupes participant à ces unités.

- que l'année hydrologique 76-77 apparait comme très particulière. Il y a absence de données concomittantes pour les stations de RISCLE, PAVIE, DUFFORT, LA COUTERE, BOISSEDE.

On note aussi quelques absences de données bizarrement isolées:
La COUTERE en 81-82,
ANAN en 82-83.

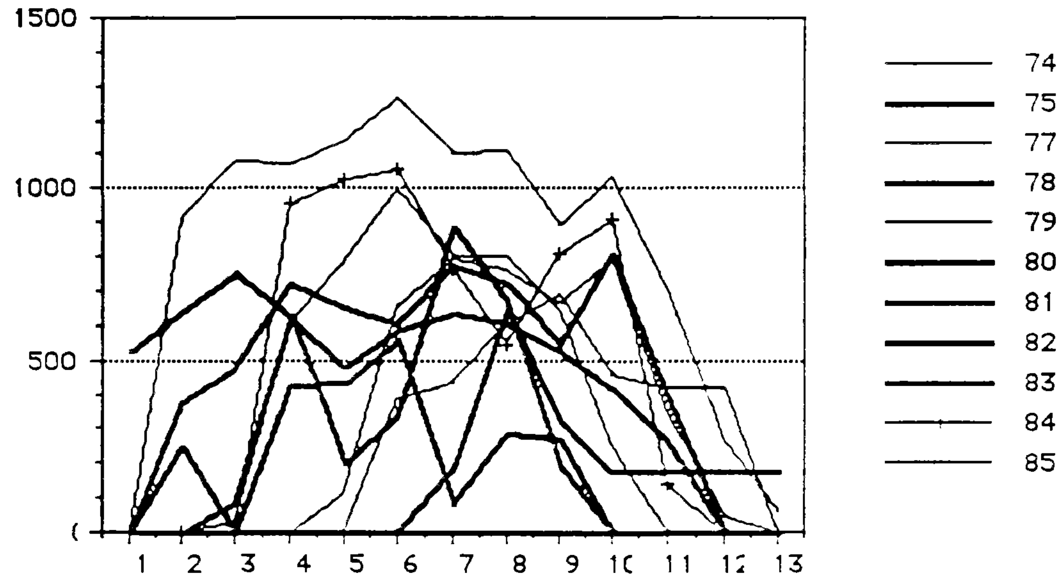
Analyse en composantes principales

Nous avons construit pour chaque station, pour chaque année, les prélèvements **unitaires** journaliers en divisant les débits journaliers pompés par le débit souscrit lorsqu'il était connu, ou par le maximun de la consommation journaliere sur la saison d'irrigation dans le cas contraire. De ce fait il existe donc des prélèvements unitaires supérieurs à 1 (jusqu'à 1.5) lorsque les débits souscrits n'ont pas été respectés.

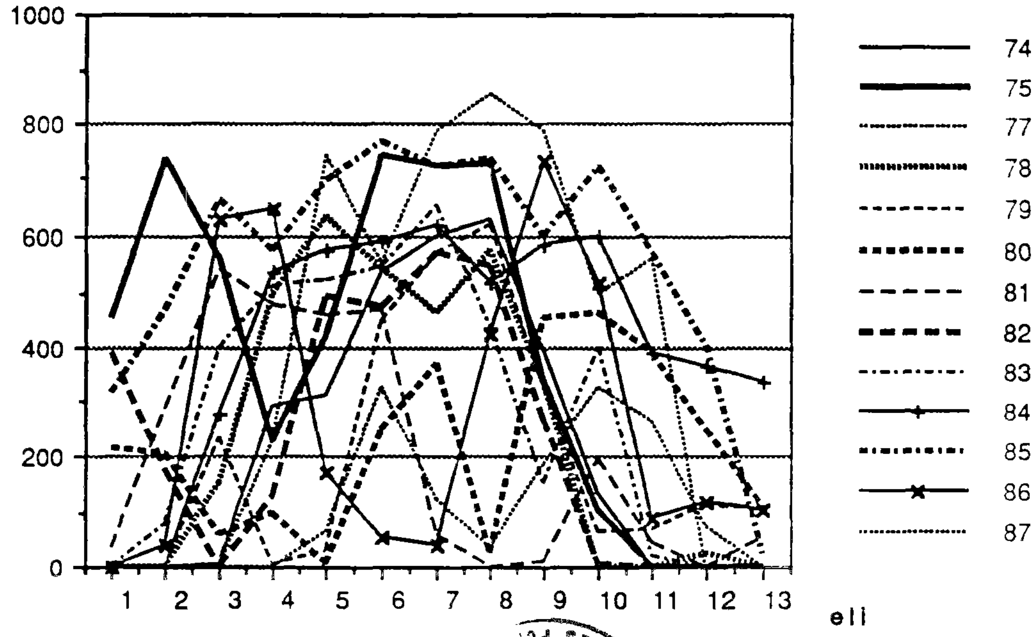
A partir de ces prélèvements unitaires journaliers nous avons construits les prélèvements unitaires hebdomadaires sur 13 semaines du 15 Juin au 17 Septembre.

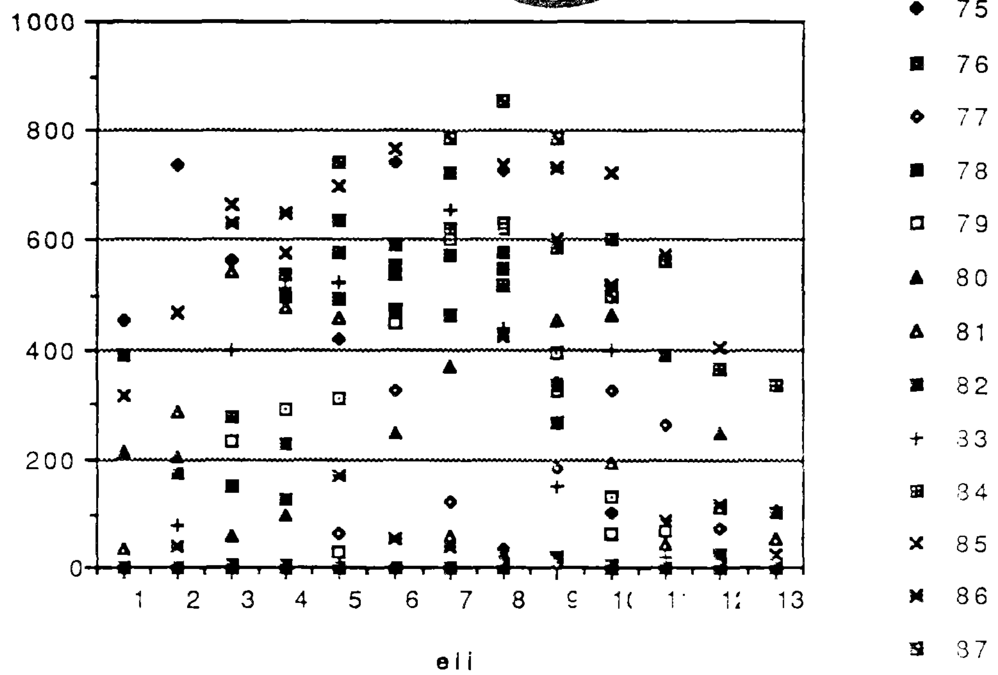
Quelques exemples de résultats sur les stations de RISCLE et de ST ELIX montrent la compléxité de ces profils et de leur évolution au cours de la saison d'irrigation.mais aussi la remarquable homogénéité des repartitions globales à chaque pas de temps si on considère le faisceau de trajectoires de chaque année. (On peut ainsi donner pour chaque pas de temps les valeurs de prélèvements unitaires non dépassés 8 fois sur 10 au cours des 14 dernières années).

Données extraites des prélèvements de la station RISCLE (pas de temps hebdomadaires du 17 juin au 15 sept)



Données de prélèvement de la station St ELIX
(pas de temps hebdomadaires du 17 Juin au 15 sept)





Nous avons éffectué une analyse en composantes principales normées (ACP) sur 21 stations renseignées de 79 à 85 (en excluant 82) soient 6 blocs de 13 semaines.

On obtient la matrice des corrélations suivantes où les coefficients sont en millièmes.

	RIS	CUE	DUF	ELI	ORB	PAV	AVE	ANA	BOI	BUZ	LA1
RIS	1000										
CUE	593	1000									
DUF	557	947	1000								
ELI	701	945	926	1000							
ORB	670	739	746	821	1000						
PAV	513	768	802	778	654	1000					
AVE	568	667	694	657	573	470	1000				
ANA	438	576	511	560	539	434	444	1000			
BOI	522	794	769	761	650	570	641	591	1000		
BUZ	628	799	793	817	719	633	510	500	683	1000	
LA1	628	832	823	834	703	698	542	548	674	924	
BEQ	543	754	793	776	613	767	469	290	587	786	
DON	531	604	566	638	607	558	308	388	414	597	
LAV	616	605	601	679	618	545	446	512	464	598	
LAF	644	740	684	766	650	710	395	516	560	651	
CRI	683	882	885	900	741	731	628	561	786	783	
VER	599	751	723	754	662	561	579	390	716	622	
AUC	654	770	776	789	672	747	599	463	644	648	
DAM	591	781	776	796	645	715	603	456	710	634	
SAV	632	805	789	819	607	711	640	477	668	662	
MER	577	885	869	868	731	731	662	564	793	716	

	LA1	BEQ	DON	LAV	LAF	CRI	VER	AUC	DAM	SAV	MER
LA1	1000										
BEQ	825	1000									
DON	647	634	1000								
LAV	655	595	539	1000							
LAF	722	706	832	694	1000						
CRI	815	752	605	612	728	1000					
VER	651	561	574	474	663	819	1000				
AUC	706	685	554	604	685	802	812	1000			
DAM	670	650	438	511	616	843	833	864	1000		
SAV	718	692	513	538	683	848	810	874	911	1000	
MER	737	682	540	578	697	910	817	835	861	850	1000

Nos stations sont donc extrêmement corrélées. La première valeur propre de cette matrice de corrélation est de 70 % de la variabilité totale à expliquer tandis que la seconde valeur propre est à 6 %. Toutes les stations (sauf ANAN) sont très bien corrélées au premier facteur.

gr	Station				Facteur1 coordonnée (nouvelle)	corrélation	contribution
1	RIS	872	13	48	735	540	37
2	CUE	920	13	48	937	879	60
3	DUF	929	13	48	927	858	59
4	ELI	922	13	48	956	914	63
5	ORB	734	13	48	823	678	47
6	PAV	751	13	48	814	662	45
7	AVE	799	13	48	693	480	33
8	ANA	927	13	48	608	370	25
9	BOI	803	13	48	806	650	45
10	BUZ	857	13	48	847	717	49
11	LA1	885	13	48	883	780	54

12	BEQ	905	13	48	818	669	46
13	DON	822	13	48	689	475	33
14	LAV	720	13	48	710	505	35
15	LAF	907	13	48	821	674	46
16	CRI	898	13	48	941	886	61
17	VER	848	13	48	830	689	47
18	AUC	870	13	48	876	767	53
19	DAM	908	13	48	862	744	51
20	SAV	890	13	48	881	776	53
21	MER	911	13	48	919	844	58

La classification ascendante hierarchique par maximisation du moment centré d'ordre 2 fournit les divisions suivantes:

(PAV BEQ BUZ LA1 BOI CUE DUF MER ELI CRI DAM SAV VER AUC)

et

(DON LAF AVE RIS ORB LAV ANA)

puis:

(PAV BEQ BUZ LA1 BOI CUE DUF MER ELI CRI) et (DAM SAV VER AUC)

et

(DON LAF AVE RIS ORB LAV ANA)

puis:

(PAV BEQ BUZ LA1 BOI CUE DUF MER ELI CRI) et (DAM SAV VER AUC)

et

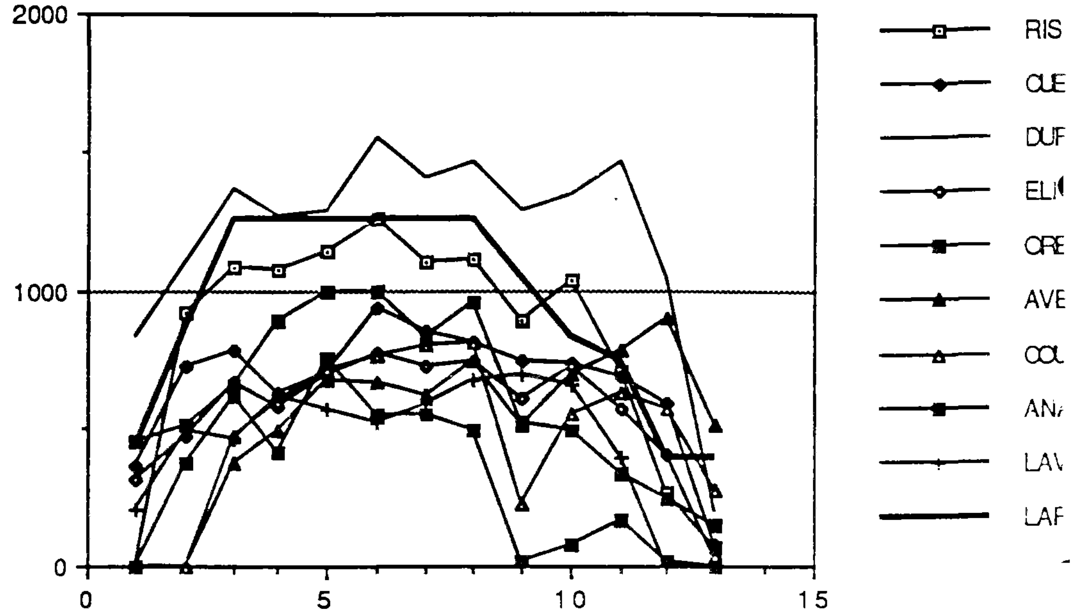
(DON LAF) et (AVE RIS ORB LAV ANA)

ce qui ne correspond à aucune structure géographique ou de groupe de comportements prévus a priori.

En conclusion s'il existe une grande variabilité interannuelle comme le montrent les schémas d'évolutions de St ELIX ou de RISCLE par exemple, il existe pour une année donnée un comportement homogène de prélèvements pour l'ensemble des stations, et l'analyse des données de notre echantillon de 21 stations sur 6 ans hebdomadaires estime à 70% la part de ce facteur d'homogénéité et à 30% la variabilité propre à chaque station.

On voit par exemple sur l'année 8586 l'attitude "homogène" d'irrigation sur l'ensemble des evolutions parallèles des stations.

10 relevés de prélèvement unitaires au cours de la saison d'irrigation (année 8586)



Reconstitution des données manquantes

Les estimations des données manquantes par régressions linéaires ont été effectuées afin de compléter le tableau des prélèvements pour 25 stations à partir de 1974.

Ces formules de régressions ont été calées sur les données de prélèvements unitaires hebdomadaires, d'abord en sélectionnant les variables fortement explicatives par régression "stepwise" avec une valeur du test de FISHER fixée à 3, puis en ne selectionnant que les stations explicatives qui fournissaient un coéfficient positif. Le tableau ci-joint indique pour les stations à données manquantes la formule adoptée (les coefficients de pondération sont en millièmes) et la valeur du R^2 correspondant.

On remarque que la somme des pondérations est proche de 1 en général bien que nous ne l'ayons pas explicitement imposé. Ceci s'explique car on travaille sur des prélèvements unitaires en principe tous inférieurs à 1 sauf quand les débits souscrits sont transgressés ce qui tend à prouver que les maxima sont concommitants.

Ces formules ont été appliquées pour les prélèvements journaliers unitaires des stations aux données manquantes pour lesquelles on a reconstruit les prélèvement journaliers en multipliant ensuite par le débit souscrit pour l'année.

Calcul des prélèvements unitaires par bassins versants

Calcul des prélèvements unitaires par groupe:

Chaque année on a calculé les prélèvements journaliers par groupe de stations.

Si au cours de la saison,le prélèvement journalier du groupe dépasse la somme des débits souscrits par les stations qui composent ce groupe on adopte le prélèvement journalier du groupe comme comme débit souscrit du groupe de telle sorte que les prélèvements unitaires du groupe soient inférieur ou égal à 1.

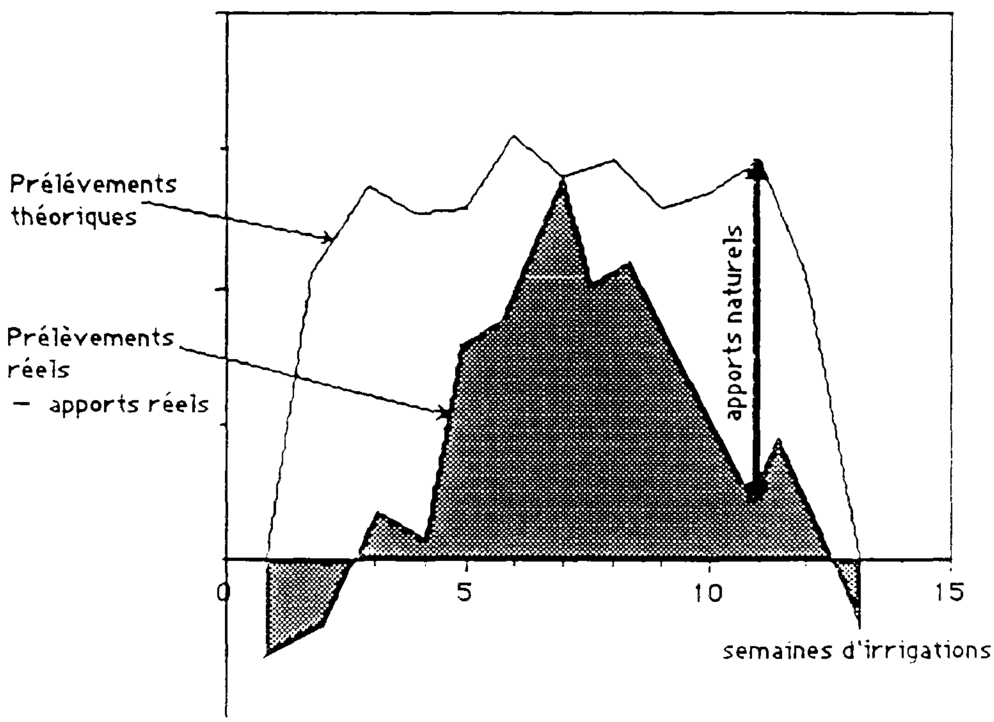
Calcul des prélèvements unitaires par bassins versants:

Par le jeu des pondérations bassins versants - groupes de stations fournies par la CACG on calcule les combinaisons linéaires correspondant aux prélèvements unitaires de chaque bassin versant.

Remarques

Coherences:

Le fait de travailler en prélèvements unitaires n'exploite que l'information sur les débits souscrits (dont on dispose quasiment partout) et non celles relatives au volumes totaux consommés et à la surface irriguée.Ces dernières informations n'ont donc pas été prises en compte. On fera l'hypothèse que le comportement global du bassin versat varie comme celui des station de pompage CACG.



Il est nécessaire d'examiner sur un même graphe,année par année,bassin par bassin,les courbes des prélèvements théoriques et les débits apparents réels afin de visualiser comment la courbe des prélèvements théoriques peut "envelopper" celle des débits apparents réels.

Discussions et orientations

L'ACP laisse penser, qu à l'échelle hebdomadaire du moins, il existe une grande homogénéité des prelèvements pour tout le systeme. Adopter **une** seule variable pour le prélèvement simplifiera donc le problème de façon raisonnable et justifiée.

Dans le modèle à un réservoir aggloméré, nous envisageons donc de ne considérer qu'**une** variable de prélèvements.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 5

Essai de modélisation mathématique
des divers usages de l'eau

DECEMBRE 91

E. PARENT

ESSAI DE FORMULATION MATHEMATIQUE DES OBJECTIFS

Le texte qui suit est très largement inspiré d'une présentation analogue dans.FAUCHET(1988). Pour mettre au point les consignes de gestion, il est nécessaire de formuler mathématiquement les différents besoins en eau et la façon dont celle-ci sera valorisée, en définissant une **fonction économique** aussi appelée fonction-objectif. Nous allons esquisser ici les formes possibles d'une telle fonction pour obtenir une représentation mathématique de ces divers objectifs.

Pour définir cette fonction, on peut classer les objectifs comme suit :

- protection contre les crues,
- besoins en eau,
- production électrique,
- qualité des eaux,
- mise en valeur touristique.

Nous supposons dans tout ce qui suit que ces objectifs peuvent s'exprimer par une fonction séparable dans le temps et que le calcul du gain global peut s'effectuer en intégrant les bénéfices élémentaires de chaque pas de temps.

La protection contre les crues

La protection contre les crues est difficile à traiter à l'aide d'un outil de gestion travaillant à un pas de temps supérieur à un jour et qui donne des consignes "moyennes". Ceci est dû au caractère particulier de l'évènement :

- le pas de temps de la gestion en période de crue est extrêmement court, une crue durant typiquement deux ou trois jours : le pas de temps adapté est l'heure.

- c'est un évènement à caractère exceptionnel : une crue est un évènement peu fréquent et surtout difficilement prévisible : la gestion en période de crue est donc une décision prise sur le champ, et ne peut entrer dans le cades de commandes "moyennes".

Bien souvent la gestion d'une crue est donc traitée préalablement à la gestion d'ensemble des ouvrages.Typiquement, le problème est le suivant : pour un niveau initial du réservoir et un hydrogramme des débits amonts donnés, trouver la gestion qui assurera un débit aval inférieur à $d_{sécu}$, débit de sécurité au-delà duquel les installations aval seront endommagées.

Dans certains cas, il est impossible de résoudre le problème (si le réservoir est plein au début et le débit amont toujours supérieur à $d_{sécu}$ par exemple...) : pour un hydrogramme donné, il existe un niveau maximum au-dessus duquel le barrage est incapable d'éviter la crue.

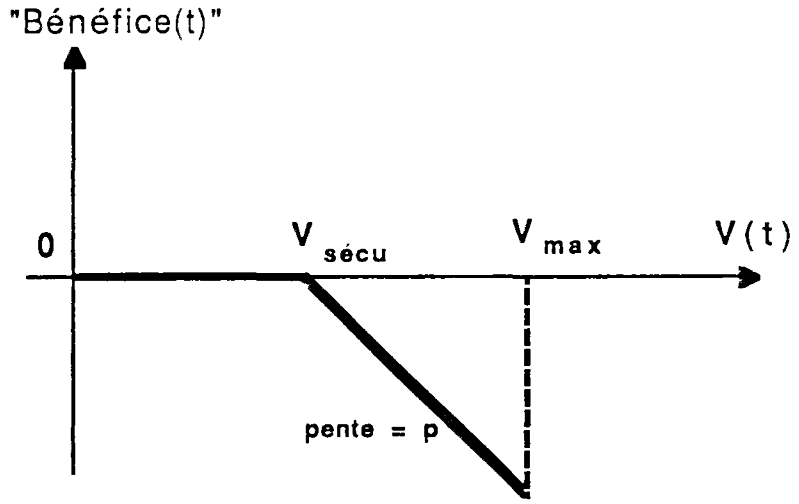
On peut déterminer ce niveau maximum par simulation, en prenant l'hydrogramme des crues de fréquences décennales, centennales, millennales...

Le rôle de la gestion à pas de temps plus long ne sera donc pas de déterminer les consignes en cas de crise, mais de se garantir au maximum contre un dépassement des capacités d'écrêtement du barrage. Une bonne gestion devra donc éviter de se trouver à un niveau trop élevé lorsqu'une crue est probable : c'est le principe du creux preventif. La fonction de coût associée ne devra alors pas porter sur le débit lâché mais sur le niveau du réservoir au début du pas de temps.

Comment se fixer un objectif V ?

Un évènement catastrophique comme une rupture de digue en aval peut difficilement être pris en compte par une fonction économique : on cherche plus à l'interdire qu'à rembourser les dégâts en cas de débordement. Une démarche logique consisterait à introduire une contrainte supplémentaire sur le système : par exemple, imposer une probabilité de débordement aval inférieure à une valeur fixée au préalable, c'est à dire poser $S_{max}(t) = S_{sécu}(t)$ et forcer ainsi une gestion prudente. Toutefois, deux raisons principales s'opposent à cette démarche. D'une part, le système est rendu particulièrement irrégulier de ce fait. De plus, si on pose $S_{max}(t) = S_{sécu}(t)$ et que dans la réalité on passe au dessus du niveau $S_{sécu}(t)$, on n'aura pas de pénalisation correspondant au fait que les normes de sécurité sont dépassées.

Une démarche plus efficace consiste donc à introduire une pénalité économique supplémentaire lorsqu'on se trouve au-dessus de $S_{sécu}(t)$:



fonction objectif de lutte contre les crues

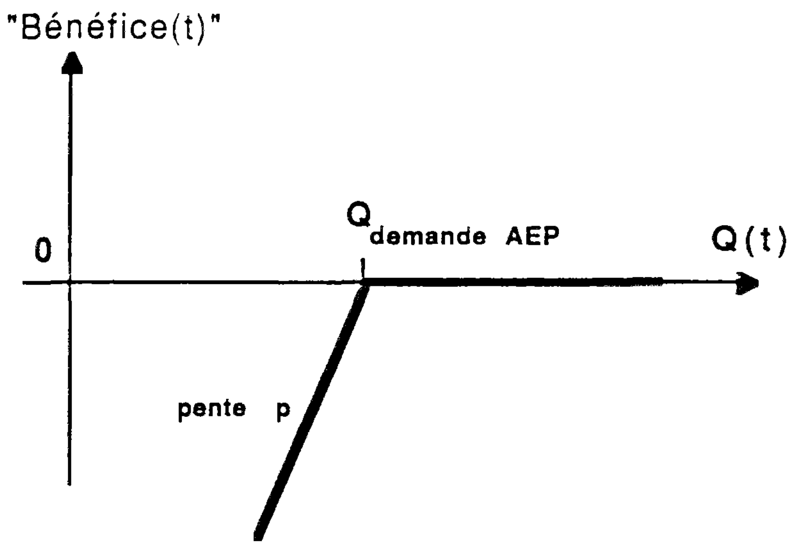
Ainsi, une gestion optimisée évitera de se trouver dans la zone dangereuse. Le problème restant à résoudre est de fixer la pente de la droite pour $S > S_{sécu}(t)$. Ce choix dépend en fait des priorités avec les autres objectifs.

Irrigation et eau potable

Eau potable

On considère généralement que l'apport en eau potable est un besoin vital qu'il faut satisfaire quoi qu'il arrive. C'est pourquoi on pourrait être tenté d'imposer une fourniture minimale (en modifiant U(t), espace des commandes admissibles). Toutefois, pour les mêmes raisons que dans le cas de la protection contre les crues (non pénalisation si la fourniture n'est pas respectée), il vaut mieux mettre une pénalité tres lourde à un manque de fourniture afin de forcer l'optimisation à l'assurer au mieux.

