

## L'utilisation intégrée des ressources en eau dans le cadre de l'aménagement en milieu naturel

Mechin Y.

L'eau

Paris : CIHEAM  
Options Méditerranéennes; n. 14

1972  
pages 76-85

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI01.0483>

To cite this article / Pour citer cet article

Mechin Y. L'utilisation intégrée des ressources en eau dans le cadre de l'aménagement en milieu naturel. *L'eau*. Paris : CIHEAM, 1972. p. 76-85 (Options Méditerranéennes; n. 14)



<http://www.ciheam.org/>  
<http://om.ciheam.org/>

Y. MECHIN

# L'utilisation intégrée des ressources en eau dans le cadre de l'aménagement du milieu naturel

L'utilisation de l'eau et les aménagements qu'elle suscite ont toujours été au cœur de nos civilisations humaines. L'eau est en effet synonyme de vie; elle intervient dans la plupart de nos activités essentielles, tantôt sous forme d'une ressource utilisable ou en tant que facteur de production : énergie hydraulique, irrigation, eaux potables et industrielles, navigation, tantôt sous forme d'une nuisance qu'il s'agit de maîtriser : protection contre les crues, remontée de nappes alluviales. Au stade le plus avancé du développement d'un territoire, l'eau tend à devenir un bien périssable, qu'il importe de préserver pour maintenir les conditions et les qualités de notre environnement. Enfin elle a constitué de tout temps un attrait, que nous exploitons aujourd'hui de plus en plus largement pour nos loisirs, et dans nos aménagements touristiques.

L'aménagement et la gestion des ressources en eau d'un bassin fluvial nécessitent des études nombreuses, et délicates, dont la complexité augmente en fonction de la valeur croissante de l'eau avec le développement économique.

A cette complexité croissante des études trois raisons peuvent être données :

— L'aménagement d'un bassin doit être envisagé dans son sens global et les études doivent intégrer les facteurs tant techniques que socio-économiques qui interviennent dans la recherche d'un équilibre harmonieux entre ressources et besoins.

— Les maîtres d'œuvre, en général les Pouvoirs Publics, cherchent à affiner les éléments de décision concernant les aménagements projetés d'une part à cause des investissements très lourds qu'ils entraînent, d'autre part à cause des effets et des conséquences très étendus qu'ils occasionnent sur l'aménagement du milieu naturel et sur le développement économique.

— Enfin le progrès technique et en particulier les méthodes modernes d'investigation faisant appel aux ordinateurs favorisent les recherches élaborées et complexes; elles permettent une analyse plus poussée des problèmes, tant sur le plan physique qu'économétrique.

Ce seront donc quelques-unes de ces méthodes d'études, qui contribuent à éclairer les problèmes qui jalonnent le chemin des « Managers » de l'eau, qui seront présentées ici.

## LE MANAGEMENT DE L'EAU

L'ensemble de ces méthodes est connu sous le vocable venu des États-Unis de « Water Management » qui peut se traduire par : « gestion et préparation aux décisions dans le domaine de l'eau » et plus simplement par « Management de l'eau ». Son but est de définir et de gérer les moyens (c'est-à-dire barrage, centrale hydroélectrique, etc.) et de façon générale les aménagements qui assureront l'équilibre harmonieux et si possible optimum entre les besoins des divers utilisateurs et les ressources en eau d'un bassin en tenant compte des contraintes techniques et socio-économiques de leur emploi.

Quelques exemples simples préciseront le type de questions auxquelles doit répondre le Management de l'eau.

### 1<sup>er</sup> EXEMPLE

Un barrage projeté doit satisfaire deux objectifs : produire de l'énergie et assurer l'irrigation d'une région agricole. Les questions sont les suivantes : quel volume doit-on stocker, quelle doit être la superficie irriguée et quelle quantité d'énergie doit-on produire pour obtenir de cet aménagement la valeur ajoutée maximale.

Sous son aspect bénin cette question n'a pas de réponse immédiate; il suffit pour s'en convaincre de se rendre présent à l'énergie que les apports au barrage sont toujours aléatoires, que l'énergie produite dépend de la hauteur de chute, qui elle-même dépend de l'état de remplissage de la retenue, qu'enfin, pour le périmètre agricole, différents plans de culture sont possibles suivant la quantité d'eau utilisée.