La fonction objectif limite pourrait donc être :

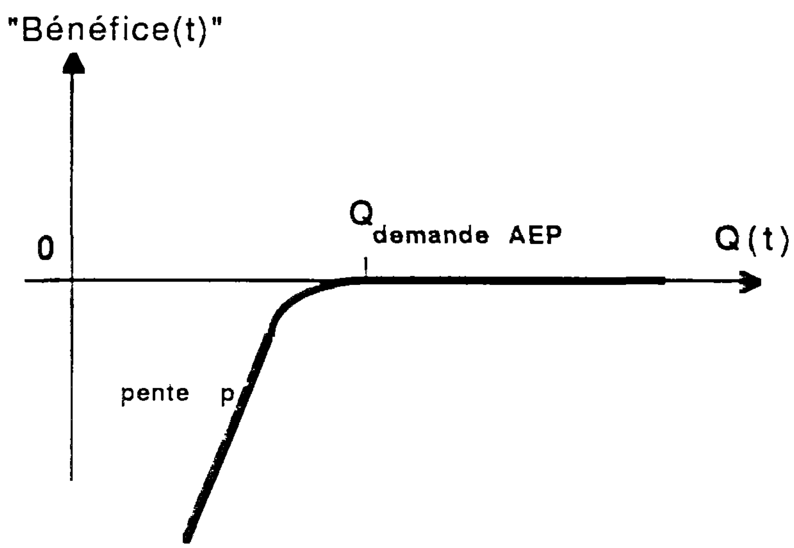


fonction objectif demande AEP

avec une pente $p \rightarrow \infty$

En fait, la rupture ne doit pas être aussi brutale. On peut sans dommage diminuer la quantité d'eau fournie de 10 %. Il convient à ce propos de se rappeler que les besoins dits d'eau potable sont incomparablement plus élevés dans les pays industrialisés que les stricts besoins de l'alimentation et de l'hygiène.

La fonction objectif choisie sera donc de la forme :

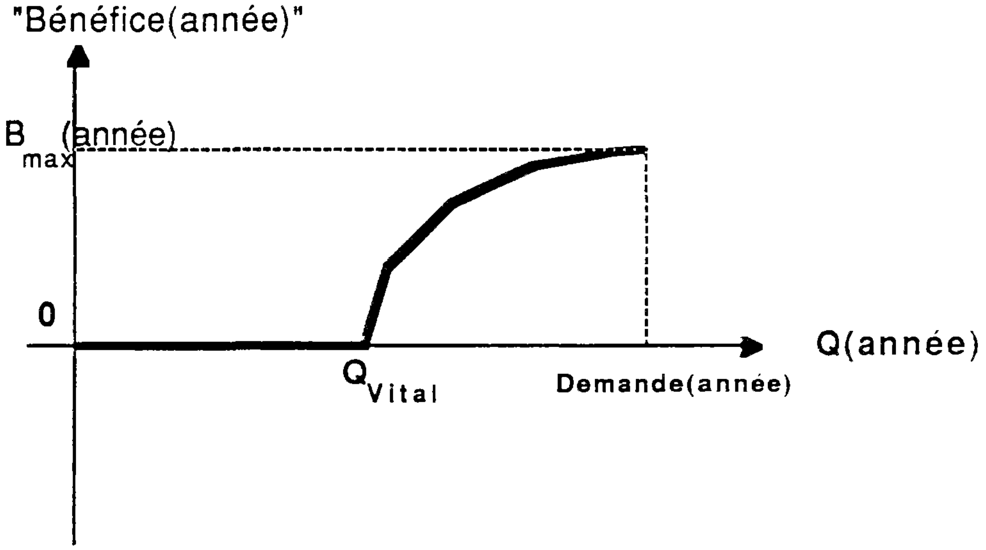


nouvelle fonction objectif demande AEP

Irrigation

Le problème est analogue à celui de l'alimentation en eau potable.

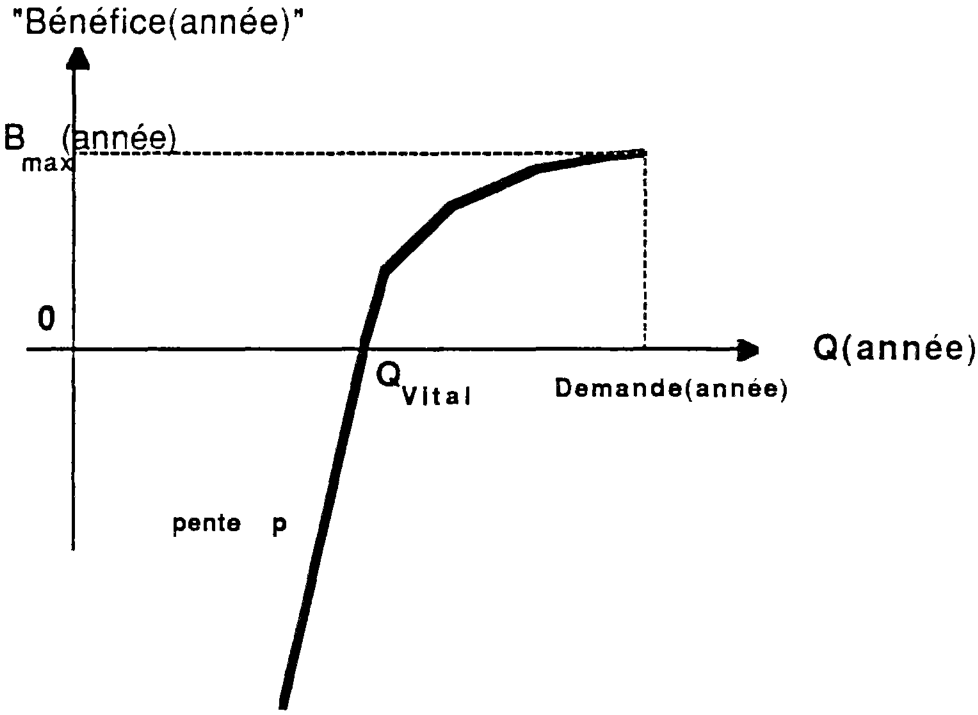
Si on suppose la nature et la quantité de plantation identiques d'une année sur l'autre, on peut définir une valeur ajoutée agricole pour un volume d'eau fourni au cours de l'année. Grossièrement, cette valeur ajoutée est le prix de la récolte que l'on peut obtenir à partir de cette eau délivrée, moins le prix des intrants :



Prix de la récolte

Q_{vital} est la quantité d'eau au-dessous de laquelle la récolte est perdue : le gain - ou plutôt la perte - est constant pour $Q < Q_{vital}$. Pour $Q > Q_{vital}$, la valeur ajoutée est une fonction convexe de Q : utilité marginale de l'eau diminue lorsqu'on approche de la fourniture maximale.

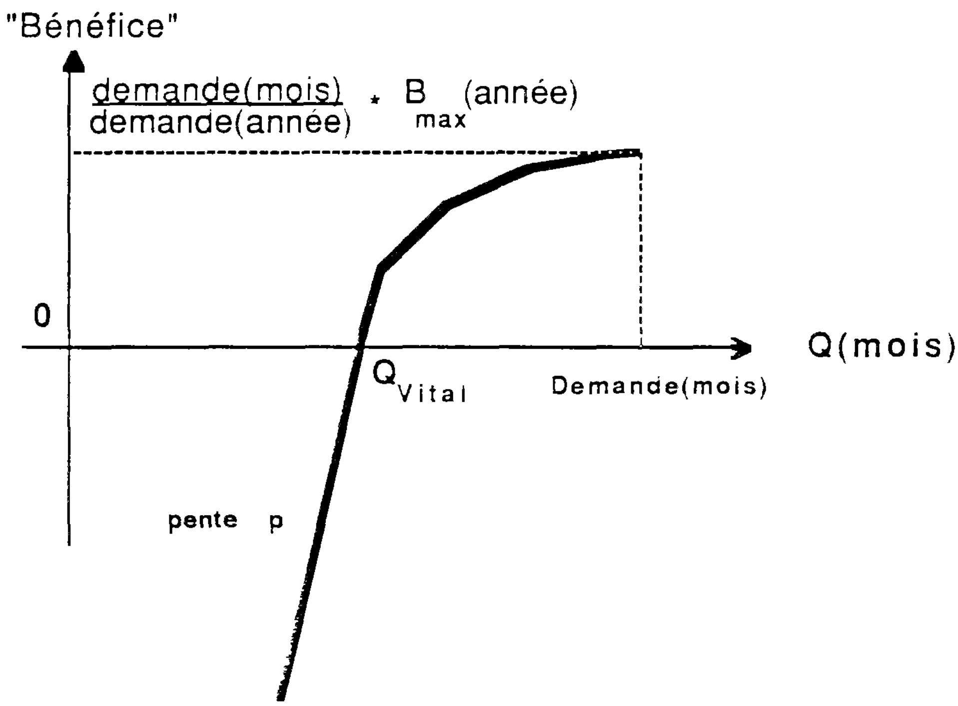
Nous modifierons cette courbe suivant la même démarche que précédemment : considérant qu'il faut à tout prix ne pas passer en-dessous de Q_{vital}, nous remplacerons la partie stationnaire de la courbe par une droite à forte pente



fonction objectif irrigation (annuel)

On définit également la répartition mensuelle de la demande en eau d'irrigation Demande(mois), qui est la quantité d'eau dont on a besoin chaque mois dans le cas d'une irrigation idéale. Nous pouvons, à partir de cette répartition, définir une fonction objectif élémentaire pour chaque mois, en considérant que la valeur ajoutée maximale au cours du mois vaut :

$$V.A._{max}(an)*demande(mois)/demande(an).$$



fonction objectif irrigation (mensuel)

Nous avons donc séparé la fonction objectif. Cette séparation peut sembler arbitraire. Elle est toutefois partiellement justifiée (dans le cas déterministe) par la considération suivante :

Supposons que nous ayons un stock valant α fois la demande annuelle ($\alpha < 1$) dont nous pouvons disposer à notre guise durant l'année et le répartir entre les mois comme bon nous semble. L'optimisation de cette répartition conduira à des quantités fournies chaque mois telles que : utilité marginale de l'eau soit la même pour tous les mois et donc à une fourniture α*demande(mois) et une valorisation annuelle $B(\alpha$*demande(an)$)$, correspondant bien à la valeur ajoutée initiale.

On a supposé que la demande est la même chaque année, c'est à dire que plantations et semailles sont toujours les mêmes. Or, ce n'est pas le cas : par exemple, si on s'attend à une année à faibles apports et que le niveau du réservoir est bas au moment où on lance la campagne, on limitera le plan de culture.

On en vient donc à définir la fonction objectif agricole comme une fonction de deux variables : la récolte programmée et la quantité d'eau fournie, la première de ces variables devenant un paramètre de commande du système.

KRZYSZTOFOWICZ (1982) propose une étude de cette fonction sous forme continue en termes de valeur agricole et d'aversion face au risque.

Comment prend-on en compte la cohérence dans le temps des irrigations ? En effet, on peut considérer à juste titre que l'irrigation continue tant qu'elle est possible, et s'interrompt, soit quand elle n'est plus nécessaire (objectif atteint), soit avant (et il y a alors perte d'une partie de la production potentielle), mais n'est pas susceptible de reprendre après avoir été interrompue.

Supposons, par exemple, que la décision soit tout ou rien. Une fonction de coût séparable a-t-elle alors un sens ?

Soit D(t) la demande et P(t) le prélèvement.

Considérons la variable binaire I(t). Elle traduit l'attitude des irrigants par la règle suivante : "Si I(t) =1 alors P = D sinon P = 0 ". P(t)= I(t) D(t)

Cette variable I(t) prendra la valeur 1 ou 0 selon que l'irrigation peut être satisfaite ou non à la période t.

Soient t_0 et t_1 les dates de début et de fin normales de la période d'irrigation.

Pour $t > t_1$ $I(t) = 0$

pour $t < t_0$ $I(t) = 0$

Si on adopte la règle de fonctionnement qui, en cas de suspension des irrigations à la date t antérieure à t_1, considère que la saison d'irrigation est alors définitivement terminée, on impose la contrainte :

$$I(t+1) \leq I(t) \quad \text{pour tout } t$$

On peut alors par exemple chercher à réaliser un objectif du type :

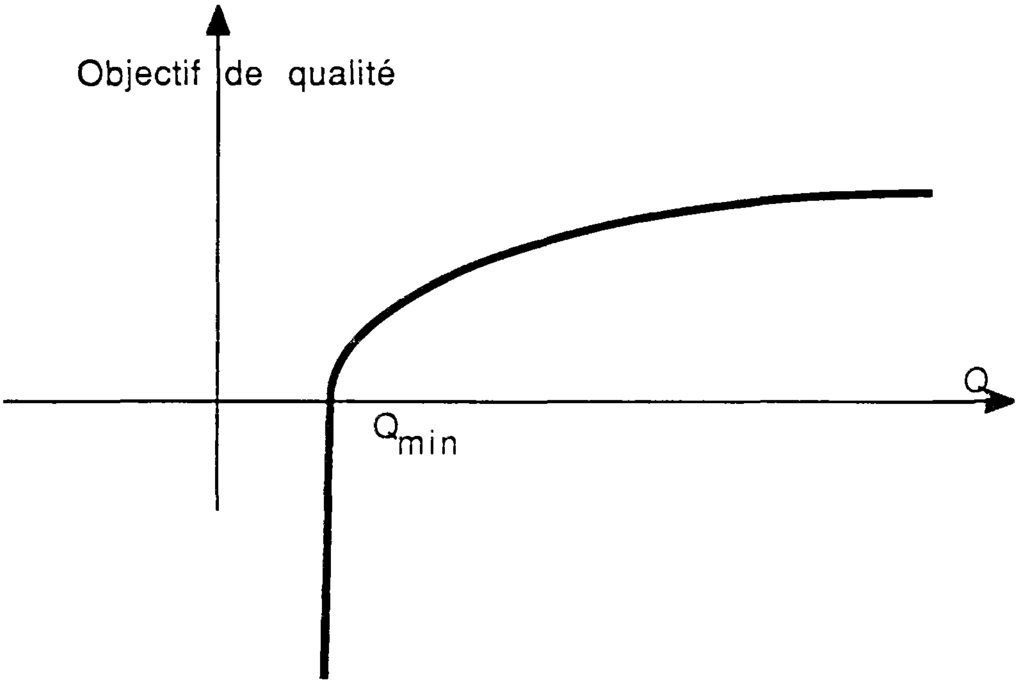
$$\text{Maximiser} \quad V(t) = E \left\{ \sum_{t=1}^{T} I(t) \right\}$$

ce qui revient à chercher le maximum de la durée moyenne des irrigations.

C'est donc plutôt par l'introduction d'une nouvelle variable décrivant le fonctionnement du système et prenant en compte les persistances, que par la remise en cause du caractère additif des coûts, que l'on résout ce type de problème.

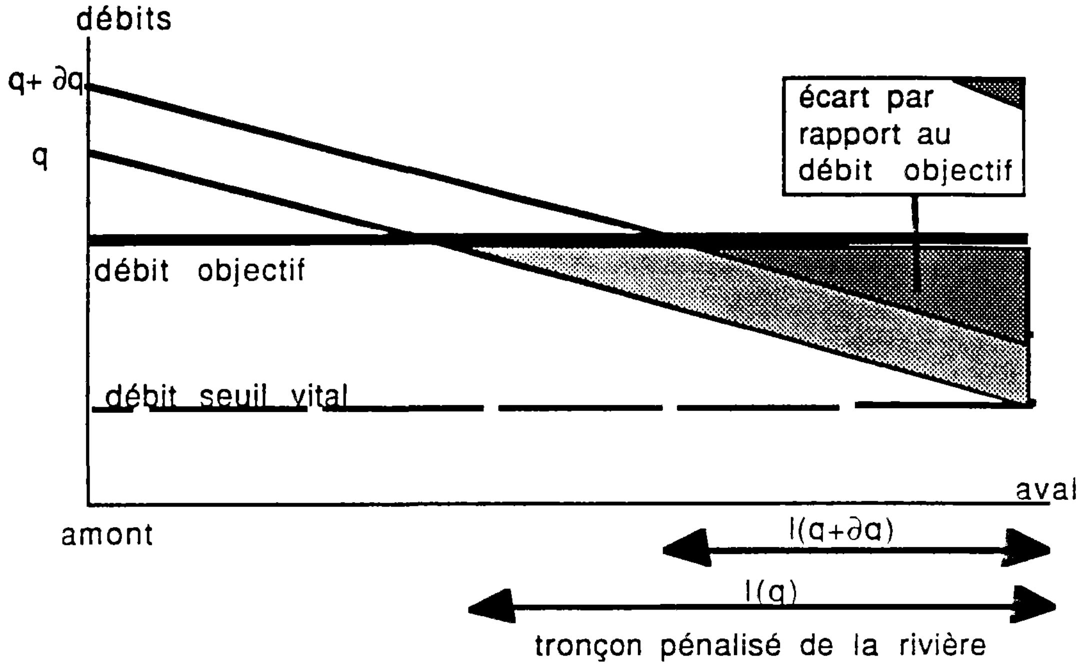
Qualité des eaux

On peut *a priori* raisonner de façon simple à partir d'une donnée d'objectif de qualité.



fonction objectif -qualité

On peut également raisonner de façon analogue aux consommations et c'est sans doute préférable. On fixe un débit seuil et un débit objectif.



Autre fonction objectif-qualité

On peut alors analyser la longueur du tronçon de rivière concernée par le passage en-dessous de l'objectif ou du seuil, et en se référant par exemple au volume d'eau ainsi défini, évaluer la quantité d'eau allouée dans des conditions défavorables.

Bien entendu, on peut enfin utiliser les résultats de modèles de simulation de la qualité des eaux pour définir, en fonction du débit, par exemple la longueur du tronçon en anoxie ou identifier les conditions dans lesquelles des prises d'eau importantes sont touchées.

La production hydroélectrique

(d'après B..FAUCHET, 1988)

Estimation de l'énergie produite

Pour cette utilisation, la valorisation se fait par l'intermédiaire d'une variable supplémentaire : l'énergie produite.

Pour un barrage donné, la puissance L est une fonction

$L(h,d)$ — h : hauteur d'eau dans le réservoir
d : débit lâché.

Soit P la durée d'un pas de temps, par exemple P = 1 unité de temps, le gain V dû à l'hydroélectricité s'écrit sous la forme de l'énergie V produite entre t -1 et t :

$$V = \int_{t-1}^{t} L(h(\tau)\ d(\tau))\ d\tau$$

h est une fonction explicite de S (volume du stock dans le réservoir), donnée par la courbe hauteur - surface - volume du réservoir. S(t) dépend des apports et des lâchers entre t -1 et t. Calculer explicitement h entre t -1 et t est assez compliqué. Afin de simplifier le problème, on considère que h varie peu et est donc égale à :

$$\frac{h(S(t-1)) + h(S(t))}{2}$$

De même, on considère que d varie peu et est égal au débit moyen durant cette période :

$$d(t) = \frac{Q}{P}$$

Q est le débit lâché durant la durée P correspondant à un pas de temps.

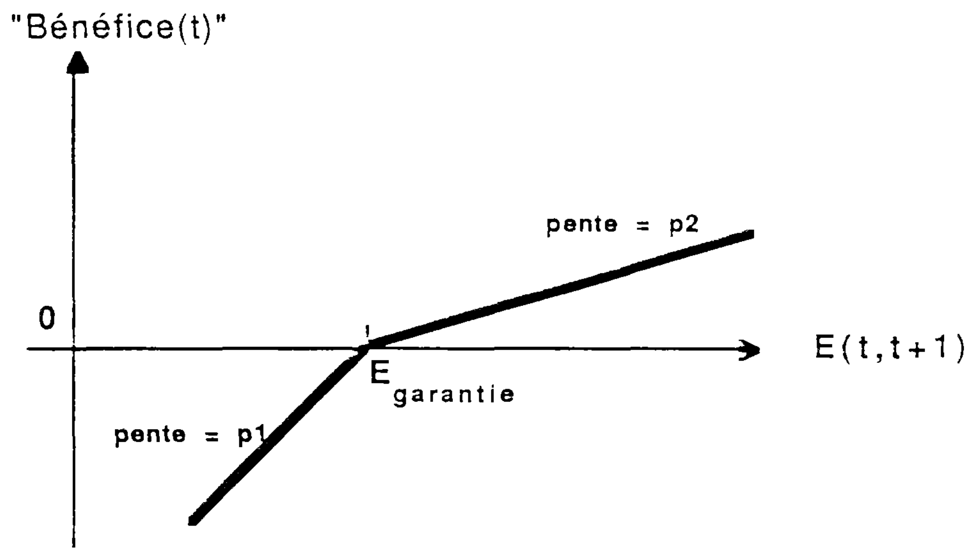
On a ainsi :

$$V = P\,L\left(\frac{h(S(t-1)) + h(S(t))}{2}, \frac{Q}{P}\right)$$

Energie garantie et excédentaire

Un barrage produisant de l'énergie est généralement prévu pour fournir une quantité fixée à l'avance par les caractéristiques physiques du site (puissance des turbines, hauteur du barrage, apports moyens amonts). Cette énergie, appelée énergie de base ou énergie garantie est celle que le concepteur s'engage à fournir quotidiennement au réseau local. Elle peut dépendre du temps, aussi bien à l'échelle de la journée qu'à celle de l'année.

Supposons qu'à tout instant t, on connaisse l'énergie garantie entre t et t+1. La fonction économique associée à la production énergétique entre t et t+1 aura alors typiquement la forme suivante :



fonction objectif Energie

Le prix accordé à l'électricité est beaucoup plus important lorsqu'on se trouve en dessous qu'au dessus de $E_{garantie}$: ne pas remplir un contrat coûte plus cher que de le dépasser.

La fonction économique est généralement fournie par EDF qui insère le barrage dans le réseau.

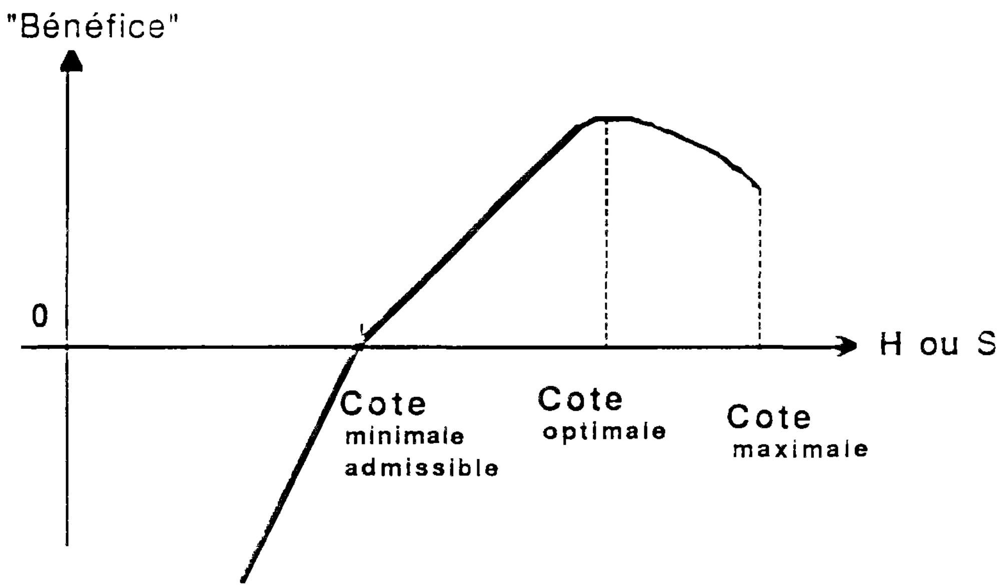
Répartition horaire

Selon l'heure, la demande en électricité est fortement variable, avec généralement un pic aux alentours de 20 heures. Il en est de même pour la demande en eau pour l'agriculture. Malheureusement, ces répartitions sont fort différentes puisque celle-ci possède un pic durant la journée. Toutefois, les barrages possèdent généralement un bassin de compensation en aval de la retenue. Ainsi, l'eau turbinée le soir pourra être distribuée le lendemain pour l'agriculture et toute l'eau lâchée aura été turbinée.

On a également une variation journalière de la demande : en fin de semaine, la demande est nettement moins importante. Ainsi, certains aménagements hydroélectriques tels l'aménagement de GrandMaison/le Verney mettent à profit cette variabilité : durant le week-end, de l'eau est pompée de la retenue aval du Verney vers la retenue amont de GrandMaison en utilisant l'énergie excédentaire (donc peu coûteuse) des centrales nucléaires voisines et est turbinée durant la semaine pour faire face à la demande industrielle. Bien que déficitaire énergétiquement, cet aménagement dégage des bénéfices car il sert de régulateur aux centrales thermiques nucléaires dont la production est peu variable à court terme.

Mise en valeur touristique

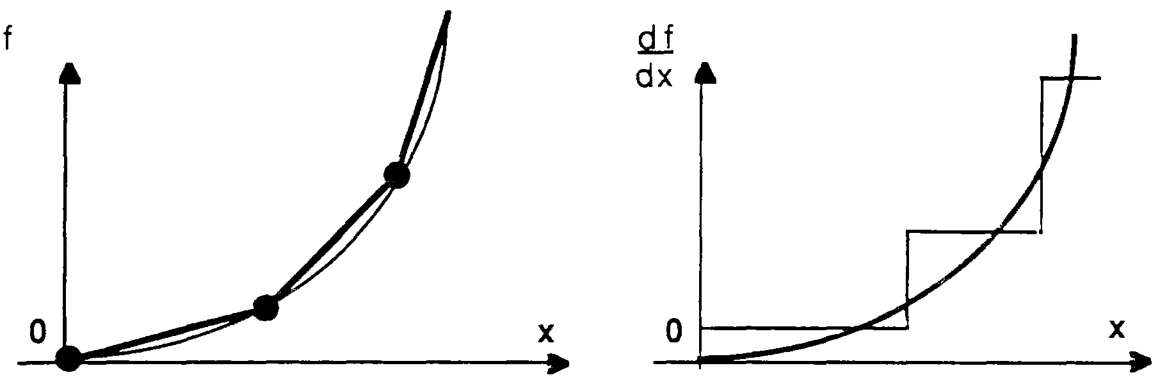
C'est bien entendu en fonction du niveau de l'eau dans le réservoir et de la date dans l'année que doit être évaluée la fonction de coût. Une fonction du type suivant peut être proposée.



fonction objectif tourisme

Choix de la forme des fonctions de coût

Il est certain que pour beaucoup des types d'objectifs décrits ci-dessus, une certaine latitude subsiste quant à la forme de la fonction de coût utilisée pour le représenter. Mais paradoxalement en apparence, il serait erroné de penser que ce choix est indifférent. Les résultats d'une méthode d'optimisation, et le choix même de la méthode en dépendent étroitement. En particulier, la linéarisation n'est pas une opération anodine. Entre une fonction de coût régulière f et une approximation linéaire par morceaux, il y a une grande différence.



.forme de la fonction objectif

En effet, ce sont les coûts marginaux (autrement dit les valeurs de la dérivée de la fonction de coût) que les programmes d'optimisation "équilibrent". Un coût linéaire par morceaux traduit donc un objectif où la valeur marginale ne change pas sur toute une plage de valeur. Cela conduit à une solution optimale qui se trouve à l'une ou à l'autre des extrémités de l'intervalle. Pour des variations assez faibles des autres paramètres, la règle de gestion sautera donc d'une position à une autre de façon relativement brutale.