### 2<sup>e</sup> EXEMPLE

Cinq barrages, situés sur différents affluents d'un important cours d'eau, sont projetés dans l'avenir pour soutenir les étiages de cette rivière afin d'assurer, avec une probabilité de satisfaction donnée, la croissance des besoins de la région jusqu'à l'an 2000. Question : dans quel ordre construire ces barrages et selon

quelle chronologie pour minimiser le coût actualisé des investissements ?

Là encore, la réponse n'est pas simple : les apports aux barrages et par conséquent les réserves disponibles sont aléatoires. Les débits d'étiages de la rivière principale sont également aléatoires, et partant la part des besoins devant être satisfaite par les réserves.

### 3<sup>e</sup> EXEMPLE

Dans la recherche du plan d'aménagement agricole d'un périmètre irrigué, on aura à déterminer les activités d'une ou plusieurs familles d'exploitations de manière à optimiser la fonction économique d'ensemble. Il faudra y faire intervenir : les diverses activités possibles en fonction des sols et du climat, les besoins correspondants en cas d'irrigation, en main-d'œuvre, en matériel d'exploitation, etc, les contraintes liées aux surfaces, à l'assolement, au marché, aux circuits en commercialisation, etc; donc un nombre important de paramètres sur lesquels peut influer la décision de la Puissance publique et des intérêts privés.

Il faudra aussi déterminer la loi de croissance des besoins en cas d'irrigation en fonction du développement pour y adapter les aménagements prévus.

Ces trois exemples ne peuvent résumer l'ensemble des problèmes auxquels s'attaquent les méthodes du management de l'eau; ils permettent cependant de situer quelques-unes des difficultés de la tâche des aménageurs dans ce domaine :

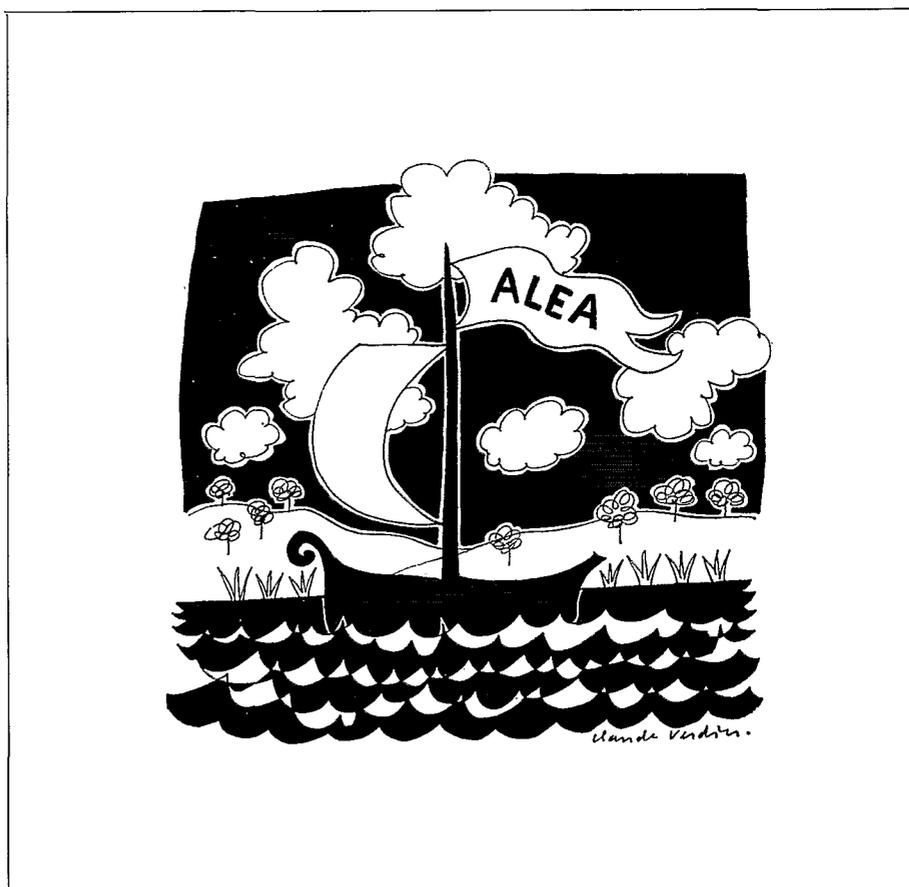
- La prise en compte de l'*Aléa* est souvent déterminante dans ce domaine : malheureusement les lois statistiques qui régissent les phénomènes hydrologiques sont souvent complexes et il faut rester circonspect dans leur emploi; en effet, tel ajustement laissé dans l'ombre les corrélations temporelles des phénomènes climatiques, tel autre ne peut représenter les évolutions de longue durée faute d'observations; tel autre enfin s'applique aux débits moyens, mais se révèle inadéquat dans la représentation des débits extrêmes.