Une fonction régulière ne présentera évidemment pas ce type de conséquences.
De façon plus générale, même si cela peut sembler artificiel, il convient souvent, dans le domaine de variation des variables où les objectifs sont entièrement satisfaits, et où l'on construirait donc une fonction de coût indifférente (constante, c'est à dire à coût marginal nul), d'ajouter un coût très faible, de façon à éviter des situations d'indétermination inutiles.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 6

Gestion du risque et
courbe de remplissage de la Seine.

DECEMBRE 91

E. PARENT

Courbe objectif de remplissage par compromis entre deux risques

La mise au point effective de la courbe objectif de gestion du barrage SEINE s'est faite par de très nombreux essais de simulation, dont la mémoire n'a d'ailleurs pas été conservée. Nous allons rapidement voir comment dégrossir le problème, s'il se posait aujourd'hui.

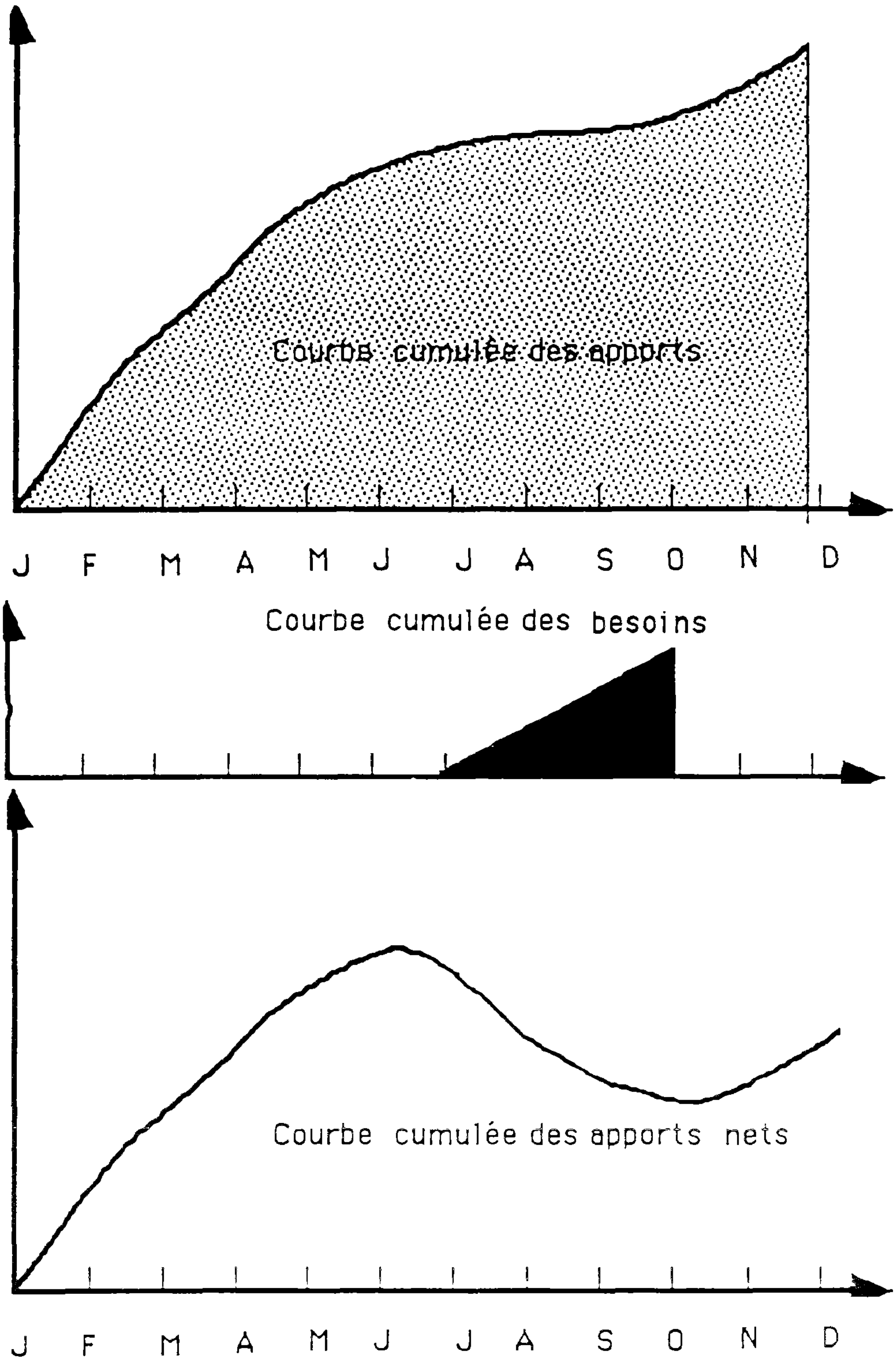
Un logiciel d'enseignement assisté par ordinateur developpé au CERGRENE (J P VERMERSCH, 1987) et fonctionnant sur micro-ordinateur compatible IBM PC-XT a été utilisé pour réaliser les principales étapes du travail exposé ci-après.

Quel pas de temps choisir ?

Pour le problème qui nous intéresse : dimensionner la réserve, proposer une gestion et en tester les performances, le pas de temps mensuel suffit pour représenter la demande et fixer les objectifs de gestion, tandis que le test des performances se fera au pas de temps décadaire, la gestion en période de crue au pas de temps journalier, et le contrôle-commande des asservissements avec un pas de temps inférieur à l'heure.

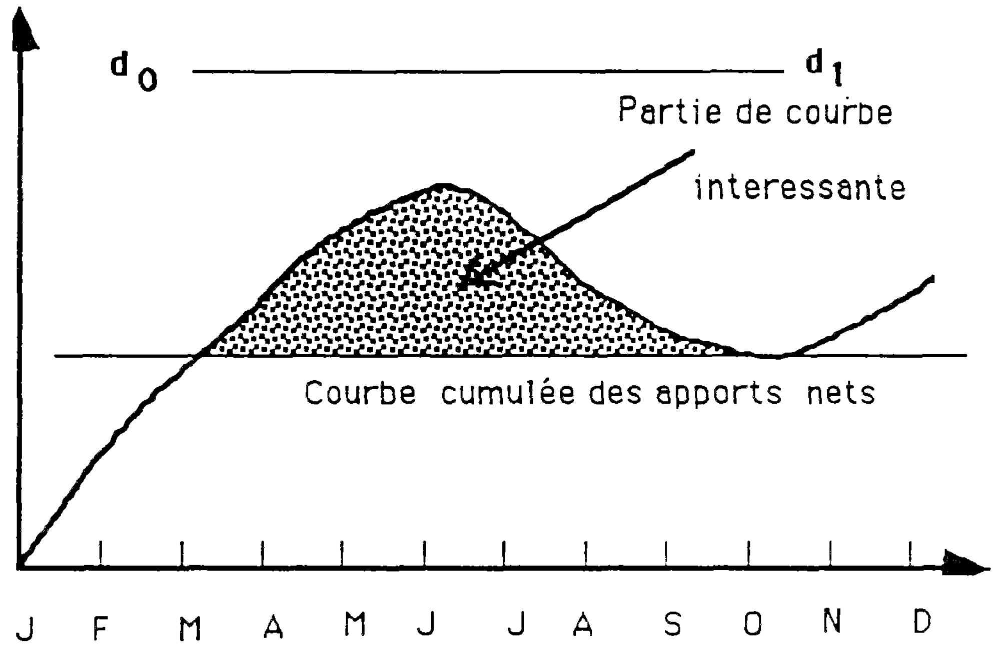
Détermination de la courbe d'objectif de l'ouvrage relative à la demande

Supposons qu'il faille fournir 18 m^3/s de Juillet à Octobre avec une probabilité de défaillance inférieure à une année sur dix. On peut utiliser la démarche du CEMAGREF introduite par E. COLIN et améliorée par T. LEVIANDER, puis C. MICHEL et A. THOMAS (1978). Prenons une année quelconque de débits au pas de temps mensuel. On soustrait la courbe des besoins cumulés de la courbe des apports cumulés pour obtenir la courbe des apports nets sur une année; on voit donc la courbe augmenter au printemps, décroître en été (où les besoins sont supérieurs aux apports) puis croître ensuite de nouveau en hiver lorsque les apports dépassent les besoins à partir de la date d_1



Tracé de la courbe des apports cumulés pour une annee

Pour satisfaire au mieux la demande pour cette année particulière, le barrage doit donc avoir une capacité V tandis que le remplissage débute à la date d_0 et la vidange se termine à la date d_1. La meilleure gestion suivra la courbe dite de remplissage entre les abscisses d_0 et d_1 pour cette année de débits (voir schéma ci-après)



Courbe de remplissage pour une année particulière

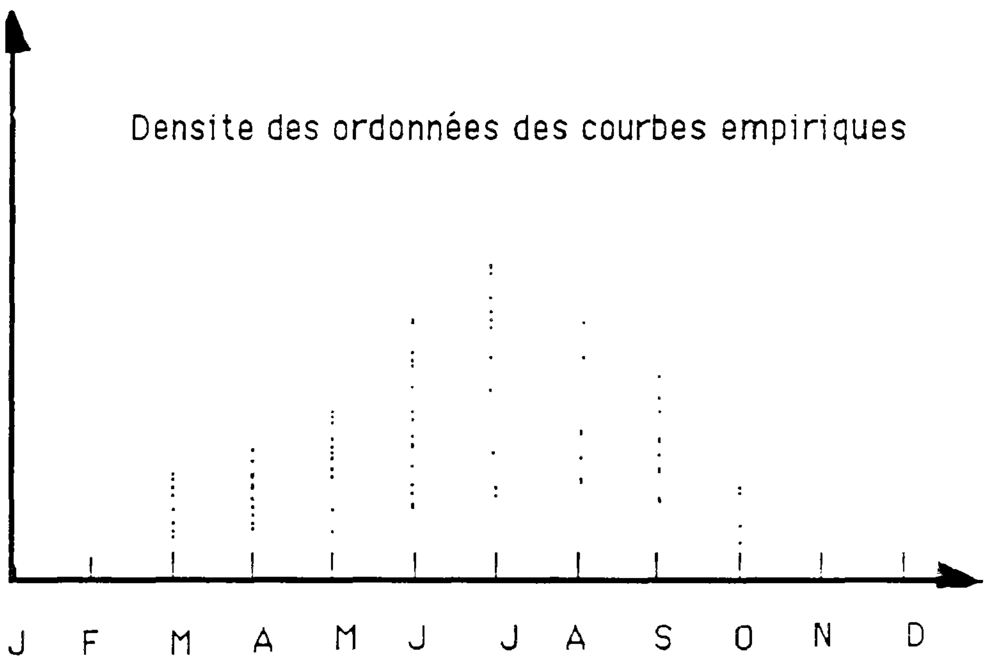
On peut tracer autant de courbes de remplissage que d'années de données dont on dispose:

Diverses courbes de remplissage

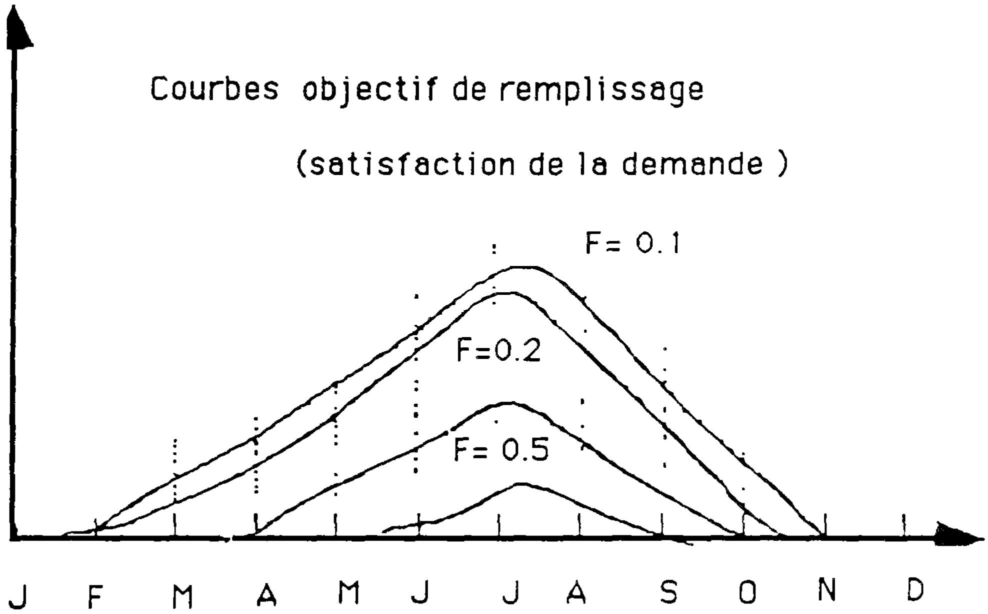
En considérant mois par mois les diverses données des courbes de remplissage ainsi calculées, on obtient la distribution empirique des fréquences des ordonnées mensuelles de ces courbes.

On peut ainsi tracer, en réunissant pour tous les mois le même fractile α, des courbes empiriques de non dépassement d'objectif de remplissage. Sur la courbe de non dépassement $\alpha = 1/10$ on a ainsi, chaque mois, une chance sur dix que les réserves ne puissent suffire à satisfaire la demande , si on ne fait aucune manœuvre pour anticiper cette demande (politique standard).

Cette démarche très simple néglige évidemment les dépendances temporelles entre les pas de temps : elle ne peut être envisagée que comme une approximation, et pour des pas de temps de l'ordre du mois.



Répartition empirique des ordonnées des courbes de remplissage



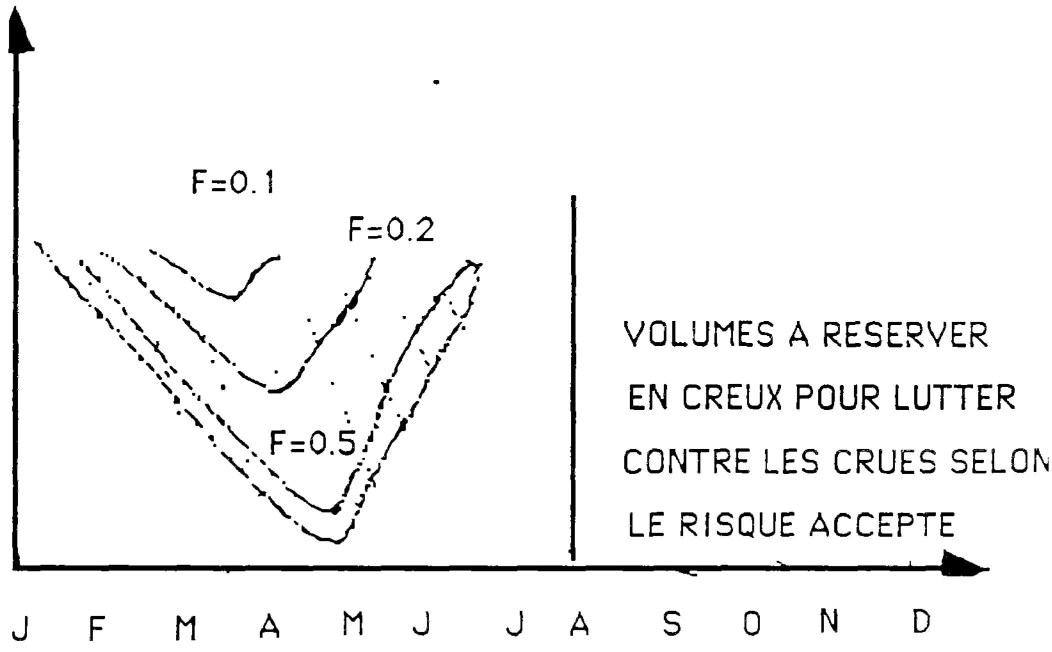
Répartition empirique des ordonnées des courbes de remplissage

Pour la Seine, avec une demande supposée constante et égale à 18 m^3/s de Juillet à Octobre et un débit réservé de 5 m^3/s, on a les valeurs suivantes obtenues à l'aide d'une chronique de 30 années :

Début d_0 du remplissage	Fréquence de non dépassement	Volume max de la réserve
0	165 Mm^3	Nov
0,1	160	Déc
0,2	152	Janv
0,3	140	Fév

Détermination des réserves de l'ouvrage vis-à-vis de la protection contre les crues

En utilisant le même principe, on peut trouver les creux à réserver en retenue pour pouvoir écrêter à un seuil donné avec un risque d'insuccès $\alpha_{\sim}$ (voir ci après les fractiles correspondants).



Risques en crues

Si on considère un seuil de crue de 40 m^3/s, on a les valeurs suivantes obtenues sur l'historique des 30 ans :

Pourcentage de crues écrêtées	Creux à réserver	Date
100 %	217 Millions de m^3	Janv
90%	150	Janv
80 %	100	Fév
70 %	60	Fév

Si on porte le seuil à 55 m^3/s, on obtient les valeurs suivantes :

100 %	177 Mm^3	Janv
90 %	110	Janv
80 %	70	Fév
70 %	40	Fév

Simulation de la gestion de l'ouvrage en soutien d'étiage et en écrêtement des crues

En rassemblant les résultats des deux approches précédentes, on peut simuler la gestion du barrage et en tester les performances. Le programme précédent, développé sur un compatible IBM-PC, effectue ce travail très simplement par simulation au pas de temps décadaire : en période de crue, il essaie d'écrêter au seuil fixé tant que possible, en période de soutien d'étiage il tente de fournir la demande, le reste du temps il suit la courbe objectif que l'on s'est fixée. Celle-ci est obtenue de la façon suivante : on utilise la courbe de remplissage fournie par la méthode pour satisfaire la demande, associée à un risque α_1 donné de défaillance, on la décale vers le bas en début de saison pour réserver une tranche de lutte contre les crues associée à un risque α_2 de non écrêtement, on la décale ensuite en fin de saison pour se ménager éventuellement une tranche de report interannuel.

La simulation compte le nombre de défaillances en crue (barrage plein ne pouvant plus écrêter) et le nombre de défaillances en étiage (barrage vidé prématurément, demande non satisfaite, débit réservé non respecté). Celle-ci est nécessaire, car, contrairement à l'approximation faite pour établir les risques α_1 et α_2, les débits sont corrélés d'un pas de temps sur l'autre et les défaillances sur les crues et sur les étiages sont liées : à taille de réservoir fixée, il faut réaliser un compromis (en terme de risque) sur la satisfaction de ces deux objectifs.

On présenteensuite trois résultats de simulation.

Exemples de simulations de la gestion du barrage projeté Seine

* Exemple 1 :

OBJECTIFS : - Demande en eau (Juillet-Octobre) : 18 m^3/s
- Ecrêtement des débits supérieurs à 40 m^3/s

CONTRAINTE : - Débit réservé de 5 m^3/s

OUVRAGE :
- Stock maximal de 205 Mm^3
- Tranche interannuelle : 0 M m^3/s
- Stock assigné demande : 160 M m^3/s $\alpha_1 = 0.1$
- Stock assigné écrêtement : 45 M m^3/s $\alpha_2 = 0,35$

Le choix de dimensionnement conduit aux probabilités annuelles :

- Défaillance sur la demande : 29 %
- Défaillance sur l'écrêtement : 29 %

On voit donc que le risque de crue *a priori* avait été surévalué, tandis que le risque en étiage était sous-évalué.

* Exemple 2 :

On ajoute une tranche interannuelle et on augmente la capacité.

OBJECTIFS : - Demande en eau (Juillet-Octobre) : 18 m^3/s
- Ecrêtement des débits supérieurs à 40 m^3/s

CONTRAINTES : - Débit réservé de 5 m^3/s

OUVRAGE : - Stock maximal de 215 Mm^3

- Tranche interannuelle de 5 Mm^3
- Stock assigné demande : 160 Mm^3 $\alpha_1 = 0,1$
- Stock assigné écrêtement : 50 Mm^3 $\alpha_2 = 0,30$

Le choix de dimensionnement conduit aux probabilités annuelles :

- Défaillance sur la demande : 16,1%
- Défaillance sur l'écrêtement : 29 %

La tranche interannuelle permet d'améliorer la satisfaction de la demande sans augmenter le risque en période d'écrêtement.

* Exemple 3 :

On est moins strict sur les crues.

OBJECTIFS : - Demande en eau (Juillet-Octobre) : 18 m^3/s
- Ecrêtement des débits supérieurs à 55 m^3/s

CONTRAINTE : - Débit réservé de 5 m^3/s

OUVRAGE : - Stock maximal de 215 Mm^3
- Tranche interannuelle : 5 Mm^3
- Stock assigné demande : 160 Mm^3 $\alpha_1 = 0,1$
- Stock assigné écrêtement : 50 Mm^3 $\alpha_2 = 0,25$

Le choix de dimensionnement conduit aux probabilités annuelles :

- Défaillance sur la demande : 19,4 %
- Défaillance sur l'écrêtement : 9,7 %

On voit bien sur cet exemple, que les objectifs sont liés et que les risques interagissent l'un sur l'autre.

Faute d'un critère unique à optimiser, il faut se satisfaire d'un compromis. En général, quand on améliore l'indice de performance sur les crues, on diminue celui correspondant à la demande. La solution obtenue ici paraît acceptable. On verra dans la partie suivante comment prendre en compte l'aspect multi-objectifs.

Conclusions

La méthode présentée ci-dessus est représentative de la philosophie des méthodes de simulation.

Dans une première phase, à un pas de temps grossier (mensuel), on estime de façon indépendante les tranches réservées à chacun des objectifs et les risques de défaillance associés α_1 et α_2. On fait à cette étape des hypothèses simplificatrices (apports indépendants) et le principe de la méthode est celui du calcul du réservoir idéal par la méthode des apports cumulés (RIPPL, 1883).

Dans une deuxième phase, on affine le pas de temps pour effectuer une simulation décade par décade à partir des valeurs initialisées par la phase 1. On estime alors mieux les performances.

La troisième étape consiste à "boucler". On modifie les paramètres du modèle jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

Néanmoins, cette analyse est rudimentaire. En effet, on ne considère que le système de barrage en lui-même avec deux objectifs. Seul l'aspect quantitatif est ici pris en compte. On travaille toujours sur la même série historique. Les impacts du barrage ne sont pas modélisés. On a choisi un type de gestion très particulier et simplifié considérablement les choix possibles : en cela, on est encore loin de la meilleure solution qui s'obtiendrait en retouchant la courbe de remplissage point par point. Enfin, les possibilités de prévision ne sont pas exploitées.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 7

Un exemple de gestion paramétrée de la Seine.

DECEMBRE 91

E. PARENT

Mise au point d'une gestion paramétrée

L'exemple qui suit montre, de façon volontairement simplifiée, comment on peut faire une gestion simple par un ajustement adéquat des règles de gestion définies *a priori* avec un très petit nombre de paramètres (6 en tout). Cette technique a été proposée par Claude MICHEL et développée pour servir de référence éventuelle à des méthodes plus sophistiquées.

Critère de régulation (fonction de coût)

Pour avoir une indication de l'irrégularité des débits, il suffit de considérer simplement les données journalières ou mensuelles très accessibles.

En général, on considère souhaitable d'intervenir dans les deux situations suivantes :

- le débit q(t) passe en dessous du débit mensuel minimal annuel de fréquence biennale à quinquennale.
Soit q_n une telle valeur.

- le débit q(t) dépasse le débit journalier maximal annuel de fréquence biennale à quinquennale.
Désignons par q_x un tel débit.

Cela signifie que l'on désire intervenir lorsque q(t) est extérieur au segment $[q_n, q_x]$ et qu'en revanche, on juge la situation satisfaisante lorque q(t) appartient à ce segment.

Dans la pratique, on peut raisonner sur des données moyennes sur un pas de temps fixé que nous prendrons comme unité de temps.

La fonction q(t) devient la suite q_i pour i allant de 1 à N.

Dans ces conditions, une mesure de la nuisance liée à l'irrégularité de la ressource est donnée par une fonction croissante de $(q_i - q_x)$ pour tout i tel que $q_i < q_n$. Une fonction quadratique est *a priori* satisfaisante. Pour la période allant de 1 à N, la nuisance due aux crues peut donc être repérée par une quantité du type :

$$\sum_{i=1}^{N}(q_i - q_x)^2 \qquad \text{telle que } q_i \geq q_x$$

et la nuisance due à la rareté de l'eau, par l'expression :

$$\sum_{i=1}^{N}(q_n - q_i)^2 \qquad \text{telle que } q_n \geq q_i$$

Du fait de la différence de valeur économique entre les conséquences des crues et celles des sécheresses, du fait également que les intervalles $(0, q_n)$ et (q_x, ∞) sont très différents, il n'y a aucune raison pour ajouter purement et simplement les deux expressions précitées. Il est donc souhaitable d'introduire un coefficient de passage d'une expression à l'autre. Désignons par C le coefficient multiplicateur de l'expression relative à l'étiage pour pouvoir l'ajouter à celle relative aux crues afin d'obtenir un critère unique de non satisfaction de la série des q_i, que nous noterons X et défini en conséquence par l'expression :

$$N * X^2 = \sum_{\substack{i=1 \\ \text{pour } q_i \geq q_x}}^{N} (q_i - q_x)^2 + C \sum_{\substack{i=1 \\ \text{pour } q_n \geq q_i}}^{N} (q_n - q_i)^2$$

On peut utiliser cette même fonction pour les débits issus de la gestion de l'ouvrage. En la notant Y on a :

$$N * Y^2 = \sum_{\substack{i=1 \\ \text{pour } s_i \geq q_x}}^{N} (s_i - q_x)^2 + C \sum_{\substack{i=1 \\ \text{pour } q_n \geq s_i}}^{N} (q_n - s_i)^2$$

Le but de la gestion est alors de minimiser Y.

Pour avoir une mesure commode du gain lié à la gestion, nous prendrons le nombre G défini par :

$$G = 100 * \left(1 - \frac{Y}{X}\right)$$

G est exprimé en pourcentage : G = 100 signifie que l'on a totalement réussi à supprimer les crues et les étiages dommageables, tandis que G < 0 signifierait que la gestion a aggravé la situation naturelle.

Dans ce qui suit, G représentera notre critère de régulation des débits et mesurera donc le succès de la règle de gestion que l'on aura à appliquer.

Proposition pour une règle simple de gestion

Dans la pratique de la gestion quotidienne, la méconnaissance des écoulements futurs peut conduire à prendre des mesures qui se révèleraient par la suite très maladroites et même, en ce qui concerne les crues, plus dommageables que le respect des écoulements naturels. Cette situation est l'écueil majeur à éviter à tout prix. Un ouvrage passif (c'est à dire, un ouvrage dont les ouvrages d'évacuation ne sont pas modifiés au cours du temps) réalise de façon automatique et fort heureuse cette régulation. On peut imaginer faire au moins aussi bien pour un ouvrage en dérivation comme le barrage SEINE dont on est maître du remplissage.

Cela nous conduit assez naturellement à une règle ne dépendant que de l'état actuel du système c'est à dire du couple (q_i, v_i). Elle pourrait se présenter comme suit :

Notons p_i et r_i le prélèvement et la restitution au pas de temps i:

a) si $q_n \leq q_i \leq q_x$

on garde $v_{i+1} = v_i$ avec $p_i = 0$, $r_i = 0$

b) si $q_i > q_x$

on décide d'intervenir d'autant plus efficacement que la situation est grave, c'est à dire que q_i est grand, et que notre réserve nous le permet, c'est à dire que $(V - v_i)$ est grand. Très simplement, cela peut s'exprimer par :

$$p_i = a_1 (q_i - q_x)^{a_2} (V - v_i)^{a_3}$$

que l'on peut compléter par les deux contraintes :

$$p_i \leq P , p_i \leq V - v_i \text{ et aussi } p_i \leq q_i - q_x$$

et bien évidemment : $r_i = 0$

c) si $q_i < q_n$

l'intervention devra être d'autant plus efficace que l'étiage est sévère et que la réserve en eau est élevée. D'où naturellement, une règle de la forme :

$$r_i = b_1 (q_n - q_i)^{b_2} v^{b_3,i}$$

avec les contraintes supplémentaires : $r_i < v_i$ et $r_i < R$ et enfin $p_i = 0$

On obtient ainsi une règle de gestion paramètrée dont il est nécessaire de caler les six paramètres en fonction des données disponibles.

Remarque

On peut simplifier ce schéma en fixant *a priori* les valeurs des exposants. Une règle simplifiée pourrait alors s'exprimer sous la forme :

$$p_i = a (q_i - q_x)^2 (V - v_i)$$

$$r_i = b (q_n - q_i) \sqrt{v_i}$$

avec les mêmes contraintes que précédemment, et seulement deux paramètres à caler.

Test et mise en œuvre de la méthode

La méthode est directement utilisable dès l'instant où les six paramètres, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 ont été calés pour s'adapter au cas spécifique que l'on traite.

Pour ce faire, on peut utiliser la totalité des données disponibles et caler le jeu des six paramètres de façon à minimiser le critère Y (ce qui équivaut à maximiser le gain G). Ceci peut être réalisé par un algorithme du type ROSENBROOCK.

Avant de faire ce calage définitif, il convient d'avoir une idée de la pertinence de la démarche. Pour cela, on partage la série des données disponibles en deux sous-séries de longueurs équivalentes. On détermine le jeu des six paramètres sur la première série de données, conduisant ainsi au gain naturel G_1. Puis on utilise la règle de gestion ainsi définie sur la deuxième sous-série, pour y constater un gain G_2. Si le gain G_2 n'est pas considérablement inférieur à G_1, on peut considérer que la démarche est consistante ou du moins que la durée des observations disponibles est suffisante pour obtenir un calage fiable des paramètres.

Dans la pratique, la mise en œuvre de la méthode diffère quelque peu de la présentation faite au paragraphe précédent.

Deux variantes sont possibles :

a) Caler une règle du type :

$$p_i = a_1 (q_i - q_x)^{a_2} (V - v_i)^{a_3}$$

$$r_i = b_1 (q_n - q_i)^{b_2} v^{b_{3},i}$$

b) Conserver la même règle que plus haut mais en utilisant une prévision $\hat{q}_{i+1}$ de la valeur q_{i+1}

$$p_i = a_1 \left(\hat{q}_{i+1} - q_x\right)^{a_2} (V - v_i)^{a_3}$$

$$r_i = b_1 \left(q_n - \hat{q}_{i+1}\right)^{b_2} v_i^{b_3}$$

Application à la Seine à Bar-Sur-Seine

Bar-Sur-Seine se trouve en amont de Troyes et contrôle le haut bassin de la Seine d'une superficie de 2340 km^2.

On s'est fixé un pas de temps de 10 jours et l'on a utilisé les caractéristiques du barrage Seine :

Volume utilisable : $V = 200$ millions de m^3
Canal d'amenée : $P = 180 \ m^3/s$
Canal de restitution : $R = 35 \ m^3/s$
Coefficient d'harmonisation crue-étiage : $C = 10$

Dans l'exemple ci-après on a pris :

$$q_n = 15 \ m^3/s$$

$$q_x = 30 \ m^3/s$$

Le calage de la méthode a été réalisé sur la période 1955-1964 et il a abouti aux valeurs suivantes des paramètres :

log a1 = - 7,4 log a2 = 0,85 log a3 = - 0,2

log b1 = - 2,0 log b2 = 0,20 log b3 = - 0,95

Le gain G_1 s'est élevé à 34 %.

L'utilisation de la règle ainsi définie a été réalisée sur la période 1975-1980 et a conduit à un gain $G_2 = 30$ %. Dans les deux cas, le niveau initial du réservoir a été fixé à 20 % de la capacité maximale.
Les résultats apparaissent sur la figure ci après

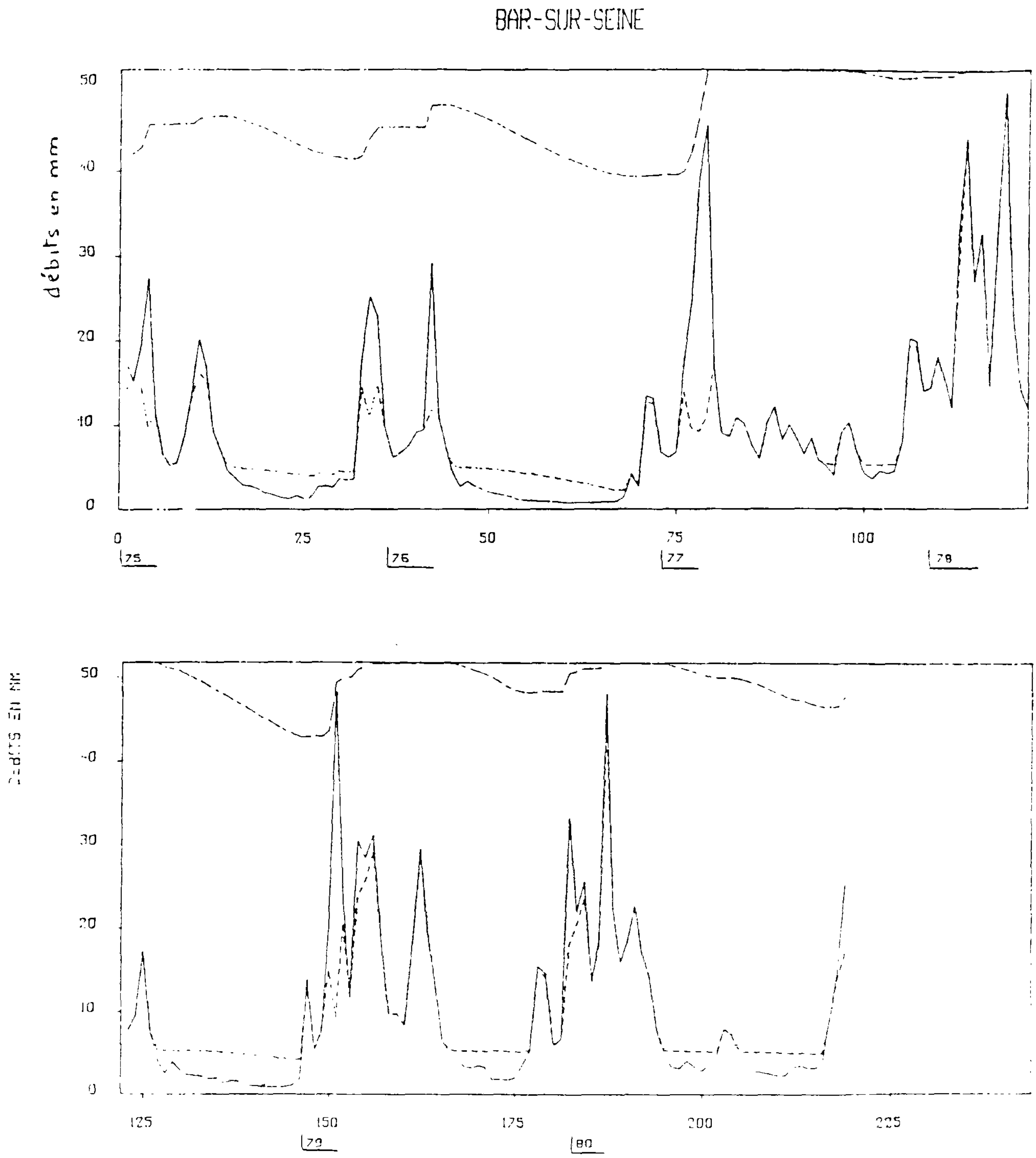
On voit sur les graphiques que l'on aurait intérêt à agir avant que q_i ne sorte de la fourchette [q_n, q_x]. Le réservoir ne se vide pas pendant l'été 1977 car l'étiage n'a pas été sévère, ce qui empêche tout écrêtement en 1978. On pourrait prendre un débit objectif tel que le module q et choisir des règles telles que :

$$p_i = a_1 \left(\bar{q}_{i+1} - q_x\right)^{a_2} \left(V - v_i\right)^{a_3}$$

$$r_i = b_1 \left(q_n - \bar{q}_{i+1}\right)^{b_2} v_i^{b_3}$$

Conclusion

La méthode décrite ci-dessus a le mérite de ne nécessiter le calage que d'un très petit nombre de paramètres. L'application faite sur le bassin de la Seine à Bar-sur-Seine montre sa consistance et justifie que l'on s'y intéresse en y apportant encore des améliorations.



——————— débits naturels q
- - - - - - débits influencé s
— — — — évolution du niveau du réservoir v

application de la méthode paramétrée.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 8

Méthode des scénarios sur un exemple simple.

DECEMBRE 91

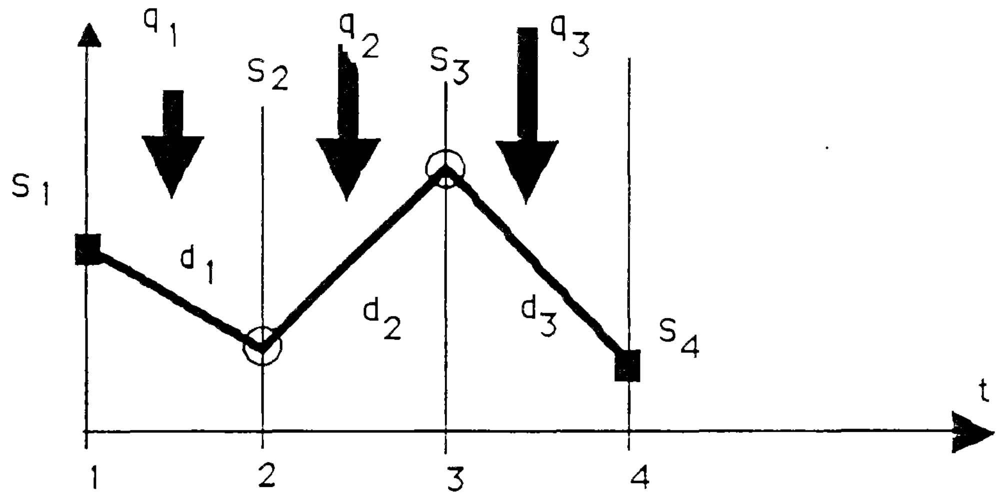
E. PARENT

PROGRAMMATION DYNAMIQUE EN AVENIR INCERTAIN ET PROGRAMMATION DYNAMIQUE PAR METHODE DES SCENARIOS.

1) Hypothèses et cadre du problème

Nous développons un exemple traité à la fois par la programmation dynamique dans l'incertain et par la méthode des scénarios, afin de mettre en lumière les différences entre ces deux méthodes. On envisage le problème suivant :

Il s'agit d'un problème à trois pas de temps où l'on désire passer d'un stock S_1 à un stock S_4



d_t désigne le lacher pour la période **t**, q_t représente l'apport à la réserve durant la période **t**, l'équation de transition d'état s'écrit :

$$S_{t+1} = S_t + q_t - d_t$$

On fera les hypothèses suivantes :

* le coût de transition de **t** à **t+1** est $(d_t)^2$

* il n'y a aucune contrainte sur d_t, t=1, 2, 3, ni sur S_t, t=2, 3

On se place dans un cas hasard-décision, c'est à dire que l'on suppose connu l'apport q_t au moment ou l'on prend la décision :

$$d_t = d_t(S_t, q_t)$$

Ceci revient donc à prendre (S_t, q_t) comme vecteur d'état. On désignera par $c(S_t, q_t, d_t)$ le coût total pour aller de S_t à S_4 et par $c^*(S_t, q_t)$ le coût minimum correspondant au lâcher optimal

$$d^*_t = d_t^* \,(S_t, q_t)$$

REMARQUE :
Notons d'abord que si a, b désignent 2 constantes et X une variable aléatoire, on a :

$$E\ (aX + b)^2 = a^2\ E(X^2) + b^2\ +2ab\ E(X)$$
$$E\ (aX + b)^2 = (aE(X)+b)^2 + a^2\ VAR(X)$$

2) Calcul par programmation dynamique en avenir incertain

2- 1) Etape 3---->4

On a immédiatement :

$$d^*(S_3, q_3) = (S_3 + q_3 - S_4)$$

$$c\ (S_3, Q_3) = (S_3 + q_3 - S_4)^2$$

2- 2) Etape 2---->3

Il s'agit de trouver y tel que :

$$MIN\ [y^2 + E_{/q2}\{\ (S_2 + q_2 - y + q_3 - S_4)^2\ \}]$$

ce qui avec la remarque ci-dessus nous donne :

$$y^2 + (S_2 + q_2 - y + E(q_3/q_2) - S_4)^2 + VAR(q_3/q_2)$$

d'où y optimal,

$$d^*(S_2, q_2) = 1/2\ (S_2 + q_2 + E(q_3/q_2) - S_4) \qquad \text{et :}$$
$$c^*(S_2, q_2) = 1/2\ (S_2 + q_2 + E(q_3/q_2) - S_4)\ + VAR(q_3/q_2)$$

2- 3) Etape 1--->2

On cherche alors z tel que soit minimun l'expression :

$$z^2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E} \left\{ \frac{1}{2} \left(S_1 + q_2 + \underset{\text{sachant } q_2}{E} (q_3) - S_4 \right)^2 + \underset{\text{sachant } q_2}{Var} (q_3) \right.$$

soit :

$$z^2 + \frac{1}{2}\left(S_1 + q_2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E}(q_3+q_2) - z - S_4\right)^2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E}\left(\underset{\text{sachant } q_2}{\mathrm{Var}}(q_3\right.$$

$$+\frac{1}{2}\underset{\text{sachant } q_1}{\mathrm{Var}}\left(q_2 + \underset{\text{sachant } q_2}{E}(q_3)\right)$$

d'où **z** optimal :

$$d^* (S_1, q_1) = 1/3\ (S_1 + q_2 + E(q_2/q_1) + E(q_3/q_1) - S_4)$$

et : $c^* (S_1, q_1) = 1/2\ (S_1 + q_2 + E(q_2/q_1) + E(q_3/q_1) - S_4) + E\ (VAR(q_3/q_2)/q_1) + 1/2\ VAR(q_2 + E(q_3/q_2))/q_1)$

3) Calcul par la méthode des scénarios

On suppose que l'on est en S_1 et que l'on cherche à connaître d_1; on sait que l'apport à la première période est q_1. On va jusqu'en $S_2 = S_1 + q_1 - d_1$, et l'on génère un scénario, c'est à dire q_2 sachant q_1 puis q_3 sachant q_2 et q_1 pour ce scénario les décisions optimales pour aller de S_2 à S_4 sont (d'après le fil tendu) :

$$d_2 = d_3 = 1/2\ (S_2 + q_2 + q_3 - S_4)$$

et le coût pour cette trajectoire est :

$$c_{Sc}(S_2, q_1, q_2, q_3) = 1/2\ (S_2 + q_2 + q_3 - S_4)^2$$

L'ensemble des scénarios générés permet de calculer le coût moyen associé à l'ensemble de ces trajectoires générées :

$$c^*_{Sc}(S_2, q_1) = \frac{1}{2}\left(S_2 + q_2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E}(q_3+q_2) - S_4\right)^2 + \frac{1}{2}\underset{\text{sachant } q_1}{\mathrm{Var}}(q_2 + q_3)$$

On calcule ensuite la décision optimum $d_1 = d_1 (S_1, q_1)$ telle que :

$$\mathrm{MIN}\ (d_1 + c_{Sc}(S_1 + q_1 - d_1, q_1)$$

On trouve :

$$d^*_{Sc}(S_1,q_1) = \frac{1}{3}\left(S_1 + q_2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E}(q_3+q_2) - S_4 \right)$$

et un coût :

$$c^*_{Sc}(S_1,q_1) = \frac{1}{2}\left(S_1 + q_2 + \underset{\text{sachant } q_1}{E}(q_3+q_2) - S_4 \right)^2 +$$

$$\frac{1}{2} \underset{\text{sachant } q_1}{\mathrm{Var}} (q_2 + q_3)?$$

4) Conclusions

On voit que dans ce cas précis (coût quadratique du lâcher et pas de contrainte intermédiaire) la décision optimale calculée pour le premier pas de temps est la même, que l'on utilise la programmation dynamique dans l'incertain, la programmation dynamique sur scénarios ou la programmation dynamique déterministe sur le scénario moyen. Ceci est dû à la fonction de coût particulière, qui permet, grâce à la remarque préliminaire, d'obtenir des fonctions de coût de la forme :

$1/2\ (S_1+q_1+E(q_2+q_3+\ldots\ q_T/q_1)-d_1-S_T)$ + un terme de variance différent selon les cas mais qui n'intervient pas dans la minimisation pour la recherche de d_1.

On peut sur le même schéma de période prendre un coût de la forme $(d(t))^4$ et des lâchers indépendants de type Bernouilli :

q(t)= q'(avec probabilité p) ou q'' (avec probabilité 1-p)

Dans ce cas on obtient des décisions totalement différentes qu'on ne peut obtenir que numériquement.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 9

Listing des programmes et des fichiers
utilisés pour la gestion stratégique
du système Neste.

DECEMBRE 91

E. PARENT

```
* Les 51 premieres lignes de ce fichier sont des commentaires
* FICHIER SQEN61.IN permet l'introduction des paramètres du calcul des consignes
* générales de gestions du système NESTE par Programmation dynamique
* Programme Mis au point par E PARENT pour le CERGRENE Version de SEPT 90
* Le Programme Principal SQEN61 appelle ce fichier d'introduction des paramètres
* La structure générale de ce fichier d introduction des paramètres est:
*  apres tous ces commentaires chaque paramètre est fixé à une valeur numérique
*  donnée (10 caractères) suivi d'un blanc et":" puis commenté sur deux lignes.
* Le Programme principal SQEN61 est un peu long à tourner (>< 24 Heures). IL
* produit des consignes de gestion hebdomadaires qui sont sauvées sous forme
* binaire sous des fichiers "etaN.eta" ; N désignant le n° de la semaine
* considérée , on crée un fichier par semaine de gestion. Le Programme relit
* transforme pour une semaine donnée le fichier etaN.eta en etaN.txt qui
* fournit sous une forme ASCII des tableaux de consignes de gestion.
*Ces tableaux sont de dimension SEPT*NetatQ* NetatS car ils donnent pour un triplet
*(ku*Neste*Stock) quel est le contrat de salubrité à proposer ainsi que d'autres
*indicateurs de gestions qui sont stockes dans les fichiers "etatN.eta". Ces
*fichiers binaires sont traduits sous formes de fichiers textes exploitables
* "etatN.txt" par le programme "verbeux". Celui requiert de l'utilisateur
*un pas de temps; t = 0 correspond a la premiere semaine de juin t = 19 a la 20
*eme semaine. Il ecrit ensuite sur le disque local les fichiers textes
*"etatN.txt"qui comprennent pour chacune des valeurs eventuelles actuelles
* du tour d'eau en debut de la semaine en cours, des tableaux fonctions des
* couples (niveau du total des reservoirs* niveau de la Neste):
****** les consignes pour salubrite gascogne en m3/s
****** les consignes pour la mise en oeuvre detours d eau dans la semaine
****** probabilite d epuisement des ressources (jusque semaine 20)
****** valeur moyenne escomptee des reserves (a l horizon de la semaine 20)
****** performance moyenne escomptee de la salubrite en % (horizon pour la semaine 20)
****** performance moyenne escomptee de l irrigation en % (horizon pour la semaine 20)
*Il est imperatif de prendre un nombre entre 1 et 7 pour le nombre maximal de tours
* d'eau que l'on accepte de realiser dans la semaine; par exemple SEPT=4
* permettra d analyser les politiques 0/4 1/4 2/4 3/4 4/4 tandis que SEPT =7
* correspond  a des tours d'eau exprimes en jours par semaine.Dans cette version
* il est imperatif de prendre pour NetatQ la valeur 7 car le programme etale les
* valeurs possibles entre -2 et 2 écarts-types autour du niveau moyen de la Neste
* Pour NetatS,on peut prendre un nombre pair ou impair car le programme
* etale les valeurs possibles entre le Volume Minimal et le Volume Maximal.
* les niveaux de la Neste au cours de la semaine t sont calculés par la formule
* a = 2*pi*t/52; moyenne du Log des débits = 2.720 + 0.530 * cos(a)
* - 0.08 * sin(a) + 0.29 * cos(2a) + 0.04 * sin(2a)+ 0.1 * cos(3a) + 0.11 * sin(3a)
* tandis que l ecart type du log est calculé par 0.43 - 0.1 * cos(a)
*  + 0.08 * sin(a) + 0.03 * cos(2.0 * a) + 0.03 * (sin(3.0 * a) - cos(3.0 * a));
* En resume:
************ pour fixer les parametres. modifier eventuellement
          les dernieres lignes de ce fichier:
************ lancer sqen61, ce qui va prendre 24 Heures environ
************ appeler verbeux chaque semaine
************ consulter les fichies "etatN.txt
*
******debut d'introduction des paramètres:
     4 :
$Variable SEPTdecrit le nombre de restrictions possibles de l'irrigation que l'on
$va prendre en consideration pour décrire les tours d eau en debut de la semaine.
     7 :
$Variable NetatQ décrit le nombre de niveaux de la Neste que l'on
$va prendre en consideration pour décrire l'état hydrologique en debut de la semaine.
    21 :
$ Variable NetatS décrit le nombre de niveaux du reservoir equivalent
```