*Ce caractère aléatoire* des ressources en eau est une des principales difficultés rencontrées.

- La deuxième difficulté provient du très grand nombre de paramètres qui oblige souvent à fractionner l'étude globale en *études sectorielles préalables*.

- La dernière difficulté est liée à la connaissance limitée que nous avons encore des lois régissent certains phénomènes physiques ou socio-économiques. Ceci impose souvent l'application de *schémas approchés*.

Ces quelques aspects de la complexité des problèmes abordés par le Management de l'eau expliquent également pourquoi il a fallu attendre l'apparition des gros ordinateurs pour résoudre des systèmes d'équations particulièrement encombrants.



## LES MÉTHODES DE MANAGEMENT DE L'EAU

Abandonnons cette présentation sommaire des problèmes que soulève le management de l'eau, pour nous intéresser à quelques-unes des méthodes d'études récentes qui constituent l'armature de la recherche des solutions appropriées dans ce domaine, méthodes qui peuvent être classées en deux grands chapitres :

— d'une part celles qui se préoccupent des phénomènes physiques liés à l'écoulement des eaux et que l'on a coutume d'appeler les modèles mathématiques hydrauliques;

— d'autre part celles qui font appel aux méthodes et aux modèles de la Recherche Opérationnelle en entendant par là la recherche d'expressions quantitatives permettant d'orienter la prise de décision sur le plan de l'action à exercer dans l'organisation des systèmes économiques, où interviennent des ressources primaires, des équipements et des produits de transformation.

### Les modèles mathématiques hydrauliques

L'aménagement des bassins fluviaux implique, par définition même, une modification du régime hydraulique qui sera souvent très important. Il importe au premier chef, dans l'examen d'un projet quelconque, de prévoir toutes les

conséquences de la modification du régime des eaux tant de surface que souterraines.

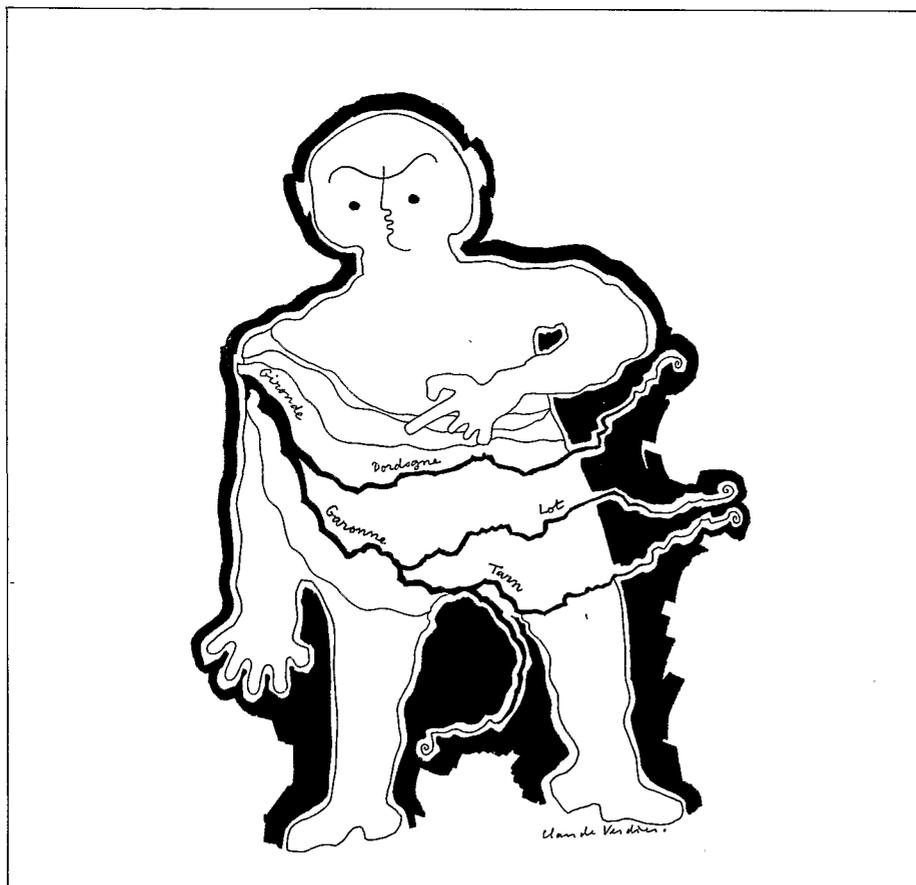
Les modèles mathématiques hydrauliques ont justement pour but d'aborder de tels problèmes. Établis à partir d'une réalité comme par observations et mesures, ils permettent de déterminer les répercussions des aménagements projetés sur les écoulements.