$ considéré pour décrire l'état des reserves de Stock en debut de la semaine.
0 :
$ Variable Vmin decrit le niveau minimal du réservoir en million
$ de M3
75 :
$ Variable Vmax décrit le niveau Maximal des reserves en million
$ de M3
18 :
$ Variable QS décrit la quantité souscrite pour l' irrigation en
$ litre par seconde pour l' ensemble du périmètre.
3 :
$Variable QminN décrit en M3 par seconde le niveau minimum à
$maintenir sur la rivière Neste
4 :
$Variable QobjN décrit en M3 par seconde le niveau objectif requis
$sur la rivière Neste
5.4 :
$ Variable QminG décrit en M3 par seconde le niveau minimum à
maintenir sur la totalite des rivieres de Gascogne pour la salubrité
12.4 :
$Variable QobjG décrit en M3 par seconde le niveau objectif requis
$sur les rivières de Gascogne pour une salubrité maximale
14 :
$ Variable CANAL designe la capacité de transfert maximum
a travers le système canal
7 :
$ Variable TCT designe le lacher maximal
$ pour les barrages de coteaux
13 :
$ Variable THM designe la capacité de transfert maximum
$ en sortie des barrages de haute montagne
1 :
$ Variable PENALTY qui pondere la partie irrigation dans l objectif de gestion.
$ Plus cette valeur est forte moins la gestion menage la salubrite.

```
PROGRAM SQen6;
        USES
                dos, crt;
{ PROGRAMME DE CALCUL D'UNE GESTION DE vidange (tous reservoirs agglomeres}
{    -optimise la salubrité    (objectifG + neste + esperance de l irrigation}
{}
{    5 NIVEAUX de discretisation pour les aleas}
{    2 ETATS : stock total et regime Neste + mode de fonctionnement}
{    decisions de dimension 2                        }
{                                            }
{    lundi 6 MAI Mardi 7 mai Mercredi 8 Mai }
(* prise en compte du risque en forcant les passages en crise des que *)
(* lorsque les reservoirs sont trop vides  ou que rg = qminG*)
(* svg sous forme .eta *)
(* ecrit sur unite b:  *)
(* initialisation a Virr et Vqual negatif -->Initetat *)
{*************************************************************}
        CONST
                netatsQMax = 7;
                netatsSMax = 21;
  SEPTMAx =4;
                niveaux = 5;
                saisons = 20;

        TYPE
                S_IEMES =1..netatsSmax;
        SEPTIEMES = 0..SEPTmax;
        Q_iemes= 1..netatsSMax;
                aleas = ARRAY[1..niveaux] OF real;
                ETAT = RECORD
                                S : real;{volume de la reserve stock}
                                Q :real;
                                Vqualite : real;    {f de Bellman pour la qualité}
                Virrigation :real;
                                DEFAILLANCE : real; {probabilité d'au moins une défaillance fonctionnelle sur la
suite}
                                rg:real; {contratde salubrité}
                u:SEPTIEMES; (* SEPT si irrigation ok sinon 1/7... *)
                                Vfinal : real:   {volume moyen final}
                        END;

                STATE = ARRAY[1..netatsSmax,1..netatsQmax,SEPTIEMES] OF ETAT;
        PSTATE = ^STATE;



    Var
        SEPT:Septiemes; netatsQ:Q_iemes; netatsS:S_iemes;
 Vmin:real; Vmax:real; QS:real; QminN :real; QobjN:real;
 QminG :real; QobjG:real; CANAL:real; TCT:real; THM:real;
 PENALTY:real;


        VAR
                FUTUR, PRESENT :PSTATE;


        VAR (* du prg princ *)
                tfinal,temps, step, ks, kQ,kU, naux : integer;
```

```
                    demande, proba_demande, neste, proba_neste : aleas;
                    bsupN, binfN : ARRAY[1..niveaux] OF integer;
      { à kn fixé stockera les valeurs des niveaux de neste }
          {de l etat suivant  qui encadreront les apports prevus  }
      { à partir de l etat courant }

(*************************************)

procedure LIREparam(Var SEPT:Septiemes;Var netatsQ:Q_iemes;Var netatsS:S_iemes;
Var Vmin:real;Var Vmax:real;Var QS:real;Var QminN :real;Var QobjN:real;
Var QminG :real;Var QobjG:real;Var CANAL:real;Var TCT:real;Var THM:real;
Var PENALTY:real);

var fichier:text;
nom : STRING[20];
  i:integer;
        BEGIN
                    nom := 'sqen51.IN';
                    assign(fichier, nom);
                    reset(fichier);
for i:= 1 to 51 do readln(fichier);
  readln(fichier,SEPT);
  for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,netatsQ );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,netatsS );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,Vmin );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,Vmax );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,QS );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,QminN);
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,QobjN);
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,QminG  );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,QobjG);
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,CANAL);
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,TCT);
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,THM      );
for i:= 1 to 2  do readln(fichier);
readln(fichier,PENALTY);
close(fichier);
      END;

(* *********************************)
FUNCTION MIEUX(a,b :etat):BOOLEAN;
begin
mieux:=FALSE;
IF (a.Vqualite+PENALTY*a.Virrigation > b.Vqualite - PENALTY*b.Virrigation)
  THEN mieux := TRUE;
end;
```

```
(***************echange de pointeurs***********)
procedure SWP(VAR a,b:Pstate);
var paux:pstate;
begin
paux:= a;
a:=b;
b:=paux;
end;  (* de swap pointeurs *)

(*******************inf et sup **************)
function inf(a,b:real):real;
begin
if a > b then inf := b else inf := a;
end;

(*******************inf et sup **************)
function sup(a,b:real):real;
begin
if a > b then sup:= a else sup:= b;
end;
(****************impression intermediaire **************)
Procedure ECRAN;
Var i,j:integer;
BEGIN
CLRSCR;
Write(temps:2,'*');
For j := 1 to NetatsS do WRITE(Present^[j,1,1].S:3:0);
Writeln;
For i := 1 to NetatsQ do BEGIN
  Write(Present^[1,i,1].Q:3:0);
For j := 1 to NetatsS do WRITE(10/SEPT*PRESENT^[j,i,SEPT].u*Present^[j,i,SEPT].rg:3:0);
Writeln;
                END;
writeln;writeln;
Write(temps:2,'*');
For j := 1 to NetatsS do WRITE(Present^[j,1,1].S:3:0);
Writeln;
For i := 1 to NetatsQ do BEGIN
  Write(Present^[1,i,1].Q:3:0);
For j := 1 to NetatsS do WRITE(100*Present^[j,i,SEPT].DEFAILLANCE:3:0);
Writeln;
                END;
Writeln;
END;

(**************fonction pour les gains **********************)

          FUNCTION OBJECTIFG (qmin, qmax, sortie : real) : real;
          BEGIN
                    ObjectifG := 0;
                    IF sortie >= qmax THEN
                              objectifG := 1;
                    IF (sortie < qmax) THEN
                              BEGIN
                                        objectifG := -(sortie - qmin) * (sortie + qmin - 2.0 * qmax) / sqr(qmax - qmin);
{-----------------------------------> attention pb de compilateur turbo5 87 remplacer 2 par 2.0 }
                              END;
          END;
```

```
(********************fonctions de generation des aleas ************************)

          PROCEDURE creedemande (t : integer;
                         VAR cd, pd : aleas);
(* genere les niveaux pour les irrigations de gascogne en fonction de la semaine *)
               VAR
                         i : integer;{[1..niveaux]}
 (* compteur annexe *)
                         k,bidon : integer;
                         quantile : ARRAY[0..10] OF real;
                         fichier : text;
          BEGIN
     if t <= 20 then
      begin
               assign(fichier, 'stat3.dat');
               reset(fichier);
               FOR k := 1 TO t + 1 DO
                         readln(FICHIER);
               FOR K := 0 TO 10 DO
                         quantile[k] := 0;
          read(fichier,bidon);
               FOR k := 1 TO 10 DO
                         read(fichier, quantile[k]);
               readln(fichier);
               close(fichier);
(*  lecture de la seule semaine t d'apres etude statistique *)
          end;

               FOR i := 1 TO niveaux DO
                         BEGIN
                                   pd[i] := 1 / niveaux;
                         if t > 20 then cd[i] := 0 else   cd[i] := QS * (quantile[(2 * i) - 1] + quantile[2 * i] + quantile[(2 *
i) - 2]) / 3000;
                         END;
(* recree la variable complete *)

          END; (* creedemande *)


          PROCEDURE creeneste (t : integer; neste : real;
                              VAR cn, pn : aleas);
(* genere les niveaux pour les apports de la Neste fonction de }
{                    regime Neste precedent}
{                    la semaine *)

               VAR
                         u, V : aleas; (*niveaux gaussiens u est l innovation , v la var correlee*)
                         mnest, snest, mest, g, a : real; (*moyenne ecart type correlation de la neste standardisee *)
                         i : integer; {[1..niveaux]}
 (* compteur annexe *)
                         Uneste : real;

          BEGIN

               u[1] := -1.83;
               pn[1] := 0.0668;
               u[2] := -0.89;
```

```
                pn[2] := 0.2477;
                u[3] := 0.000;
                pn[3] := 0.3710;
                u[4] := 0.89;
                pn[4] := 0.2477;
                u[5] := 1.83;
                pn[5] := 0.0668;

                a := pi * (t - 1) / 26;(*retour au pas de tps precedent*)
                mnest := 2.720 + 0.530 * cos(a) - 0.08 * sin(a) + 0.29 * cos(2.0 * a) + 0.04 * sin(2.0 * a);
                mnest := mnest + 0.1 * cos(3.0 * a) + 0.11 * sin(3.0 * a);
                snest := 0.43 - 0.1 * cos(a) + 0.08 * sin(a) + 0.03 * cos(2.0 * a) + 0.03 * (sin(3.0 * a) - cos(3.0 * a));

                g := 0.73 - 0.06 * cos(a) + 0.08 * sin(a) + 0.043 * sin(2.0 * a);
                IF g > 1 THEN
                        g := 1;
                IF g < -1 THEN
                        g := -1;
                mest := g;

                Uneste := (LN(neste) - mnest) / snest;
(*re creation de la valeur standardisée de la composante neste de l etat *)

                a := pi * t / 26;(* retour au pas de temps actuel *)
                mnest := 2.72 + 0.53 * cos(a) - 0.08 * sin(a) + 0.29 * cos(2.0 * a) + 0.04 * sin(2.0 * a);
                mnest := mnest + 0.1 * cos(3.0 * a) + 0.11 * sin(3.0 * a);
                snest := 0.43 - 0.1 * cos(a) + 0.08 * sin(a) + 0.03 * cos(2.0 * a) + 0.03 * (sin(3.0 * a) - cos(3.0 * a));



                FOR i := 1 TO niveaux DO
                        V[i] := (Uneste * mest + sqrt(1.0 - sqr(mest)) * U[i]);
(* d'apres etude statistique *)

                FOR i := 1 TO niveaux DO
                        BEGIN
                                cn[i] := exp(mnest + V[i] * snest);
                        END;
(* recree la variable complete *)

        END; (* creeneste *)


(****************************************************)
        PROCEDURE INITIAlisation;

        BEGIN
        tfinal := saisons;
        writeln('tfinal? (20) ');
        readln(tfinal);
        NEW(present);
        NEW(futur) ;
        {variables du problème}
        END;                    {fin d initialisation}



procedure lire(t:integer;var etats:pstate);
var fichier:file of state;
```

```
nom : STRING[20];
BEGIN
        IF t > 10 THEN
                str(t : 2, nom)
        ELSE
                str(t : 1, nom);
        nom := 'eta' + nom + '.eta';
        assign(fichier, nom);
        reset(fichier);
read(fichier,etats^);
END;

PROCEDURE INITETAT (t : integer;VAR ETATS : PSTATE);
        VAR
                ns, nQ,nu : integer;
                W : ARRAY[1..netatsQmax] OF real;
                a, mnest, snest : real;
        bidouille:real;
BEGIN
bidouille := -Sup(-1,(t-saisons)); (* o ou 1 si t=saisons *)
        W[1] := -2;
        W[2] := -0.98188;
        W[3] := -0.539791;
        W[4] := 0.000;
        W[5] := 0.539791;
        W[6] := 0.98188;
        W[7] := 2;

        a := pi * (t - 1) / 26; {1 etat pour la neste est la valeur au pas de temps precedent}
        mnest := 2.72 + 0.53 * cos(a) - 0.08 * sin(a) + 0.29 * cos(2 * a) + 0.04 * sin(2 * a);
        mnest := mnest + 0.1 * cos(3 * a) + 0.11 * sin(3 * a);
        snest := 0.43 - 0.1 * cos(a) + 0.08 * sin(a) + 0.03 * cos(2 * a) + 0.03 * (sin(3 * a) - cos(3 * a));

FOR nu := 0 to SEPT DO
        FOR nS := 1 TO netatsS DO
                FOR nQ := 1 TO NetatsQ DO
                        BEGIN
ETATS^[nS,nQ,nU].Q := exp(mnest + W[nQ] * snest);
ETATS^[nS,nQ,nU].S := VMAX / (netatsS - 1) * (nS - 1);
ETATS^[nS,nQ,nU].Vqualite := -Saisons*bidouille;
ETATS^[nS,nQ,nU].Virrigation:= -Saisons*PENALTY*bidouille;
ETATS^[nS,nQ,nU].DEFAILLANCE := 0;
ETATS^[nS,nQ,nU].rg:= QminG;
ETATS^[nS,nQ,nU].u:= 0;
ETATS^[nS,nQ,nU].Vfinal := VMAX / (netatsS - 1) * (nS - 1);
                        END;{fin de boucle sur NQ et NS et situ}

(************************************initialisation des etats ********)


END;

PROCEDURE ENCADREQ (QQ : real;
        VAR Kplus, kmoins : integer);
{recupere dans kplus,kmoins les valeurs de NQ qui encadrent QQ apport prevu a t }

        VAR
                nq : integer;
BEGIN
```

```
			nq := 1;
			IF QQ < FUTUR^[1,1,0].Q THEN
				BEGIN
					kplus := 1;
					kmoins := 1;
				END
			ELSE
				REPEAT
					kmoins := nq;
					kplus := nq + 1;
					nq := nq + 1;
				UNTIL ((QQ - FUTUR^[1, kmoins,0].Q) * (QQ - FUTUR^[1, kplus,0].Q) <= 0) OR (kplus =
netatsQ);
			IF QQ > FUTUR^[1, NetatsQ,0].Q THEN
				BEGIN
					kplus := NETATSQ;
					kmoins := kplus;
				END;
		END; {de la procedure encadreQ}



		PROCEDURE GENERE (t : integer;VAR demande, proba_demande : aleas);

{generation des aleas }
		BEGIN
			creedemande(t, demande, proba_demande);
		END;

		PROCEDURE zero (VAR z : etat);
		BEGIN
			z.Vqualite := 0;
			z.DEFAILLANCE := 0;
			z.Virrigation:= 0;
			z.Vfinal := 0;
		END;

		PROCEDURE somme (a : real;x : etat;b : real;y : etat;VAR z : etat);
{ effectue ax + by = z }
		BEGIN
			z.Vqualite := a * x.Vqualite + b * y.Vqualite;
			z.Virrigation:= a * x.Virrigation+ b * y.Virrigation;
			z.DEFAILLANCE := a * x.DEFAILLANCE + b * y.DEFAILLANCE;
			z.Vfinal := a * x.Vfinal + b * y.Vfinal;
		END;

		PROCEDURE ajoute (a : real;x : etat;b : real;VAR z : etat);
{ effectue ax + bz = z }
		BEGIN
			z.Vqualite := a * x.Vqualite + b * z.Vqualite;
		z.Virrigation:= a * x.Virrigation+ b * z.Virrigation;
			z.DEFAILLANCE := a * x.DEFAILLANCE + b * z.DEFAILLANCE;
			z.Vfinal := a * x.Vfinal + b * z.Vfinal;
		END;



		PROCEDURE BELLMAN (t, nS, nQ,nU : integer);
```

```
{a partir d'un etat S Q situation au temps t donne par nS et NQ et nU}
{    calcule la transition optimale en lacher}
{    calcule la transition optimale en mode}
{    affecte les valeurs de l etat    futur  à partir de l etat present          }
{ eventuel est un etat de travail  qui sert de test pour maximiser  }
{ la fonction GimmediatG calcule la performance de la gascogne et la NESTE pour la salubrite}
{ la procedure gain futur calcule la fonction de bellman en utilisant interpolation }

                    VAR
                              k, kn, kd : integer;
                              candidat : etat;
               lborneSu,lborneNu:SEPTIEMES; (* valeurs qui assurent la monotonicite des lachers *)
               lborneSrg,lborneNrg:real ;
               umax:SEPTIEMES;



PROCEDURE calcule(var candidat:etat;kn,kd:integer;
                  var lacher,contratreel:real);
var ona,ilfaut :real;
BEGIN
     With CANDIDAT do  BEGIN
(* apartir des niveaux d'aleas sur la neste kn et sur la demande kd *)
(* calcule les valeurs du stock futur du lacher et du contrat de salubrite reel *)

ilfaut:= rg+u/SEPT*Demande[kd];
ona:=SUP(INF(CANAL,(Neste[kn]-qobjN)),0);
if u < SEPT then ona:= SUP(INF(CANAL,(Neste[kn]-qminN)),0);
contratreel := rg;

lacher := ilfaut-ona;

(* saturation du canal *)
if lacher >(INf((CANAL -ona), THM)+ TCT) then begin
                              contratreel := rg -(lacher -
                              (INf((CANAL -ona), THM)+ TCT));
                              lacher :=(INf((CANAL -ona), THM)+ TCT);
                              end;
(* le stock := INF((s - lacher), Vmax) peut etre negatif ! *)

if u < SEPT then lacher := lacher + Sup(0,(qminN-neste[kd]))
      else lacher := lacher + Sup(0,(QobjN-neste[kn]));
       END:
END;(* fin de procedure calcule *)


         PROCEDURE calcul_present( VAR candidat,etatknkd:etat;lacher,contratreel:real;kn,kd:integer);
{ procedure chargée de calculer l'ajout du present à la fonction de bellman après transition :gain immédiat}
{ toutes les  in formations sont passées via l' etat candidat }
         BEGIN
         zero(etatknkd);
         if candidat.rg > contratreel then
         etatknkd.Vqualite:= objectifG(qming,QOBJG,contratreel)
                        else
         etatknkd.Vqualite:= objectifG(qming,QOBJG,candidat.rg);
         (* remarquer la dureté?? *)
(* Si s(t+1) <= 0 alors defaillance :=1  fait dans calcul futur *)

         etatknkd.Virrigation := candidat.u/SEPT:
```

```
END;

          PROCEDURE calcul_futur (VAR candidat,etatknkd: etat;lacher:real;kn:integer;contratreel:real);
{ procedure chargée de calculer l'esperance de la fonction de bellman après transition hors gain immédiat}
{ toutes les  in formations sont passées via l' etat candidat }

                    VAR
                              IndexU:SEPTIEMES;
          NSinit, Nfut1, Nfut2 : integer;
                              EQmixe, E1, E2 : etat;
                              Qsup, Qinf : real;
                              a, b : real;
          variationdetat,variation:real;
{ au préalable les n° d etats de Neste futur (inconditionnel)}
{ encadrant la kn possible valeur de neste conditionnelle ont ete stockes dans bsupN et binfN }


          BEGIN
  IndexU:= candidat.u ;
  IF (candidat.S- (lacher*7*24*3.6/1000))< 0 then
      BEGIN
      ZERO(etatknkd);
      etatknkd.Vqualite := -(STEP+0.01);
      etatknkd.Virrigation := -(PENALTY)*(STEP+0.01);
      etatknkd.Vfinal :=(candidat.S-(lacher*7*24*3.6/1000)+
      futur^[1,bSupN[kn],IndexU].Vfinal);
      etatknkd.Defaillance :=1;
      END
      Else
      BEGIN
                NSinit := ROUND(candidat.S / Vmax * (NetatsS - 1)) + 1;
                variationdetat := (lacher) / Vmax * 7 * 24 * 3.6 / 1000 * (netatsS-1);
      if lacher >0 then begin
                Nfut1 := NSinit - TRUNC(variationdetat);
                Nfut2 := Nfut1 - 1;
                variation := variationdetat - TRUNC(variationdetat);
              end
            else begin
         Nfut1 := NSinit - TRUNC(variationdetat);
                Nfut2 := Nfut1 + 1;
      variation := trunc(variationdetat) -variationdetat;
              end;
                IF (ABS(variation) < 0.01) THEN
                          NFUT2 := NFUT1;
      IF Nfut1 > NetatsS Then Nfut1 := NetatsS;
      If Nfut2 > NetatsS Then Nfut2 := NetatsS;
      ZERO(etatknkd);
      (********************)
      ZERO(EQMIXE);
                Zero(E1);
                ZERO(E2);
          (*     FOR kn := 1 TO niveaux DO  *)
{ calcul d esperance pour chacun des niveaux de stock encadrant }
{ les resultats sont stockés dans E1 et dans E2}
                              BEGIN
                                        Qsup := futur^[nFUT1, bsupN[kn],IndexU].Q;
                                        Qinf := futur^[nFUT1, binfN[kn],IndexU].Q;
                                        IF bsupN[kn] = binfN[kn] THEN
```

```
                                        BEGIN
                                                a := 1;
                                                b := 0;
                                        END
                                ELSE
                                        BEGIN
                        if Qinf = Qsup then
                        begin
                        writeln
                        end;
                                                a := (Qsup - Neste[kn]) / (Qsup - Qinf);  {pour attribuer
poids au min }
                                                b := 1 - a;
                                        END;
                                IF Nfut1 <> Nfut2 THEN
                                        BEGIN
                                                somme(a,   futur^[nFUT1,   binfN[kn].IndexU],   b,
futur^[nFUT1, bsupN[kn].IndexU], EQmixe);
                                                ajoute(1, EQmixe, 1, E1);
                                        END;
{ traitement de l autre borne en stock }
                                somme(a,   futur^[nFUT2,   binfN[kn].IndexU],   b,   futur^[nFUT2,
bsupN[kn].IndexU], EQmixe);
                                ajoute(1, EQmixe, 1, E2);
                        END; { boucle sur Neste }
{ interpolation en stock }
                IF NFUT1 = NFUT2 THEN
                        BEGIN
                                a := 1;
                                b := 0;
                        END
                ELSE
                        BEGIN
                                a := variation;  { pour attribuer poids NFUT2 donc E2 }
                                b := 1 - a;
                        END;
                somme(a, E2, b, E1, etatknkd);
        (*  ajout present dans futur *)
    if candidat.rg > contratreel then
    etatknkd.Vqualite:=etatknkd.Vqualite+ objectifG(qming,QOBJG,contratreel)
            else
    etatknkd.Vqualite:=etatknkd.Vqualite+ objectifG(qming,QOBJG,candidat.rg);
    (* remarquer la durete?? *)
(* Si s(t+1) <= 0 alors defaillance :=1 fait dans calcul futur *)

    etatknkd.Virrigation := etatknkd.Virrigation+candidat.u/SEPT;
    END;
        END; { de la procedure  calcul futur }

        PROCEDURE calcul_etat(var candidat:etat);


                VAR
                        kn, kd : integer;
        probaknkd:real;
        stock,lacher,contratreel:real;
        etatknkd:etat;

        BEGIN
```

```
          ZERO(candidat);
                    FOR kn := 1 TO niveaux DO
               FOR kd := 1 TO niveaux DO
               BEGIN
               probaknkd:=(proba_neste[kn]*proba_demande[kd]);
          calcule(candidat,kn,kd,lacher,contratreel);
          calcul_futur(candidat,etatknkd,lacher,kn,contratreel);
               ajoute(probaknkd,etatknkd,1,candidat);
(* calcul _present(candidat,etatknkd,lacher,contratreel,kn,kd); *)
(* ajoute(probaknkd,etatknkd,1,candidat);                    *)
                              END; { fin de boucle sur gascogne et demande}


               END;  { de la fonction TENTATIVEBIS}



               PROCEDURE ITER_SEARCH (ax, bx:real;ay,by:SEPTIEMES;VAR erreur : integer;
                                        VAR candidat : etat);


                    CONST
               iterationmax = 20;
                    VAR
               iteration :integer;
                              xcalc: real;
               ycalc:SEPTIEMES;
               ecalc:etat;

                    PROCEDURE G (x: real;y:SEPTIEMES;VAR e : Etat);
                    BEGIN
                              e.rg:= x;
               e.u := y;
                              calcul_etat(e);
                    END; { de G }

               BEGIN        { de iter search}
{initialization }
        g(ax,ay,candidat);
        move(candidat,ecalc,sizeof(candidat));
        IF ay < by then begin   (* restrictions sur l irrigation*)
         FOR ycalc:= ay to by  do
         begin
         g(QminG,ycalc,ecalc);
         IF Mieux(ecalc,candidat) THEN    move(ecalc,candidat,sizeof(candidat));
         end;
               end;

        if(  (SEPT = by) AND (ax<bx)) then FOR iteration := 2 to iterationmax do
         begin
         xcalc :=ax+( (bx-ax)*iteration/iterationmax);
         g(xcalc,by,ecalc);
         IF Mieux(ecalc,candidat) THEN    move(ecalc,candidat,sizeof(candidat));
         end;


               END;                    {de iter search}
```

```
                PROCEDURE tentative (VAR candidat : etat;lbNrg:real;lbNu:SEPTIEMES;
                lbSrg:real;lbSu,umax:SEPTIEMES);
                        VAR
                                erreur : integer;
                                Rmax, Rmin : real;
                UMIN : SEPTIEMES;
                BEGIN


Rmax := QOBJG;
(* umax := 1;*)
Rmin :=(ABS(lbNrg-lbSrg)+(lbNrg+lbSrg))/2;
Umin := lbNu;
if lbSu > lbNu THEN Umin := lbSu;
if Umax < SEPT THEN begin
          Rmax :=QminG;
          Rmin:=QminG;
          end;
IF ((Rmin >= Rmax) AND (Umin>= Umax) ) THEN
                BEGIN
                                        candidat.rg:= Rmax;
                                        candidat.u:= umax;
                                        calcul_etat(candidat);
                                END
                        ELSE
                                iter_search(Rmin,Rmax,Umin,Umax, erreur, candidat);

                END; { de la procedure tentative }


(**************************************debut bellman ********)

        BEGIN { de bellman}
        MOVE(Present^[ns, nq,nU],candidat,SIZEOF(ETAT));
        Umax := nU;
        IF nq = 1 then begin
                lborneNrg := QMING;
                lborneNu := 0;
                end
              else begin
                lborneNrg := present^[ns,nq-1,nU].rg;
                lborneNu := present^[ns,nq-1,nU].u;
                end;
        if ns = 1 then begin
                lborneSrg:= QMING;
                lborneSu:= 0;
                end
        else begin
           lborneSrg:=present^[ns-1,nq,nU].rg;
           lborneSu:=present^[ns-1,nq,nU].u;
           end;
                                BEGIN
                tentative(candidat,lborneNrg,lborneNu
                        ,lborneSrg,lborneSu,Umax);
IF mieux(candidat,present^[ns, nq,nU]) THEN
      move(candidat, present^[ns, nq,nU], sizeof(ETAT));
                                END;

        END; { de bellman}
```

```
        PROCEDURE IMPRIME (t : integer; ETATS : Pstate);
                VAR
                        FICHIER : FILE OF STATE;
                        c, nom : STRING[20];
        BEGIN
                IF t > 10 THEN
                        str(t : 2, nom)
                ELSE
                        str(t : 1, nom);
                nom := 'eta' + nom + '.eta';
                assign(fichier, nom);
                rewrite(fichier);
        write(fichier,ETATS^);

                close(fichier);
        END;
(***********)

BEGIN {prog principal }

     LIREparam(SEPT, netatsQ, netatsS, Vmin, Vmax, QS,
QminN, QobjN, QminG, QobjG, CANAL, TCT, THM , PENALTY);

        INITIALISATION;
     if (tfinal < saisons) then lire (tfinal,futur)
      else INITETAT( tfinal, FUTUR);
        {GETTIME(hdeb, mdeb, sdeb, s100);        }
        FOR step := 1 TO tfinal DO
                BEGIN
         temps := tfinal - step;
         writeln('calcul au temps t',temps:5);
         INITETAT(temps, PRESENT);
         GENERE(temps,demande, proba_demande);
               BEGIN
                        FOR kQ := 1 TO netatsQ DO
                         BEGIN
               creeneste(temps, present^[1, kQ,0].Q, neste, proba_neste);
               FOR naux := 1 TO niveaux DO
                BEGIN
                encadreQ(neste[naux], bsupN[naux], binfN[naux]);
                END;
               FOR kU := 0 TO SEPT DO
               FOR ks := 1 TO netatsS DO
                BEGIN
                (*writeln('calcul temps=', temps, 'ks et kq  valent', ks : 5, kq : 5);*)
                                BELLMAN(temps, ks, kq,ku);
               (* writeln;*)
               (* writeln;*)
                END;
              END;
         END;
         writeln;
        IMPRIME(temps, PRESENT);
        ECRAN;
        SWP(PRESENT,FUTUR);
                END;
        CLrScr;
        GotoXY(20, 20);
```

```
        WRITELN('Fin du Prog d Eric PARENT ....');
        Writeln('Veuillez SVP eteindre cet appareil');
        readln;
END.
```

date	neste	gasc	besoins (m3/s)
7501	53.057	14.343	0.000
7502	55.414	17.629	0.000
7503	45.529	7.781	0.000
7504	47.971	27.198	0.041
7505	36.014	6.815	0.812
7506	30.500	4.282	4.142
7507	24.514	3.431	4.831
7508	18.100	2.296	5.809
7509	11.229	1.795	6.376
7510	10.571	2.436	4.662
7511	12.129	1.397	1.813
7512	13.900	5.863	0.056
7513	14.186	1.298	0.000
7514	13.486	11.778	0.000
7515	18.814	6.616	0.000
7516	17.529	4.121	0.000
7517	17.514	4.464	0.000
7518	11.571	2.996	0.000
7519	9.686	1.741	0.000
7520	10.186	8.040	0.000
7521	9.014	4.340	0.000
7522	8.171	9.417	0.000
7523	8.143	4.209	0.000
7524	9.600	30.081	0.000
7525	13.286	53.600	0.000
7526	15.243	41.457	0.000
7527	11.686	17.686	0.000
7528	12.629	17.457	0.000
7529	11.157	12.714	0.000
7530	10.386	10.371	0.000
7531	8.686	8.784	0.000
7532	7.957	7.653	0.000
7533	7.814	6.586	0.000
7534	8.014	12.327	0.000
7535	7.629	16.600	0.000
7536	10.243	18.614	0.000
7537	10.429	59.686	0.000
7538	9.629	18.986	0.000
7539	13.186	12.186	0.000
7540	13.271	9.394	0.000
7541	11.886	68.114	0.000
7542	14.186	29.143	0.000
7543	15.071	17.071	0.000
7544	19.457	33.029	0.000
7545	15.471	20.771	0.000
7546	15.243	24.557	0.000
7547	17.957	59.400	0.000
7548	25.014	23.486	0.000
7549	46.043	41.914	0.000
7550	41.300	16.586	0.000
7551	45.400	8.973	0.024
7552	42.686	4.966	0.086
7601	28.371	2.916	0.938
7602	26.971	1.061	2.875
7603	23.914	1.389	3.995
7604	17.986	1.071	5.327
7605	18.029	0.899	3.669
7606	14.429	1.145	3.712

7607	12.243	5.316	3.107
7608	7.929	1.355	5.296
7609	7.914	0.214	5.798
7610	6.786	-0.615	5.266
7611	9.029	1.710	2.484
7612	8.143	6.979	1.373
7613	11.200	10.776	0.462
7614	8.886	4.808	0.462
7615	11.743	11.202	0.462
7616	8.871	4.930	0.330
7617	17.486	4.591	0.000
7618	13.643	8.969	0.000
7619	16.900	8.917	0.000
7620	20.900	79.657	0.000
7621	15.186	56.300	0.000
7622	14.371	54.271	0.000
7623	25.671	96.400	0.000
7624	17.643	57.200	0.000
7625	12.357	25.671	0.000
7626	11.357	54.386	0.000
7627	13.643	397.857	0.000
7628	12.686	69.743	0.000
7629	12.514	32.743	0.000
7630	10.271	23.129	0.000
7631	16.443	28.971	0.000
7632	11.571	30.700	0.000
7633	10.029	62.100	0.000
7634	10.914	49.786	0.000
7635	10.171	34.071	0.000
7636	12.000	38.343	0.000
7637	12.471	106.857	0.000
7638	13.800	71.886	0.000
7639	12.843	34.843	0.000
7640	14.729	24.243	0.000
7641	13.443	23.771	0.000
7642	11.743	21.400	0.000
7643	10.629	24.171	0.000
7644	13.400	19.690	0.033
7645	14.843	35.874	0.231
7646	19.471	53.202	0.231
7647	30.114	24.302	0.231
7648	31.700	44.717	0.231
7649	33.014	27.502	0.231
7650	56.700	130.160	0.231
7651	67.143	261.802	0.231
7652	53.043	102.160	0.231
7701	57.271	51.018	0.175
7702	58.371	27.032	0.175
7703	42.729	59.446	0.175
7704	35.143	49.246	0.175
7705	40.043	73.875	0.175
7706	44.257	338.746	0.175
7707	34.714	66.404	0.175
7708	27.943	20.118	0.361
7709	60.429	75.793	0.779
7710	49.000	31.022	0.808
7711	27.929	15.865	0.808
7712	25.100	18.122	0.808
7713	23.171	23.282	0.711

7714	20.129	9.650	0.471
7715	15.629	5.517	0.226
7716	12.314	4.510	0.043
7717	10.086	3.763	0.337
7718	13.014	65.221	0.075
7719	14.571	4.002	0.038
7720	18.243	8.817	0.020
7721	32.286	6.203	0.000
7722	11.514	6.006	0.000
7723	7.971	6.750	0.000
7724	10.186	9.513	0.000
7725	11.786	10.670	0.000
7726	11.443	9.649	0.000
7727	13.586	20.086	0.000
7728	13.029	9.481	0.000
7729	10.514	6.774	0.000
7730	9.514	7.116	0.000
7731	8.371	7.500	0.000
7732	7.657	10.021	0.000
7733	6.286	44.214	0.000
7734	6.671	139.143	0.000
7735	14.129	343.429	0.000
7736	19.214	316.429	0.000
7737	12.371	151.000	0.000
7738	43.871	112.271	0.000
7739	39.614	49.743	0.000
7740	31.400	56.829	0.000
7741	25.957	33.686	0.000
7742	20.929	53.414	0.000
7743	24.671	159.186	0.000
7744	24.429	223.286	0.000
7745	17.786	79.157	0.000
7746	20.257	87.100	0.000
7747	24.714	83.229	0.000
7748	29.943	81.929	0.000
7749	35.643	211.786	0.000
7750	49.814	50.571	0.000
7751	47.843	116.671	0.000
7752	41.929	83.029	0.000
7801	76.357	23.900	0.000
7802	88.857	77.000	0.000
7803	45.929	34.114	0.000
7804	44.157	19.571	0.000
7805	49.429	30.729	0.000
7806	45.043	22.712	0.041
7807	41.129	11.178	1.578
7808	29.429	6.174	4.534
7809	26.800	10.393	2.023
7810	18.900	6.592	0.811
7811	13.143	5.024	2.241
7812	11.186	3.091	3.833
7813	10.400	1.643	3.763
7814	9.500	2.278	1.839
7815	8.157	2.099	0.263
7816	7.329	0.307	0.676
7817	6.471	0.389	0.782
7818	7.957	42.688	0.072
7819	5.900	1.559	0.000
7820	6.557	2.646	0.000

7821	6.557	2.743	0.000
7822	5.300	2.621	0.000
7823	4.900	2.879	0.000
7824	4.714	2.883	0.000
7825	4.386	2.559	0.000
7826	4.486	3.163	0.000
7827	5.300	4.331	0.000
7828	7.014	5.061	0.000
7829	6.257	6.546	0.000
7830	6.986	4.940	0.000
7831	6.814	13.049	0.000
7832	11.443	66.186	0.000
7833	11.714	139.257	0.000
7834	19.871	37.571	0.000
7835	20.229	88.900	0.000
7836	37.214	301.571	0.000
7837	33.943	133.857	0.000
7838	19.386	62.329	0.000
7839	15.914	29.586	0.000
7840	15.286	26.300	0.000
7841	15.686	39.100	0.000
7842	14.600	51.057	0.000
7843	25.257	88.243	0.000
7844	18.286	138.143	0.000
7845	20.686	82.043	0.000
7846	19.186	47.857	0.000
7847	22.657	102.043	0.000
7848	29.443	124.686	0.000
7849	29.057	47.900	0.000
7850	52.471	23.700	0.000
7851	55.929	118.286	0.000
7852	93.814	71.300	0.000
7901	99.571	97.214	0.000
7902	52.357	46.343	0.000
7903	49.686	22.543	0.000
7904	56.229	13.639	0.053
7905	34.414	9.056	1.570
7906	30.314	7.673	5.483
7907	25.429	7.652	6.144
7908	20.386	4.561	7.234
7909	16.857	3.993	5.528
7910	13.643	3.326	6.477
7911	10.357	2.037	4.703
7912	13.057	1.345	0.182
7913	9.157	0.868	0.509
7914	9.071	1.025	0.888
7915	8.786	1.736	0.136
7916	8.414	1.488	0.169
7917	10.757	2.614	0.000
7918	9.143	48.375	0.000
7919	17.100	4.894	0.000
7920	23.014	4.920	0.000
7921	20.800	3.789	0.000
7922	21.571	72.743	0.000
7923	18.229	13.000	0.000
7924	14.686	51.743	0.000
7925	15.071	45.357	0.000
7926	14.043	15.243	0.000
7927	12.186	9.587	0.000

7928	11.229	14.296	0.000
7929	11.500	78.243	0.000
7930	10.357	43.157	0.000
7931	16.086	148.886	0.000
7932	12.743	107.729	0.000
7933	11.443	58.543	0.000
7934	10.357	46.629	0.000
7935	10.314	47.486	0.000
7936	11.814	114.286	0.000
7937	11.729	66.857	0.000
7938	11.357	38.171	0.000
7939	10.986	43.129	0.000
7940	10.979	56.986	0.000
7941	14.057	220.286	0.000
7942	14.629	90.157	0.000
7943	17.214	54.957	0.000
7944	23.629	39.957	0.000
7945	16.257	27.086	0.000
7946	16.271	23.886	0.000
7947	16.257	27.971	0.000
7948	14.386	20.957	0.000
7949	17.343	28.271	0.000
7950	23.257	50.700	0.000
7951	22.971	47.000	0.000
7952	28.214	111.686	0.000
8001	41.686	40.129	0.000
8002	37.786	16.114	0.000
8003	46.400	10.840	0.049
8004	30.386	8.519	0.172
8005	26.786	6.607	1.177
8006	25.943	7.888	1.209
8007	18.371	7.015	0.912
8008	15.414	4.120	3.769
8009	11.543	3.597	5.949
8010	9.314	1.968	6.478
8011	9.229	1.833	5.940
8012	10.157	3.701	1.368
8013	9.157	6.048	1.733
8014	7.643	1.860	0.899
8015	6.600	2.111	1.199
8016	9.114	1.754	1.072
8017	9.536	1.323	0.084
8018	6.464	3.897	0.108
8019	7.597	46.956	0.113
8020	15.543	27.687	0.016
8021	17.529	34.486	0.000
8022	17.929	31.057	0.000
8023	13.486	10.957	0.000
8024	15.157	24.443	0.000
8025	12.400	20.871	0.000
8026	11.214	23.929	0.000
8027	11.714	32.300	0.000
8028	10.743	31.900	0.000
8029	21.300	85.500	0.000
8030	23.900	184.571	0.000
8031	13.929	73.757	0.000
8032	12.371	51.500	0.000
8033	22.386	205.729	0.000
8034	34.771	313.429	0.000

8035	22.757	84.257	0.000
8036	20.143	62.086	0.000
8037	18.429	47.071	0.000
8038	15.243	30.114	0.000
8039	13.614	87.729	0.000
8040	16.514	89.314	0.000
8041	34.243	58.586	0.000
8042	20.643	35.729	0.000
8043	29.957	28.543	0.000
8044	28.643	34.900	0.000
8045	31.129	24.243	0.000
8046	36.286	69.829	0.000
8047	26.943	72.614	0.000
8048	23.729	68.357	0.000
8049	25.657	58.971	0.000
8050	30.529	64.671	0.000
8051	34.271	27.229	0.000
8052	44.786	49.400	0.000
8101	59.886	12.593	0.000
8102	48.029	6.496	0.563
8103	29.714	5.877	2.743
8104	27.643	8.405	0.781
8105	25.129	15.797	1.356
8106	21.943	11.153	0.377
8107	18.929	7.680	1.047
8108	14.457	4.709	3.719
8109	21.657	9.178	1.509
8110	11.657	4.712	2.506
8111	8.586	2.787	4.559
8112	6.486	1.789	5.363
8113	5.500	2.319	3.107
8114	5.814	0.777	1.601
8115	5.286	0.194	1.042
8116	16.486	1.392	0.238
8117	16.729	6.447	0.000
8118	11.243	3.633	0.000
8119	11.429	6.386	0.000
8120	7.793	4.133	0.000
8121	7.450	33.100	0.000
8122	8.289	10.839	0.000
8123	6.840	7.423	0.000
8124	8.166	5.891	0.000
8125	8.756	5.729	0.000
8126	8.640	28.314	0.000
8127	10.116	83.429	0.000
8128	32.529	530.429	0.000
8129	23.100	278.714	0.000
8130	20.914	124.243	0.000
8131	21.043	63.571	0.000
8132	18.129	37.700	0.000
8133	15.671	26.843	0.000
8134	15.257	96.314	0.000
8135	15.871	43.029	0.000
8136	13.929	26.471	0.000
8137	13.071	54.114	0.000
8138	17.486	168.971	0.000
8139	20.314	220.857	0.000
8140	16.057	94.229	0.000
8141	14.971	80.714	0.000

8142	26.757	263.871	0.000
8143	17.729	46.171	0.000
8144	21.857	27.957	0.000
8145	22.714	20.343	0.000
8146	19.914	15.167	0.053
8147	18.686	11.694	0.545
8148	21.143	11.792	1.048
8149	20.557	8.750	1.384
8150	34.686	7.648	2.308
8151	38.286	5.406	2.147
8152	34.571	15.455	0.606
8201	38.543	6.703	0.220
8202	32.629	4.840	0.201
8203	25.357	1.206	1.351
8204	18.686	0.599	4.386
8205	17.400	-0.330	5.980
8206	11.463	-1.250	5.879
8207	10.243	0.124	6.120
8208	21.333	-0.283	4.356
8209	17.771	4.117	0.509
8210	11.543	1.548	0.221
8211	8.734	0.548	1.459
8212	15.037	2.223	2.155
8213	12.449	3.797	0.364
8214	8.224	1.318	0.705
8215	8.711	0.482	0.933
8216	7.751	-0.016	0.342
8217	19.500	3.860	0.000
8218	14.143	10.067	0.000
8219	22.857	46.381	0.000
8220	20.571	28.400	0.000
8221	24.143	44.886	0.000
8222	19.429	14.600	0.000
8223	92.214	11.019	0.000
8224	34.643	71.686	0.000
8225	25.043	26.586	0.000
8226	20.471	24.786	0.000
8227	22.571	116.300	0.000
8228	29.471	330.857	0.000
8229	24.171	147.429	0.000
8230	21.414	70.243	0.000
8231	16.914	37.514	0.000
8232	15.971	28.057	0.000
8233	15.529	28.900	0.000
8234	13.786	27.657	0.000
8235	13.443	21.914	0.000
8236	12.143	53.957	0.000
8237	11.714	29.157	0.000
8238	14.986	45.614	0.000
8239	14.857	115.614	0.000
8240	19.629	45.057	0.000
8241	13.771	41.700	0.000
8242	15.200	44.329	0.000
8243	17.643	82.971	0.000
8244	15.014	79.643	0.000
8245	17.086	33.200	0.000
8246	23.329	24.043	0.000
8247	17.514	21.129	0.000
8248	16.400	15.471	0.000

8249	13.281	16.943	0.000
8250	25.657	12.400	0.000
8251	20.714	11.730	0.000
8252	35.257	7.871	0.070
8301	51.614	4.344	0.858
8302	39.529	4.219	3.568
8303	22.957	3.383	4.836
8304	26.514	9.110	1.219
8305	25.200	4.521	0.349
8306	21.414	0.421	2.002
8307	13.729	0.993	5.060
8308	10.921	0.036	5.710
8309	6.776	-0.050	6.526
8310	8.461	-0.869	6.461
8311	8.794	0.518	3.512
8312	14.844	6.259	0.437
8313	13.129	14.221	0.000
8314	10.334	3.581	0.000
8315	10.097	1.897	0.000
8316	8.099	1.472	0.000
8317	5.423	0.594	0.234
8318	4.984	38.821	0.170
8319	4.604	2.442	0.128
8320	5.406	4.364	0.030
8321	4.783	5.934	0.000
8322	4.859	4.459	0.000
8323	6.413	2.656	0.000
8324	8.486	7.491	0.000
8325	8.157	4.247	0.000
8326	6.986	7.000	0.000
8327	7.343	9.676	0.000
8328	7.680	23.471	0.000
8329	8.064	21.514	0.000
8330	7.094	19.443	0.000
8331	7.916	10.637	0.000
8332	8.473	23.514	0.000
8333	8.286	31.229	0.000
8334	11.047	128.943	0.000
8335	11.229	137.986	0.000
8336	16.900	260.429	0.000
8337	14.329	71.471	0.000
8338	10.914	75.486	0.000
8339	8.479	74.800	0.000
8340	7.200	32.200	0.000
8341	7.407	24.857	0.000
8342	8.414	22.329	0.000
8343	10.336	33.643	0.000
8344	13.914	112.971	0.000
8345	14.657	50.829	0.000
8346	13.257	23.243	0.000
8347	24.486	15.114	0.000
8348	22.329	11.615	0.472
8349	17.771	10.680	0.704
8350	16.543	17.522	0.465
8351	18.457	39.323	0.023
8352	22.043	53.157	0.000
8401	27.786	76.579	0.479
8402	35.386	27.742	0.528
8403	52.671	12.749	0.806

8404	38.386	8.618	1.338
8405	29.143	4.356	4.690
8406	21.029	1.273	6.833
8407	13.329	-0.568	7.018
8408	10.499	-1.536	6.968
8409	7.760	-1.621	6.808
8410	9.271	1.640	4.310
8411	8.867	15.464	2.247
8412	8.174	4.423	4.437
8413	7.991	4.590	0.574
8414	6.657	1.309	0.450
8415	6.103	0.900	0.164
8416	7.639	2.272	0.039
8417	11.624	12.943	0.039
8418	16.543	26.563	0.006
8419	15.071	40.914	0.000
8420	10.950	8.526	0.000
8421	10.157	6.653	0.000
8422	9.100	5.190	0.000
8423	49.271	7.183	0.000
8424	35.857	20.373	0.000
8425	20.429	43.014	0.000
8426	16.729	24.786	0.000
8427	16.686	20.186	0.000
8428	13.400	14.500	0.000
8429	15.457	41.529	0.000
8430	13.657	93.800	0.000
8431	12.400	52.586	0.000
8432	13.120	24.757	0.000
8433	9.586	28.557	0.000
8434	13.529	88.214	0.000
8435	11.186	108.129	0.000
8436	11.629	39.586	0.000
8437	15.357	182.043	0.000
8438	12.871	118.471	0.000
8439	10.800	43.429	0.000
8440	10.179	48.571	0.000
8441	9.671	30.229	0.000
8442	11.479	132.457	0.000
8443	13.271	143.771	0.000
8444	20.814	51.300	0.000
8445	27.900	36.514	0.000
8446	21.100	45.314	0.000
8447	17.129	47.743	0.000
8448	17.643	26.429	0.000
8449	18.300	168.757	0.000
8450	18.400	66.257	0.000
8451	25.800	50.029	0.000
8452	40.343	25.229	0.000
8501	43.943	30.571	0.000
8502	35.157	19.857	0.000
8503	35.971	22.371	0.000
8504	28.214	11.906	0.000
8505	27.029	6.989	1.403
8506	21.071	5.639	6.016
8507	20.857	3.230	7.621
8508	13.486	0.410	7.497
8509	10.710	-1.026	6.243
8510	8.896	0.381	5.575

8511	7.381	0.242	6.245
8512	6.629	0.744	7.691
8513	7.463	-0.099	5.745
8514	5.820	-0.117	5.273
8515	4.943	-0.050	4.506
8516	4.659	0.413	2.956
8517	4.656	0.648	2.060
8518	4.576	5.811	0.366
8519	4.423	0.317	0.000
8520	4.339	0.141	0.000
8521	4.224	0.299	0.000
8522	5.989	1.187	0.000
8523	7.329	3.243	0.000
8524	12.257	4.744	0.000
8525	8.236	2.407	0.000
8526	6.564	1.909	0.000
8527	6.571	2.259	0.000
8528	6.700	3.663	0.000
8529	6.650	2.556	0.000
8530	6.736	8.493	0.000
8531	7.071	9.321	0.000
8532	8.871	24.657	0.000
8533	10.536	63.314	0.000
8534	10.779	39.400	0.000
8535	12.293	129.129	0.000
8536	9.993	162.671	0.000
8537	9.857	39.314	0.000
8538	12.814	64.586	0.000
8539	13.600	69.371	0.000
8540	16.714	90.957	0.000
8541	13.757	61.286	0.000
8542	12.900	43.386	0.000
8543	14.343	30.200	0.000
8544	14.229	23.100	0.000
8545	12.657	87.486	0.000
8546	12.986	53.571	0.000
8547	17.129	68.586	0.000
8548	19.671	72.186	0.000
8549	29.229	36.186	0.000
8550	58.786	22.357	0.000
8551	64.929	15.244	0.058
8552	43.843	13.276	0.076

date	total
70	5589.6
71	5958.6
72	6246.2
73	6255.5
74	6733.7
75	8719.0
76	10050.0
77	7595.5
78	11887.4
79	10996.6
80	11716.8
81	11580.2
82	12333.3
83	12643.0
84	12902.0
85	13551.7
86	15285.1
87	17248.7
88	17986.3

row	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
1	0	0	0	0	0	0	11	69	100	137
2	0	0	0	0	0	2	48	108	266	375
3	0	0	0	0	40	79	150	196	366	566
4	0	0	0	15	63	90	150	290	461	670
5	0	18	68	94	141	217	274	400	515	710
6	0	48	84	234	360	423	462	531	651	750
7	64	90	145	276	336	440	502	601	702	756
8	51	219	295	324	457	519	588	687	775	821
9	39	139	263	346	364	472	584	693	785	854
10	31	88	250	312	453	513	551	603	707	822
11	95	156	183	232	302	346	403	494	620	743
12	0	22	72	125	185	224	349	405	549	756
13	0	0	25	49	83	142	269	323	456	704
14	0	0	18	52	73	110	154	199	441	634
15	0	0	0	20	32	74	106	184	305	453
16	0	0	0	0	23	37	46	99	148	305
17	0	0	0	0	0	0	9	40	131	187
18	0	0	0	0	0	0	0	7	29	43
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) **CERGRENE**

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 10

Listing des programmes et des fichiers
utilisés pour la gestion journalière
du barrage Seine

DECEMBRE 91

E. PARENT

```
PROGRAM SeinePD;
        USES
                dos, crt;
{ PROGRAMME DE CALCUL D'UNE GESTION Du reservoir seine par
 discretisation de KUSHNER}
{   minimise la variance des debits regules calcul sur 365 jours}
{   on connait l apport quand on prend la décision u}
{ le LOG des apports suit un processus AR1 modélisé par une diffusion en temps continu}
{    21 NIVEAUX de discretisation pour les aleas et le stock}
{    2 ETATS : stock total et regime SEINE}
{}
{ version SQN4 modifiée le 16/01/90 et le 1 mars 90}
(* svg sous forme .eta *)
{**************************************************************}
        CONST
                saisons = 365;
                netatsQ = 16;  {Q vaut LN Y , Y apport reel}
                netatsS = 21;

        TYPE

                ETAT = RECORD
                V:real ; {optimun de BELLMAN}
                                u: real; {décision de lacher}
                        END;

        STATE = ARRAY [1..netatsS,1..netatsQ] of etat;

        VAR
                FUTUR, PRESENT : STATE;
                uMAX,uMin,QMAX,QMIN,SMAX,SMIN,M, alpha, beta,sigma2 : real; {variables du problème}
        deltaT,deltaS,deltaQ:real;
        t,kS,kQ:integer;
        s,Q:real;
        PPS,PMS,PPQ,PMQ,PP0:real;
        boucle:integer;

(*Qt+1 = ALPHA + beta Qt + sigma2 n(0,1) *)
(*M apport interannuel moyen*)


        VAR (* du prg princ *)
                tfinal,temps, step, ns, nQ : integer;



(*******************fonctions de generation des aleas **********************)
      FUNCTION PPLUSdeltaS(u:real):real;
      begin
         PPLUSdeltaS:= 0;
         if u<0 then PPLUSdeltaS:=-u*deltaT/deltaS;
      end;

      FUNCTION PMOINSdeltaS(u:real):real;
      begin
         PMOINSdeltaS:= 0;
         if u>0 then PMOINSdeltaS:=u*deltaT/deltaS;
      end;
```

```
 FUNCTION PMOINSdeltaQ(kQ:integer):real;
 begin
    PMOINSdeltaQ:= 0;
    if (alpha + (beta -1)*((kQ-1)*deltaQ ))<0
     then PMOINSdeltaQ:=(-(alpha + (beta -1)*((kQ-1)*deltaQ))*deltaT/deltaQ)+((sigma2/deltaQ/2)*deltaT/deltaQ);
 end;

FUNCTION PPLUSdeltaQ(kQ:integer):real;
 begin
    PPLUSdeltaQ:= 0;
    if (alpha + (beta -1)*((kQ-1)*deltaQ ))>0
     then PPLUSdeltaQ:=((alpha + (beta -1)*((kQ-1)*deltaQ ) )*deltaT/deltaQ)+((sigma2/deltaQ/2)*deltaT/deltaQ);
 end;


(*********routines de lecture ***************************)

PROCEDURE LIT_PARAM(t:integer);  {rend alpha beta sigma2 à t }
var
fparam:text;  {la première ligneest muette la 2eme donne les definitions }
tmuet:integer;
jour:integer;
begin
assign(fparam,'avjmlis2.res');
reset(fparam);
for tmuet :=1 to t do
begin
readln(fparam);
end;
readln(fparam,jour,alpha,beta,sigma2);
close(fparam);
end;


procedure lire(t:integer;var etats:state);
var fichier:file of state;
        nom : STRING[20];
        BEGIN
        IF t > 100 then str(t:3,nom) else
        begin
                IF t > 10 THEN
                      str(t : 2, nom)
                  ELSE
                      str(t : 1, nom);
        end;
              nom := 'eta' + nom + '.eta';
              assign(fichier, nom);
              reset(fichier);
        read(fichier,etats);
    END;

        PROCEDURE IMPRIME (t : integer; ETATS : state);
              VAR
                      FICHIER : FILE OF STATE;
                      nom : STRING[20];
        BEGIN
        IF t > 100 then str(t:3,nom) else
```

```
begin
            IF t > 10 THEN
                  str(t : 2, nom)
              ELSE
                  str(t : 1, nom);
end;
        nom := 'eta' + nom + '.eta';
        assign(fichier, nom);
        rewrite(fichier);
write(fichier,ETATS);

        close(fichier);
END;
(**************************************************)
PROCEDURE INITIAlisation; {general}

BEGIN
        SMAX := 200*1000/3.6/24;{potentialités en m3/s par unité de temps à diviser par saisons pour debit
fictif continu}
        SMIN := 0;
        QMIN:= 0;
        QMAX:= LN(200);
        uMIN:= -180;
        uMAX:= 40;
deltaT:=1;
deltaS:=(SMAX-SMIN)/(netatsS-1);
deltaQ:=(QMAX-QMIN)/(netatsQ-1);
tfinal := saisons;
M:=22;

{variables du problème}
END;                {fin d initialisation generale}



PROCEDURE INITETAT (VAR ETATS : STATE);
        VAR
                ns, nQ : integer;

BEGIN

        FOR nS := 1 TO netatsS DO
                FOR nQ := 1 TO NetatsQ DO
                                BEGIN
                                        ETATS[nS, nQ].u:=0;
                                        ETATS[nS, nQ].V := 0;

                                END;{fin de boucle sur NQ et NS }

(***********************************initialisation des etats ********)


END;

procedure initfinalbis(var etats:state);
begin
lire(1,etats);
end;
```

```
PROCEDURE INITFINAL(VAR ETATS : STATE);
        VAR
              ns, nQ : integer;

    BEGIN

        FOR nS := 1 TO netatsS DO
              FOR nQ := 1 TO NetatsQ DO
                          BEGIN
                                ETATS[nS, nQ].u:=0;
                                ETATS[nS, nQ].V := sqr(nS-0.5*netatsS) - 400;

                          END;{fin de boucle sur NQ et NS }

(*************************************initialisation des etats ********)


    END;


    PROCEDURE BELLMAN (t, nS, nQ : integer);
{a partir d'un etat S Q situation au temps t donne par nS et NQ }
{   calcule la transition optimale en lacher}
{   affecte les valeurs de l etat   futur  à partir de l etat present }

        VAR
              ks,kq : integer;
              gradient1,ucandidat1 : real;
      gradient2,ucandidat2 : real;
      vminimun:real;
      aux1,aux2:real;
  BEGIN
  {recherche du u* par discrétisation explicite}


(***********>>   **)
  {cas ou on ne coince pas sur le stock }
  if (nS-1)*(nS-netatsS)<0 then
   begin
    {on cherche u* positif :vidange}
    gradient1 := (futur[nS,nQ].V - futur[nS-1,nQ].V)/deltaS;
   ucandidat1:= M-exp((nQ-1)*deltaQ)+(gradient1/2*M*M);
   if ucandidat1 > umax then ucandidat1:=umax;
   if ucandidat1> (nS-1)*deltaS then ucandidat1:=(nS-1)*deltaS;
   if ucandidat1 <0 then ucandidat1:= 0;
   present[ns,nq].u :=ucandidat1;

   {on cherche u* négatif:remplissage}
    gradient2 := (futur[nS+1,nQ].V - futur[nS,nQ].V)/deltaS;
   ucandidat2:= M-exp((nQ-1)*deltaQ)+(gradient2/2*M*M);
   if ucandidat2 < umin then ucandidat2:=umin;
   if ucandidat2 <-exp((nQ-1)*deltaQ) then ucandidat2 := - exp((nQ-1)*deltaQ);
   if ucandidat2 > 0 then ucandidat2:= 0;
   aux1:= (ucandidat1*(gradient1+gradient2)/2)-sqr((M-exp((nQ-1)*deltaQ)-ucandidat1)/M);
   aux2:= (ucandidat2*(gradient2+gradient1)/2)-sqr((M-exp((nQ-1)*deltaQ)-ucandidat2)/M) ;
   if ( aux1 < aux2 )
     then begin
        present[ns,nq].u :=ucandidat2;
        end;
```

```
      if (nQ-1)*(nQ-netatsQ) <0 then
                  begin
        present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+ (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*
        futur[ns-1,nQ].V)+(pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+ (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
        (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u) -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*
        futur[ns,nQ].V;

        pps:=pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u);
        pms :=pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u);
        pmq:= pMOINSdeltaQ(nQ);
        ppq :=pPLUSdeltaQ(nQ);
         pp0 :=(1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u) -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ)
);
        if ( ( abs(pps) >1 ) OR ( abs(pms) >1 ) OR ( abs(pmq) >1 )
          OR ( abs(ppq) >1 ) OR ( abs(pp0) >1 ) )
            then writeln('attention discrétisation t,nq,ns',t:3,nq:5,ns:5);

                  end
                  else
      if nQ =1 then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns-1,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
              (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
              (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
               -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V
                  else
      if nQ =netatsQ then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns-1,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+
              (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
              (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
               -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V ;


      present[nS,nQ].V := present[nS,nQ].V+sqr(  ( present[nS,nQ].u -M + exp((nQ-1)*deltaQ) )/M  );
      end;{du cas 1<nS<netatss}

(***********>>   **)
      {cas ou on coince sur le stock en haut}
      if (nS= netatsS) then
       begin
        {on cherche u* positif :vidange}
        gradient1 := (futur[nS,nQ].V - futur[nS-1,nQ].V)/deltaS;
       ucandidat1:= M-exp((nQ-1)*deltaQ)+(gradient1/2*M*M);
       if ucandidat1 > umax then ucandidat1:=umax;
       if ucandidat1> (nS-1)*deltaS then ucandidat1:=(nS-1)*deltaS;
       if ucandidat1 <0 then ucandidat1:= 0;
       present[ns,nq].u :=ucandidat1;

       if (nQ-1)*(nQ-netatsQ) <0 then
         present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns-1,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+
              (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
              (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
               -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V
                  else
       if nQ =1 then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
              (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns-1,nQ].V)+
```

```
            (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
            (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
            (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
             -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V
                  else
   if nQ =netatsQ then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns-1,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+
            (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
            (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
             -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V ;


   present[nS,nQ].V := present[nS,nQ].V+sqr( ( present[nS,nQ].u -M + exp((nQ-1)*deltaQ) )/M );

   end;


(***********>>   **)
    {cas ou on coince sur le stock en bas }
    if (nS= 1) then
     begin
      {on cherche u* négatif:remplissage}
       gradient2 := (futur[nS+1,nQ].V - futur[nS,nQ].V)/deltaS;
      ucandidat2:= M-exp((nQ-1)*deltaQ)+(gradient2/2*M*M);
      if ucandidat2 < umin then ucandidat2:=umin;
      if ucandidat2 <-exp((nQ-1)*deltaQ) then ucandidat2 := - exp((nQ-1)*deltaQ);
      if ucandidat2 > 0 then ucandidat2:= 0;
      present[ns,nq].u :=ucandidat2;

      if (nQ-1)*(nQ-netatsQ) <0 then
       present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+
            (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
            (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
             -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V
                  else
    if nQ =1 then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
            (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ+1].V)+
            (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
             -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V
                  else
    if nQ =netatsQ then present[nS,nQ].V:=(pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns+1,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)*futur[ns,nQ].V)+
            (pMOINSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ-1].V)+
            (pPLUSdeltaQ(nQ)*futur[ns,nQ].V)+
            (1-pPlusdeltaS(present[nS,nQ].u)-pMOINSdeltaS(present[nS,nQ].u)
             -pMOINSdeltaQ(nQ)-pPLUSdeltaQ(nQ) )*futur[ns,nQ].V ;


   present[nS,nQ].V := present[nS,nQ].V+sqr( ( present[nS,nQ].u -M + exp((nQ-1)*deltaQ) )/M );
   end;

END; { de bellman}
```

```
(***********)
        {VAR
                hdeb, mdeb, sdeb, hfin, mfin, sfin, s100 : word;}


BEGIN {prog principal }
boucle:=1;

INITIALISATION;

repeat
    if boucle <= 1 then INITFINAL(FUTUR)
            else    initfinalbis(futur);
        {GETTIME(hdeb, mdeb, sdeb, s100);       }

        FOR step:= 1 TO tfinal DO
                BEGIN
            t :=tfinal+1-step;
                        INITETAT(PRESENT);
            lit_param(t);
            FOR nQ := 1 TO netatsQ DO
              FOR ns := 1 TO netatsS DO BELLMAN(t, ns, nq);
                        writeln('fin du calcul pour t = ',t:3);

            if t mod 30 = 0 then
            begin
            writeln;
             FOR nS := 1 TO TRUNC(netatsS/2) DO
              begin
              FOR nQ := 1 TO TRUNC(netatsQ/2) do write(present[2*ns,2*nq].V:8:0);
              writeln;
              end;
              writeln;  writeln;
              writeln('décisions');
             FOR nS := 1 TO TRUNC(netatsS/2) DO
              begin
              FOR nQ := 1 TO TRUNC(netatsQ/2) do write(present[2*ns,2*nq].u:8:0);
              writeln;
              end;

            end;
                        IMPRIME(t, PRESENT);
                        MOVE(PRESENT, FUTUR, SIZEof(PRESENT));
                END;
 boucle := boucle +1;
 until boucle >=4;
{         GETtime(hfin, mfin, sfin, s100);}
        CLrScr;
        GotoXY(20, 20);
        WRITELN('Fin du Prog d Eric PARENT ....');
        Writeln('Veuillez SVP eteindre cet appareil');
        {readln;}
END.
```

valeurs lissées de alpha beta sigma2 sur 3+1+3 points pbs en 260 261 262

1	0.1096	0.9708	0.0214
2	0.1041	0.9749	0.0162
3	0.0992	0.9781	0.0145
4	0.0681	0.9868	0.0144
5	0.0414	0.9945	0.0142
6	0.0142	1.0019	0.0138
7	-0.0062	1.0069	0.0134
8	-0.0176	1.0080	0.0137
9	-0.0199	1.0063	0.0135
10	-0.0099	1.0030	0.0144
11	-0.0175	1.0046	0.0141
12	0.0239	0.9931	0.0164
13	0.0673	0.9810	0.0192
14	0.0847	0.9762	0.0202
15	0.0872	0.9759	0.0192
16	0.0873	0.9751	0.0185
17	0.0905	0.9724	0.0167
18	0.1020	0.9677	0.0154
19	0.0808	0.9720	0.0110
20	0.0559	0.9782	0.0085
21	0.0553	0.9781	0.0086
22	0.0510	0.9814	0.0110
23	0.0521	0.9834	0.0115
24	0.0538	0.9847	0.0123
25	0.0674	0.9829	0.0146
26	0.0754	0.9822	0.0154
27	0.0830	0.9804	0.0146
28	0.0640	0.9855	0.0128
29	0.0763	0.9812	0.0108
30	0.0952	0.9757	0.0113
31	0.0798	0.9804	0.0118
32	0.0365	0.9928	0.0105
33	-0.0060	1.0053	0.0107
34	-0.0255	1.0115	0.0113
35	-0.0167	1.0096	0.0132
36	-0.0432	1.0172	0.0137
37	-0.0594	1.0224	0.0143
38	-0.0443	1.0185	0.0150
39	0.0118	1.0040	0.0168
40	0.0644	0.9898	0.0185
41	0.0897	0.9835	0.0197
42	0.0966	0.9817	0.0209
43	0.1098	0.9772	0.0204
44	0.1077	0.9759	0.0202
45	0.1144	0.9715	0.0180
46	0.0995	0.9721	0.0152
47	0.0789	0.9747	0.0126
48	0.0701	0.9754	0.0115
49	0.0992	0.9676	0.0104
50	0.0896	0.9710	0.0104
51	0.0676	0.9780	0.0097
52	0.0211	0.9918	0.0103
53	-0.0149	1.0031	0.0109
54	-0.0403	1.0113	0.0108
55	-0.0623	1.0170	0.0101
56	-0.0821	1.0207	0.0086
57	-0.0616	1.0138	0.0083
58	-0.0345	1.0039	0.0074

59	0.0389	0.9826	0.0098
60	0.0804	0.9695	0.0091
61	0.1198	0.9576	0.0090
62	0.1401	0.9510	0.0085
63	0.1384	0.9503	0.0073
64	0.1315	0.9516	0.0066
65	0.1537	0.9453	0.0067
66	0.1551	0.9439	0.0038
67	0.1809	0.9368	0.0053
68	0.1811	0.9370	0.0057
69	0.1680	0.9419	0.0060
70	0.1358	0.9532	0.0065
71	0.0864	0.9692	0.0068
72	0.0365	0.9860	0.0067
73	-0.0173	1.0036	0.0074
74	-0.0747	1.0221	0.0069
75	-0.0981	1.0301	0.0067
76	-0.0819	1.0253	0.0094
77	-0.0804	1.0263	0.0121
78	-0.0514	1.0184	0.0128
79	-0.0516	1.0189	0.0136
80	-0.0391	1.0151	0.0129
81	-0.0317	1.0119	0.0124
82	-0.0260	1.0094	0.0124
83	-0.0346	1.0129	0.0098
84	-0.0168	1.0071	0.0074
85	-0.0116	1.0053	0.0067
86	0.0021	1.0009	0.0061
87	0.0117	0.9988	0.0073
88	0.0160	0.9979	0.0075
89	0.0203	0.9973	0.0078
90	0.0267	0.9960	0.0081
91	0.0239	0.9953	0.0079
92	0.0373	0.9901	0.0079
93	0.0516	0.9848	0.0078
94	0.0286	0.9896	0.0065
95	0.0203	0.9913	0.0061
96	0.0076	0.9936	0.0052
97	0.0001	0.9938	0.0043
98	0.0139	0.9893	0.0039
99	0.0100	0.9895	0.0034
100	0.0029	0.9900	0.0036
101	0.0308	0.9815	0.0035
102	0.0480	0.9759	0.0032
103	0.0570	0.9740	0.0037
104	0.0607	0.9730	0.0042
105	0.0418	0.9791	0.0047
106	0.0400	0.9802	0.0048
107	0.0420	0.9808	0.0044
108	0.0220	0.9872	0.0043
109	0.0043	0.9927	0.0044
110	0.0116	0.9894	0.0042
111	-0.0044	0.9951	0.0046
112	0.0052	0.9918	0.0044
113	-0.0038	0.9949	0.0045
114	-0.0133	0.9988	0.0042
115	-0.0176	1.0001	0.0042
116	-0.0066	0.9975	0.0042
117	-0.0273	1.0053	0.0037

118	-0.0244	1.0039	0.0030
119	-0.0322	1.0063	0.0030
120	-0.0186	1.0018	0.0029
121	-0.0099	0.9982	0.0033
122	-0.0119	0.9989	0.0034
123	-0.0216	1.0021	0.0041
124	-0.0194	1.0009	0.0049
125	-0.0274	1.0053	0.0054
126	-0.0334	1.0076	0.0063
127	-0.0327	1.0077	0.0067
128	-0.0326	1.0075	0.0065
129	-0.0179	1.0023	0.0068
130	-0.0171	1.0015	0.0067
131	-0.0114	0.9987	0.0063
132	0.0271	0.9844	0.0058
133	0.0507	0.9759	0.0054
134	0.0408	0.9798	0.0060
135	0.0116	0.9911	0.0073
136	-0.0016	0.9976	0.0073
137	-0.0035	1.0003	0.0077
138	-0.0049	1.0019	0.0075
139	-0.0246	1.0083	0.0074
140	-0.0390	1.0141	0.0076
141	-0.0374	1.0129	0.0068
142	-0.0132	1.0043	0.0064
143	0.0008	0.9985	0.0063
144	0.0105	0.9943	0.0065
145	0.0064	0.9955	0.0073
146	-0.0004	0.9984	0.0074
147	-0.0030	0.9983	0.0067
148	0.0162	0.9916	0.0071
149	0.0207	0.9883	0.0082
150	0.0183	0.9885	0.0096
151	0.0167	0.9881	0.0086
152	0.0477	0.9781	0.0123
153	0.0552	0.9732	0.0159
154	0.0642	0.9700	0.0159
155	0.0538	0.9736	0.0155
156	0.0538	0.9747	0.0136
157	0.0595	0.9728	0.0119
158	0.0675	0.9709	0.0126
159	0.0556	0.9753	0.0088
160	0.0554	0.9773	0.0053
161	0.0337	0.9855	0.0063
162	0.0610	0.9756	0.0080
163	0.0573	0.9769	0.0082
164	0.0329	0.9849	0.0083
165	0.0208	0.9881	0.0075
166	0.0094	0.9918	0.0069
167	0.0073	0.9940	0.0077
168	0.0290	0.9850	0.0070
169	-0.0015	0.9952	0.0056
170	0.0017	0.9940	0.0060
171	-0.0031	0.9970	0.0084
172	-0.0153	1.0019	0.0089
173	0.0014	0.9949	0.0093
174	0.0071	0.9913	0.0086
175	0.0074	0.9926	0.0088
176	-0.0015	0.9969	0.0090

177	0.0018	0.9942	0.0093
178	0.0109	0.9896	0.0068
179	0.0251	0.9840	0.0063
180	0.0254	0.9832	0.0071
181	0.0234	0.9827	0.0070
182	0.0229	0.9819	0.0070
183	0.0337	0.9774	0.0064
184	0.0263	0.9807	0.0059
185	0.0493	0.9702	0.0064
186	0.0350	0.9755	0.0083
187	0.0615	0.9641	0.0102
188	0.0405	0.9735	0.0113
189	0.0256	0.9789	0.0126
190	0.0375	0.9724	0.0125
191	0.0411	0.9705	0.0122
192	0.0593	0.9632	0.0141
193	0.0726	0.9604	0.0124
194	0.0323	0.9762	0.0096
195	0.0447	0.9701	0.0093
196	0.0444	0.9701	0.0101
197	0.0357	0.9739	0.0099
198	0.0489	0.9685	0.0108
199	0.0167	0.9826	0.0097
200	0.0340	0.9736	0.0111
201	0.0376	0.9736	0.0120
202	0.0375	0.9732	0.0123
203	0.0326	0.9763	0.0107
204	0.0214	0.9802	0.0113
205	0.0020	0.9874	0.0112
206	0.0041	0.9864	0.0106
207	-0.0087	0.9908	0.0098
208	0.0169	0.9762	0.0123
209	0.0150	0.9765	0.0130
210	0.0370	0.9650	0.0151
211	0.0466	0.9609	0.0172
212	0.0398	0.9661	0.0177
213	0.0392	0.9677	0.0184
214	0.0484	0.9646	0.0204
215	0.0188	0.9796	0.0211
216	0.0380	0.9741	0.0226
217	0.0262	0.9808	0.0248
218	0.0274	0.9832	0.0229
219	0.0311	0.9807	0.0235
220	0.0443	0.9748	0.0219
221	0.0317	0.9805	0.0193
222	0.0680	0.9637	0.0222
223	0.0668	0.9622	0.0197
224	0.0620	0.9641	0.0194
225	0.0777	0.9591	0.0209
226	0.0726	0.9628	0.0220
227	0.0536	0.9722	0.0231
228	0.0573	0.9708	0.0241
229	0.0227	0.9924	0.0193
230	-0.0026	1.0078	0.0196
231	0.0117	1.0014	0.0190
232	-0.0122	1.0094	0.0178
233	0.0015	1.0026	0.0165
234	-0.0024	1.0026	0.0161
235	-0.0092	1.0037	0.0173

236	-0.0067	1.0002	0.0183
237	-0.0101	1.0004	0.0185
238	-0.0255	1.0112	0.0149
239	-0.0291	1.0148	0.0195
240	-0.0486	1.0222	0.0217
241	-0.0379	1.0202	0.0282
242	-0.0292	1.0188	0.0286
243	-0.0331	1.0186	0.0297
244	-0.0101	1.0068	0.0308
245	0.0083	0.9959	0.0314
246	0.0090	0.9927	0.0274
247	0.0252	0.9861	0.0255
248	0.0281	0.9833	0.0192
249	0.0182	0.9844	0.0186
250	0.0183	0.9814	0.0162
251	0.0233	0.9799	0.0157
252	0.0214	0.9797	0.0166
253	0.0201	0.9812	0.0155
254	0.0094	0.9828	0.0212
255	0.0082	0.9821	0.0250
256	0.0224	0.9767	0.0257
257	0.0377	0.9716	0.0258
258	0.0486	0.9684	0.0285
259	0.0517	0.9672	0.0281
260	0.0517	0.9672	0.0281
261	0.0517	0.9672	0.0281
262	0.0517	0.9672	0.0281
263	0.0577	0.9680	0.0263
264	0.0354	0.9811	0.0249
265	0.0024	0.9954	0.0237
266	0.0001	0.9971	0.0234
267	-0.0111	1.0042	0.0231
268	0.0142	0.9952	0.0334
269	0.0226	0.9939	0.0290
270	0.0203	0.9908	0.0258
271	0.0266	0.9895	0.0273
272	0.0285	0.9890	0.0250
273	0.0245	0.9914	0.0243
274	0.0271	0.9933	0.0242
275	0.0081	1.0026	0.0145
276	0.0045	1.0016	0.0146
277	0.0143	0.9981	0.0137
278	0.0208	0.9938	0.0161
279	0.0294	0.9919	0.0161
280	0.0273	0.9941	0.0157
281	0.0233	0.9938	0.0153
282	0.0147	0.9963	0.0148
283	0.0123	1.0000	0.0158
284	0.0034	1.0026	0.0154
285	-0.0077	1.0040	0.0110
286	-0.0039	1.0000	0.0111
287	-0.0126	1.0018	0.0137
288	-0.0148	1.0025	0.0149
289	0.0106	0.9909	0.0159
290	0.0274	0.9860	0.0170
291	0.0272	0.9878	0.0176
292	0.0226	0.9907	0.0174
293	0.0249	0.9900	0.0170
294	0.0340	0.9879	0.0163

295	0.0357	0.9904	0.0206
296	0.0101	1.0038	0.0204
297	0.0018	1.0073	0.0191
298	0.0122	1.0034	0.0239
299	0.0203	1.0014	0.0247
300	0.0183	1.0013	0.0239
301	0.0227	0.9985	0.0230
302	0.0248	0.9971	0.0192
303	0.0284	0.9954	0.0181
304	0.0202	0.9976	0.0173
305	0.0142	1.0006	0.0122
306	0.0072	1.0044	0.0120
307	0.0046	1.0076	0.0126
308	0.0073	1.0097	0.0158
309	0.0108	1.0066	0.0194
310	0.0253	1.0010	0.0195
311	0.0326	0.9975	0.0212
312	0.0423	0.9942	0.0235
313	0.0624	0.9864	0.0245
314	0.0665	0.9827	0.0243
315	0.0725	0.9799	0.0243
316	0.0829	0.9786	0.0216
317	0.0743	0.9840	0.0260
318	0.0748	0.9862	0.0260
319	0.0595	0.9911	0.0237
320	0.0557	0.9928	0.0229
321	0.0597	0.9928	0.0233
322	0.0448	0.9968	0.0197
323	0.0312	0.9984	0.0160
324	0.0297	0.9961	0.0121
325	0.0247	0.9952	0.0096
326	0.0263	0.9924	0.0087
327	0.0044	0.9966	0.0083
328	-0.0041	0.9991	0.0075
329	0.0192	0.9922	0.0115
330	0.0149	0.9955	0.0128
331	0.0098	0.9998	0.0140
332	0.0039	1.0034	0.0159
333	0.0141	1.0021	0.0175
334	0.0239	1.0025	0.0193
335	0.0236	1.0042	0.0221
336	0.0033	1.0113	0.0190
337	0.0052	1.0100	0.0180
338	0.0095	1.0070	0.0169
339	0.0272	1.0016	0.0180
340	0.0212	1.0036	0.0184
341	0.0261	1.0006	0.0174
342	0.0206	1.0003	0.0159
343	0.0308	0.9966	0.0154
344	0.0543	0.9904	0.0184
345	0.0582	0.9894	0.0189
346	0.0544	0.9897	0.0170
347	0.0781	0.9828	0.0184
348	0.0975	0.9780	0.0197
349	0.1118	0.9734	0.0205
350	0.1103	0.9738	0.0211
351	0.0820	0.9808	0.0188
352	0.0736	0.9818	0.0170
353	0.0748	0.9797	0.0169

354	0.0450	0.9865	0.0136
355	0.0190	0.9935	0.0132
356	0.0141	0.9960	0.0126
357	0.0007	0.9992	0.0130
358	0.0102	0.9964	0.0134
359	0.0192	0.9947	0.0138
360	0.0248	0.9935	0.0148
361	0.0603	0.9846	0.0200
362	0.0831	0.9780	0.0207
363	0.1117	0.9691	0.0214
364	0.1568	0.9555	0.0278
365	0.1434	0.9632	0.0264

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 11

Etude des fuites sur le canal
de la Neste.

DECEMBRE 91

E. PARENT

ESTIMATION DES PERTES DU CANAL NESTE

Les Données

L'étude a été menée sur 108 mois d'Octobre 1977 à Septembre 1986. On disposait des données suivantes:

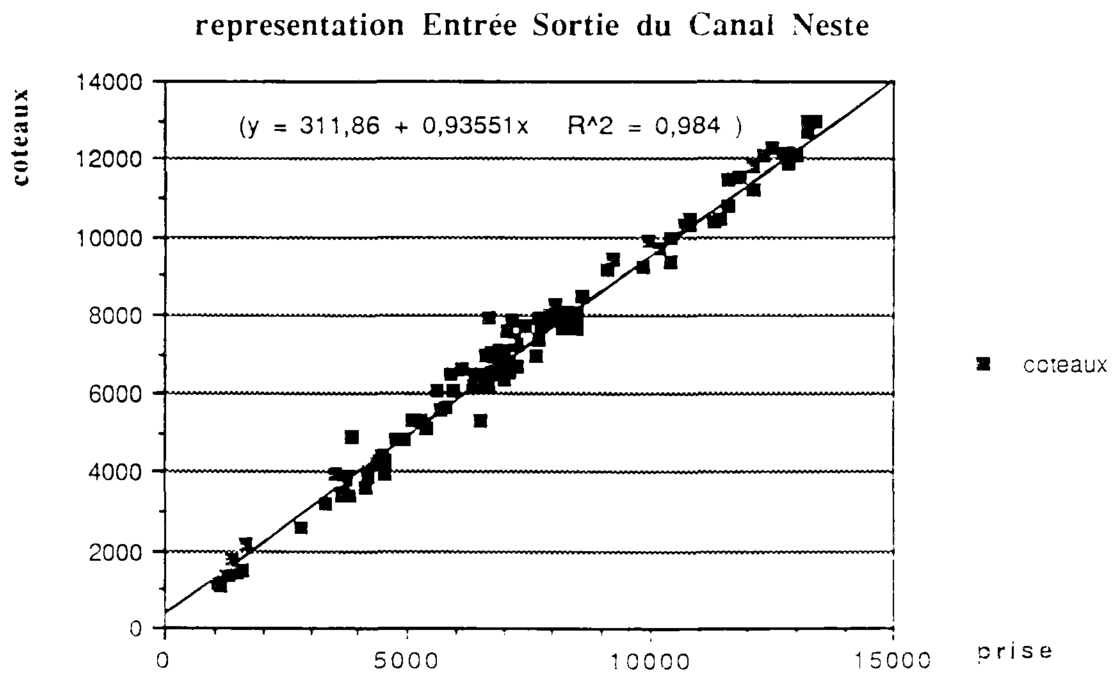
- hauteurs de pluie à la station de LANNEMEZAN (variable **pluie**);

- cumul des prises d'alimentation des rivières et canaux de Gascogne (variable **coteaux**);

- débit moyen dérivé à l'entrée du Canal NESTE à la prise de SARRANCOLIN (variable **prise**).

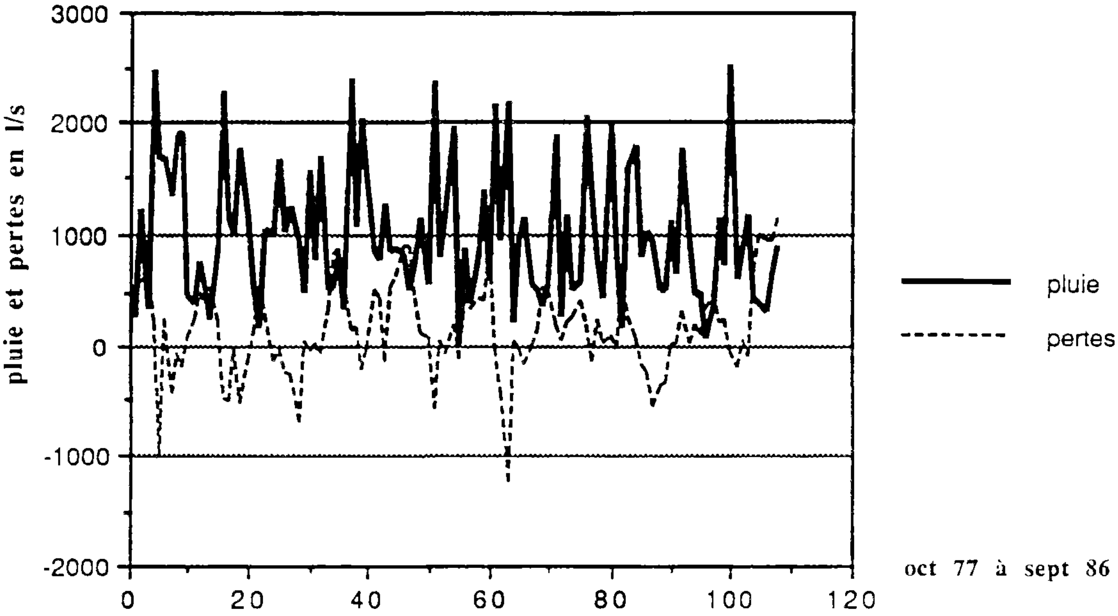
De l'influence de la pluviométrie

Si on ne considère que les variables prise et coteaux, on a un très bon ajustement linéaire comme le montre la figure ci-dessous:

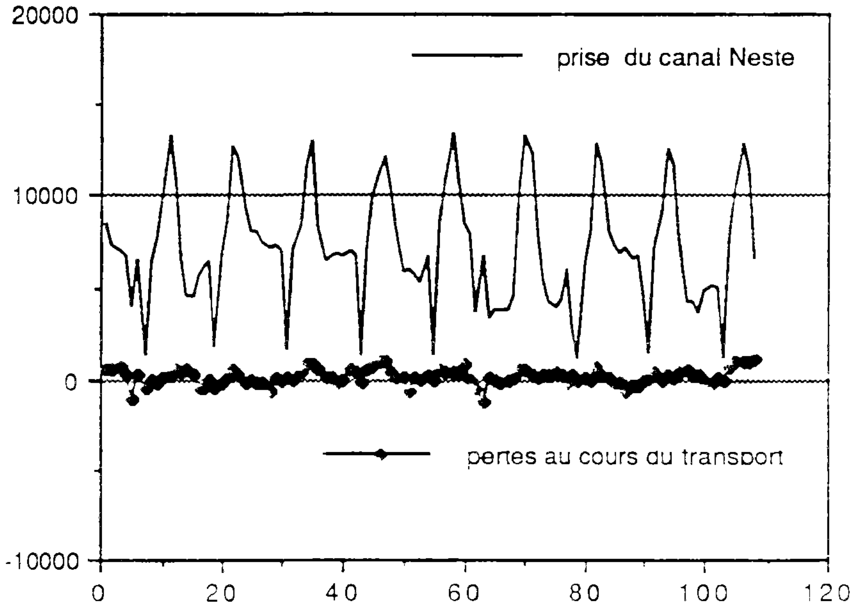


La présence d'un terme constant est due à l'influence moyenne du captage de ruissellement et du drainage du plateau de Lannemezan que réalise le canal sur les quelques 22 Km de son tracé. La figure ci-dessous qui visualise sur le même graphe les pertes du systeme (coteaux- prise) fait clairement apparaitre l'influence de cette dernière variable :

Evolution inverse de la pluviométrie et des pertes



Prise et pertes sur le CANAL



Oct 77 à Sept 86

Modèle complet

On a, entre les trois variables, la matrice des corrélations suivantes:

	coteaux	prise	pluie
coteaux	1.000	0.992	-0.122
prise	0.992	1.000	0.176
pluie	-0.122	0.176	1.000

Un modèle linéaire avec terme constant montre une valeur du Student associée à cette constante très faible.

variables	coefficient	ecart -type	Student
constante	-13.2	106.8	-0.124
prise	0.944	0.011	88.5
pluie	0.262	0.055	4.735

On accepte donc l'hypothèse que le terme constant est nul, pour calculer un modèle sans terme constant, ce qui nous donne pour prévoir la variable coteaux:

variables	coefficient	ecart -type	Student
prise	0.943	0.011	149!
pluie	0.257	0.055	6!

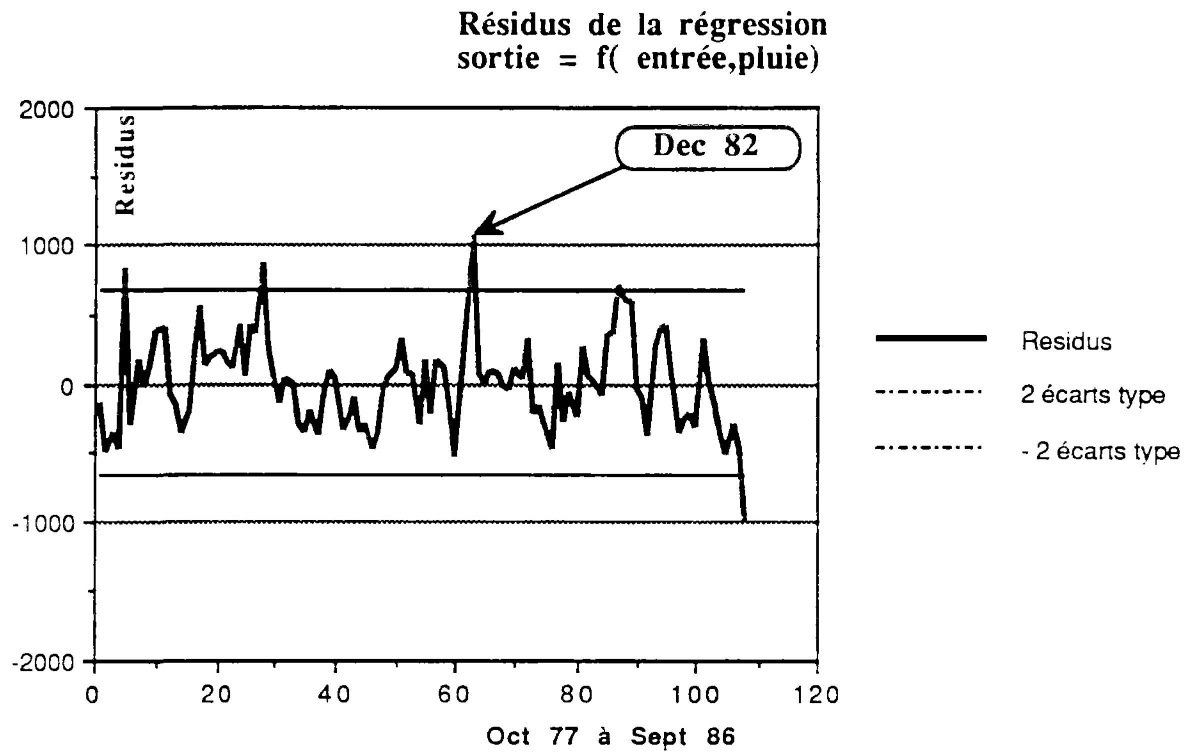
R^2 associé : 0.987 (Valeur du Fisher: 3979 !)
Ecart-type du résidu : 338.45
Statistique de Durbin-Watson : 1.07

Le modèle :

(sortie aux **coteaux**) = 0.94 (entrée a la **prise** NESTE) + 0.26 (**pluie** à LANNEMEZAN)

fournit donc une très bonne approximation de la perte au cours du transfert par le canal Neste avec une erreur d'écart-type 340 l/s.

Les résidus ne présentent pas de structure particulière (pas de saisonnalité, 4 observations sur 108 hors de l'intervalle à 95 %). En particulier, on trouve qu'il s'est passé un problème en décembre 82, mais les interventions sur le canal début 1983 ne paraissent pas avoir modifié de façon significative le total des fuites.



Conclusions

On retiendra pour le débit sortant du canal:

- une perte de 6 % par transport sur le canal,

- un apport parasite en l/s drainant 0.26 fois la Pluviométrie à LANNEMEZAN en mm,

- une amplitude d'erreur correspondant à 350 l/s sur le canal.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 12

Incertitudes sur l'objectif et sur le modèle dynamique.

DECEMBRE 91

E. PARENT

EXEMPLES D' INCERTITUDES SUR L'OBJECTIF ET SUR LE MODELE DYNAMIQUE.

Incertitude sur l'objectif

Considérons à titre illustratif, un barrage dans l'état de stock x_1, fonctionnant a l'horizon de un pas de temps pour lequel on veut satisfaire les deux critères :

$$\text{Min } (x_2 - x_{obj})^2 \quad \text{(régulation du stock)}$$

$$\text{Min } (u - u_{obj})^2 \quad \text{(régulation du lâcher)}$$

avec $x_2 = x_1 + Q - u$

où : x_2 désigne le stock en fin de période, x_{obj} en est la valeur idéale

Q désigne l'apport au barrage dont on ne prendra pas en compte ici le caractère aléatoire

u est le lâcher que le gestionnaire commande

u_{obj} en représente la valeur de référence

Considérons la famille des objectifs :

$$p\,(x_2 - x_{obj})^2 + (1 - p)\,(u - u_{obj})^2 = L(p)$$

où p est une variable aléatoire uniforme sur [0,1].

On calcule facilement que le lâcher optimum est :

$$u(p) = p\,(x_1 + Q - x_{obj}) + (1 - p)\,u_{obj}$$

compromis entre :

* souhaits pour la régulation du stock $x_1 + Q - x_{obj}$ et
* souhait correspondantsur les débits u_{obj}

L'objectif optimum correspondant est :

$$L^*(p) = p(1 - p)\left(x_1 + Q - x_{obj} - u_{obj}\right)^2$$

En l'absence de connaissance précise sur la pondération entre les critères de régulation du stock et de régulation des débits que le gestionnaire souhaite établir, le modélisateur prendra sûrement pour pondération une valeur "moyenne", c'est a dire sur cet exemple la valeur moyenne de 1/2 d'où une décision :

$$u(1/2) = 0{,}5\left(x_1 + Q - x_{obj} + u_{obj}\right)$$

et un coût résultant :

$$1/4\left(x_1 + Q - x_{obj} - u_{obj}\right)^2$$

Cette incertitude économique a un coût mesuré par :

$$\left(L^*(1/2) - L_*(p)\right)$$

En moyenne sur les valeurs de p elle se chiffre donc par :

$$\int_0^1 L^*(\frac{1}{2} - L^*(p))\ 1_{[0,1]}\ dp$$

soit ici : $\frac{1}{12}\left(x_1 + Q - x_{obj} - u_{obj}\right)^2$

c'est à dire encore : $33\%\ L^*\left(\frac{1}{2}\right)$

Cette quantité, liée à notre incertitude sur l'objectif de la gestion, mesure la valeur de l'information attachée à la levée des incertitudes sur les critères. Le risque encouru par la méconnaissance de l'objectif exact à viser peut donc, comme dans cet exemple, être extrêmement important. Ceci souligne la nécessité pour l'homme d'étude de travailler en liaison étroite avec le responsable de l'ouvrage et d'arriver ensemble à formuler valablement les objectifs de fonctionnement de l'ouvrage. Néanmoins ce type de situation se traite en étendant la notion d'espérance du critère à optimiser aux paramètres de la fonction objectifs sans problèmes majeurs puisqu'il est raisonnable de supposer que les aléas naturels et les incertitudes sont des variables indépendantes.

Incertitude sur la dynamique

Les incertitudes peuvent également porter sur la dynamique d'évolution d'un système. Etudions sur le cas d'étude suivant adapté de TAPIERO(1982) quelles peuvent en être les conséquences pour les règles de gestion.

Supposons un système à deux pas de temps, d'équation d'évolution monodimensionnelle :

$$x(t+1) = \rho\ u(t) + \varepsilon(t)$$

où ρ est un paramètre inconnu gaussien de moyenne μ et de variance τ^2, tandis que $\varepsilon(t)$ est une séquence de gaussiennes indépendantes centrées de même loi et de variance de variance σ^2.

Le problème stochastique est de trouver :

$$u_1 = u_1\,(\sigma^2, \mu, \tau^2)$$

$$u_2 = u_2\,(x_2, u_1, \sigma^2, \mu, \tau^2)$$

de manière à minimiser le critère quadratique :

$$J = E\left\{x_2 + x_3 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{1}{2}u_2^2\right\}$$

Si ρ était connu, la meilleure commande serait $u_1 = u_2 = -\rho$.

Dans le cas ρ inconnu, une stratégie possible consiste à prendre $u_1 = -\rho_0$, $u_2 = -\rho_1$, où ρ_0 est la moyenne de la distribution *a priori* pour ρ et ρ_1 la moyenne après observation de x_2 et fixation de u_1.

Supposons u_1 fixé, en appliquant le théorème de Bayes, on a pour ces lois normales :

$$\rho_1 = \frac{\rho_0\ \sigma^2 + \tau^2{}_0\ u_1\ x_2}{u_1^2\ \tau^2{}_0 + \sigma^2}$$

$$\tau_1 = \frac{\tau^2{}_0\ \sigma^2}{\tau^2{}_0\ u_1^2 + \sigma^2}$$

On voit que si u_1 est grand, alors la variabilité de ρ après observation de u_1 est faible : une valeur élevée de la commande permet de préciser la valeur de ρ. *A contrario*, si u_1 est voisin de 0, ρ_1 # ρ_0 et τ_1 # τ_0.

Dans ce cas :

$$E\left\{L_2\,(x(2), u(2), 2) + V_{\mathrm{Final}}(x(3), 3)\right\} = \rho_1\, u_2 + \frac{1}{2}u_2^2$$

Ce coût futur est minimum pour $u_2 = -\rho_1$. Il vaut alors :

$$-\frac{1}{2}\left(\frac{\rho_0\ \sigma^2 + \tau^2{}_0\ u_1\ x_2}{\tau^2{}_0\ u_1^2 + \sigma^2}\right)^2$$

Soit : $$-\frac{1}{2}\left(\rho_0^2 + \frac{\rho_0^2\, u_1^2}{u_1^2\, \tau^2{}_0 + \sigma^2}\right)$$

La première phase d'apprentissage a donc permis une gain de
$$\frac{1}{2}\,\frac{\rho_0^2\, u_1^2}{u_1^2\, \tau^2{}_0 + \sigma^2}.$$

On voit néanmoins qu'il existe une valeur optimale de u_1, J valant en effet :

$$\rho_0\, u_1 + \frac{1}{2} u_1^2 - \frac{1}{2}\left\{\rho_0^2 + \frac{\rho_0^2\, u_1^2}{u_1^2\, \tau^2{}_0 + \sigma^2}\right\}$$

Le compromis pour u_1 équilibre le coût de la décision au premier pas de temps et le bénéfice associé à l'apprentissage après le 1er pas de temps.

On voit que (si $\rho_0 > 0$) :

-1) si σ^2 la variance de ε_t est faible, u_1^* est proche de - ρ_0, car dans ce cas, on n'a quasiment pas besoin de tenir compte des perturbations induites par l'aléa du système;

-2) si σ^2 est modéré, u_1^* est nettement différent de - ρ_0 (il ne faut pas juste optimiser à court terme);

-3) si σ^2 est grand, u_1^* est proche de - ρ_0 (il ne sert à rien d'essayer d'optimiser, on aurait pu se contenter d'apprendre et de réactualiser au pas de temps suivant).

Sur cet exemple, il apparait qu'à cause de la dynamique, l'aléa naturel décrit ici par σ va interagir sur l'incertitude des paramètres du modèle d'état ce qui, en cascade, rend la situation de plus en plus complexe.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

(ENPC-ENGREF) CERGRENE

ELABORATION DES CONSIGNES DE GESTION DES BARRAGES RESERVOIRS

ANNEXE 13

Modéle de gestion incluant la production agricole.

DECEMBRE 91

E. PARENT

VERS UNE APPROCHE PLUS ECONOMIQUE

Le compromis précédent traduisant un équilibre entre la possibilité de passage en crise (arrêt des irrigations) et la nécessité de maintenir un contrat de salubrité aussi élevé que possible. Au cours de la sécheresse de 1989 dans le Sud-Ouest, EDF a déstocké de l'eau de ses réserves de montagne pour maintenir les possibilités d'irrigation. On a pu ainsi déterminer un prix de l'eau marginale en cas de crise. On peut alors penser rechercher une gestion optimale entre :

- un bénéfice économique de la production agricole

- un coût lié au risque de devoir faire appel aux déstockages d'EDF pour maintenir irrigation et salubrité.

La facture EDF de déstockage

Voici quelques coûts de déstockage des réserves EDF dans le bassin Adour-Garonne. Ces tarifs ont été établis par les économistes de EDF.

- Tarifs appliqués lors de l'été 1989 (sans prendre en compte l'amortissement des investissements réalisés)

0,35 F/m^3 sur la Garonne et l'Ariège pour un volume de	11,1 Mm^3
0,63 F/m^3 Réserves Neste sur la Neste pour un volume de	11,8 Mm^3
0,35 F/m^3 Réserves Neste sur la Garonne pour un volume de	1,69 Mm^3
0,12 F/m^3 sur le Tarn pour un volume de	1,5 Mm^3
Total	26,09 Mm^3

- Nouveaux tarifs

Pour des déstockages plus systématiques, il faut considérer des tarifs plus réalistes (selon EDF), en prenant en compte l'amortissement des investissements. On peut donc envisager des tarifs 2 à 3 fois plus importants.

EDF a fourni la fourchette suivant - pour l'alimentation de la Région Midi-Pyrénées (hors système Neste).

les 10 premiers Mm^3	= 5 MF	soit 0,50 F/m^3
les 10 Mm^3 supplémentaires	= 7 MF	soit 0,70 F/m^3
les 10 Mm^3 supplémentaires	= 10 MF	soit 1,00 F/m^3

Au maximum 30 Mm^3.

On peut ainsi établir une fonction convexe de coût, linéaire par morceaux, de la quantité d'eau sollicitée. On appelle $K_{EDF}(S_{final})$ cette fonction . Elle sera nulle pour S_{final} positif. Sinon, on sollicite une quantité ($- S_{final}$) à partir de déstockage EDF au tarif proposé ci-dessus.

Le bénéfice agronomique

HALL et BUTCHER (1968) considéraient que la valorisation des eaux destinées à l'irrigation consiste à optimiser les recettes agricoles I avec :

$$I = \left\{ \prod_{t=0}^{T} \rho_t \,(u(t);\ x(t)) \right\} I_{max}$$

avec : t : pas de temps choisi

I_{max}: recettes agricoles maximales jusqu'à la période T s'il n'y a pas de déficit en eau

I : gain réel à optimiser

ρ_t : coefficient de rationnement pour k période t

u(t) : commande du système au temps t , qui comprend notamment la quantité d'eau à délivrer pour l'irrigation

x(t) : état du système à l'instant t incluant en particulier la réserve h(t) du sol qui permet de retrouver le besoin en eau des plantes.

En principe, une irrigation rationnelle doit délivrer le besoin B(t) en eau des plantes, que l'on peut estimer par :

$$B(t) = RFU - h(t) + K_c \; ETP - P(t)$$

où : RFU : réserve utile facilement utilisable

h(t) : réserve sol au début de la période t

K_c : coefficient cultural

ETP : évaporation potentielle

p(t) : pluie pendant la période t

En fait, si on rationne les cultures en irrigant d'une quantité $d(t) < B(t)$, la fonction de production suivante décrivant l'effet d'un rationnement au temps t_0 a été proposee dans le bulletin 33 de la FAO (1979) :

$$\left\{1 - \frac{I}{I_{max}}\right\} = K_r(t_0)\left(1 - \frac{d(t_0)}{B(t_0)}\right)$$

Le calcul obtenu par interprétation d'expérimentations agronomiques, est valable à condition que le rationnement ne soit pas trop intense $d(t) > \frac{1}{2} B(t)$ et que le rationnement ait lieu à un stade de culture donné pour lequel on peut déterminer le coefficient de rationnement $K_r(t_0)$ qui dépend du stade cultural et du type de culture.

Nous ferons l'hypothèse que la même relation est valable dans un domaine plus large et dans le cas de rationnements multiples de telle sorte que le coefficient $\rho_t\ (u_t, x_t)$ s'écrive sous la forme :

$$\rho_t\ (u_t; x_t) = 1 - K_r(t)\left\{\frac{B(t) - d(t)}{B(t)}\right\}$$

Modèle général

Les commandes u(t)

Le vecteur u(t) comprend les trois composantes suivantes :

- le contrat de salubrité $r_g(t)$ affiché pour la Gascogne durant la période t;

- un indicateur booléen indiquant le niveau minimum requis pour la Neste: en situation normale, on doit avoir $r_n(t) \geq 4\ m^3/s$; en situation de crise ou de pré-crise, on peut accepter $4\ m^3/s > r_n(t) > 3\ m^3/s$;

- le niveau de rationnement proposé sur le systèle durant la période t est $\alpha(t) = \frac{B(t) - d(t)}{B(t)}$. Pour calquer l'organisation des tours d'eau, il suffit que $\alpha(t)$ prenne des valeurs en septième. Cette modélisation suppose que l'on puisse commander les quantités prélevées par l'agriculture et imposer un rationnement aux irrigants, ce qui est loin d'être le cas actuellement, même si les évènements récents ont adouci les positions de ces derniers.

Le vecteur d'état x(t)

Il comprend quatre composantes dont deux pour l'hydraulique et deux pour l'agronomie:

- le niveau de la Neste à l'instant précédent N(t-1). C'est la mémoire du phénomène hydrologique. Il permet de calculer la probabilité conditionnelle de N(t), l'apport au cours de la semaine t (voir aussi annexe hydrologique), car on peut écrire une relation de transition :

$$\text{LogN}(t) = a_t \,\text{Log N}(t-1) + b_t + c_t\, \varepsilon(t)$$

où a_t, b_t et c_t sont des paramètres ne dépendant que du temps, et $\varepsilon(t)$ une variable aléatoire gaussienne indépendante des réalisations précédentes ou suivantes;

- le réservoir aggloméré du système s(t). Sa relation dynamique d'évolution est :

$$S(t+1) = S(t) - L(t)$$

où L(t) désigne le lâcher globalisé de telle sorte que :

$$L(t) \geq 0$$

$$L(t) = - r_g(t) + N(t) - r_n(t) - D(t) + G(t)$$

avec : $r_n(t) = q_{objN} + \text{Sup}\,(0, N(t) - \text{Transfert max} - q_{objN})$

en régime normal, Transfertmax est la capacité de transfert maximum du canal de la Neste ($14\ m^3/s$)

ou : $r_n(t) = q_{minN} + \text{Sup}\,(0, N(t) - \text{Transfertmax} - q_{minN})$

en régime de pré-crise ou de crise.

B(t) : demande en eau des plantes

$D(t) = \alpha(t)\, B(t)$: quantité pour l'irrigation

N(t) : apport de la Neste, c'est une variable aléatoire

G(t) : apport aléatoire des rivières de Gascogne

- la première des variables de nature agronomique est le niveau du réservoir sol h(t). Il évolue selon les équations :

$$h(t+1) = \text{Inf}\,(R_{sol}, \text{Sup}\,\{0, h(t) + P(t) - ETP(t)\})$$

en simplifiant son fonctionnement comme un réservoir de capacité maximale R_{sol}.

La demande en eau des plantes :

$$B(t) = \text{Sup}\,\{0, RFU - h(t) + K_c\, ETP(t) - P(t)\}$$

fait le lien entre les variables d'état hydraulique et le niveau du réservoir sol.

- la seconde variable d'état pour l'agronomie tient lieu de mémoire des restrictions pour l'irrigation :

$$\beta(t) = \prod_{\tau=0}^{t} \rho_\tau \,(u(\tau);\, x(\tau))$$

$$\beta(t) = \prod_{\tau=0}^{t} \{1 - K_r(\tau)\, \alpha(\tau)\}$$

soit : $$\beta(t) = \beta(t-1)\, \{1 - K_r(t)\, \alpha(t)\}$$

de telle sorte que $\beta(t)$ représente la restriction par rapport à la récolte maximale due à l'influence des rationnements successifs de l'irrigation jusqu'à la période t.

Notons que si l'on imposait des contraintes de "continuité" des tours d'eau du style :

$$|\alpha(t+1) - \alpha(t)| < \Delta_{max}$$

il faudrait également ajouter une autre dimension d'état représentant la connaissance du mode de gestion au temps précédent (crise avec restriction $\alpha(t-1)$ ou mode de pré-crise ou mode normal sans aucune restriction).

Fonctions d'évaluation

En résumé, en posant :

$$u(t) = \begin{pmatrix} \text{contrat de salubrité } r_g(t) \\ \text{mode normal ou non} \\ \text{restriction d'irrigation } \alpha(t) \end{pmatrix}$$

$$x(t) = \begin{pmatrix} \text{niveau de la réserve } S(t) \\ \text{mémoire de l'hydrologie de la Neste } N(t-1) \\ \text{niveau du réservoir sol } h(t) \\ \text{influence économique des rationnements } \beta(t) \end{pmatrix}$$

on obtient un modèle dynamique :

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), t, \omega(t))$$

où le vecteur aléatoire $\omega(t)$ est tel que :

$$\omega(t) = \begin{pmatrix} \text{innovation } \varepsilon(t) \text{ des apports de la Neste} \\ \text{apports } G(t) \text{ des rivières de Gascogne} \\ \text{pluviométrie } P(t) \text{ sur le bassin} \\ \text{évaporation transpiration potentielle } ETP(t) \end{pmatrix}$$

La fonction d'évaluation d'une stratégie peut alors se mettre sous la forme :

$$J(u) = E\left\{ \sum_{t=0}^{T-1} L(x; u; t) + \left\{ K_{EDF}(S(T)) - I_{max} \cdot \beta(T) \right\} \right\}$$

K_{EDF} : coût final dû à l'achat d'eau à EDF

I_{max} : production agricole théorique que l'on obtiendrait en irrigant de façon à toujours satisfaire le besoin des plantes.

L(x, u, t) est un coût lié au dommage instantanné lorsque la salubrité sur les rivières de Gascogne n'est pas satisfaite. On voit que si l'on pose L = 0 (avec une contrainte $r_g > q_{minG}$), la valeur du contrat de salubrité ne figure plus dans le vecteur de commande car la trajectoire optimale est donnée en fixant $r_g(t) = q_{minG}$ et en jouant sur le rationnement pour l'irrigation.

Deux solutions s'offrent alors à nous. Soit garder L(x, u, t) sous la forme donnée au châpitre précédent (quadratique en r_g), soit imposer une pénalisation terminale sur le stock fianl S_T qui vient s'ajouter à K_{EDF}.

Dans le cas $S_T \geq$, qui se manifeste notamment lorsque la politique de gestion a été trop conservatrice ($r_g(t)$ toujours au plancher q_{minG}), il faut alors définir une fonction $K_{salubrité}$ (S_T) qui soit croissante avec S_T et pénalise la sous-utilisation de la ressource au cours de l'étiage. On peut commencer l'étude avec :

$$K_{salubrité}\,(S_T) = K_{sal} \cdot S^{n.T} \qquad n > 1$$

car la fonction $K_{salubrité}(S_T)$ devrait être strictement convexe avec pente nulle en 0 : terminer la période de gestion proche d'un stock final nul est l'idéal, tandis que plus le stock final conservé est important, moins la gestion a été efficicace.

Cette seconde forme de solution sans coût instantanné présente quelques désavantages. SD'abord, elle reporte sur l'horizon de gestion la sanction d'une sous-estimation du contrat de salubrité et l'affaiblit à travers la chaîne du calcul des espérances conditionnelles successives. Ensuite, il faut régler finement les pondérations relatives de chacun des deux objectifs afin d'éviter qu'en situation normale, on rationne l'irrigation pour assurer la salubrité.

Problème de résolution numérique et modèle restreint

Actuellement, les modèles de type réservoir sol n'ont pas donné de résultats opérationnels acceptables. Par exemple, le modèle proposé par le CEMAGREF pour évaluer la demande en eau des plantes pour la gestion de l'Astarac a été vite suppiante pour les applications opérationnelles, par un réseau de conseillers agricoles qui produit quotidiennement, bien qu'empiriquement, des prévisions de consommation.

De même, FANG (1988), traitant d'un barrage utilisé pour l'irrigation et la production hydroélectrique, a supposé que la demande en eau des plantes était une variable déterministe.

Pour notre part, nous déconnectons cette valeur du niveau h(t) du réservoir sol, en supposant que sur la période historique, les deux quantités B(t) et D(t) ont toujours été égales, et nous supposons que B(t) est une grandeur aléatoire dont on connaît la loi.

Cette première approche, considérant que les B(t) sont sans corrélation temporelle, permettrait de ne garder qu'un vecteur d'état de dimension 3.

Une seconde approche conditionnant les valeurs de B(t) d'un pas sur l'autre nous laisse avec un état de dimension 4 et un problème délicat à résoudre tel quel par programmation dynamique stochastique.