Les questions posées sont en général suffisamment complexes pour qu'il faille faire appel à de tels modèles. On peut en effet s'intéresser :

- aux modifications du régime des crues;
- aux modifications du régime de transport des sédiments;
- aux modifications du régime des étiages, des caractéristiques de la pollution, de la salinité, etc...
- enfin aux modifications du régime des eaux souterraines et en particulier des nappes alluviales.

### *Étude des eaux de surface.*

Le problème qui semble le plus abordable est celui de la propagation des eaux de surface. En effet, le mouvement non permanent des liquides à surface libre est régi par des équations mathématiques bien définies, dans lesquelles interviennent cependant des coefficients empiriques. Ces équations de base qui sont connues depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, n'ont toutefois pu être utilisées pratiquement qu'après l'apparition des Ordinateurs, du fait de la diffi-



culté de leur intégration numérique. Ce n'est donc dans ces dernières années qu'on a pu songer à calculer dans des cas pratiques l'évolution des niveaux d'eau et des débits en régime transitoire, à l'échelle d'un grand bassin fluvial. Jusque là on avait recours presque essentiellement au modèle réduit physique en faisant appel aux lois de la similitude hydraulique.

L'expérience acquise au cours de l'exploitation des programmes de calcul sur ordinateur permet de tirer quelques conclusions d'ordre général :

1. Dans la plupart des cas pratiques on est amené à schématiser le système fluvial; c'est-à-dire que pour parvenir à une représentation efficace il faut procéder à des simplifications, en divisant le système en casiers, en admettant des lois de perte de charges simples représentant assez bien le comportement global si elles ne suivent pas le détail de l'écoulement. Une réalité infiniment complexe est donc représentée par un nombre fini, mais souvent assez grand, de casiers et de coefficients de perte de charge.

2. Une phase très importante dans l'élaboration du modèle est celle du réglage. En effet, les coefficients empiriques qu'on est amené à introduire ne peuvent être appréciés a priori que très grossièrement. Dans la phase du réglage, il convient donc d'ajuster ces coefficients de façon à reproduire aussi fidèlement que possible les hydrogrammes d'écoulement observés dans la nature.

La phase du réglage est importante en ce sens qu'elle permet aussi de comprendre le mécanisme de propagation, d'apprécier les limites et la valeur de la schématisation adoptée et souvent de prévoir, dès ce stade, l'exploitation des ouvrages, de façon à modifier le régime de propagation dans le sens désiré.

3. Enfin dans la phase d'exploitation du modèle, toute modification, soit des conditions aux limites (par exemple du régime du débit en amont), soit de la topographie (par coupures ou endiguements) peut être examinée dans ses effets sur la propagation des écoulements non permanents. Les modifications du modèle peuvent être alors rapidement faites et un grand nombre de cas peuvent être envisagés moyennant seulement une dépense en temps d'utilisation de l'ordinateur.

*Les programmes relatifs au mouvement non permanent des eaux de surface peuvent être considérés comme définitivement au point.* Toutefois, ils ne représentent que l'élément central d'un phénomène plus vaste. En effet, on a souvent à traiter des problèmes liés au transport des sédiments, à l'évolution de la salinité, aux relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

En ce qui concerne le transport des sédiments (charriages et suspension) il faut noter que ce phénomène réagit sur la propagation des ondes de crue en modifiant la forme du lit. Un programme complet d'évolution de l'écoulement non permanent dans les rivières devrait donc prendre en compte la modification des

fonds dus au transport des matériaux solides du lit.

Une difficulté importante dans cette voie provient de ce que les lois du transport des sédiments sont empiriques et beaucoup moins bien étudiées que les lois du transport liquide. Si, dans un cas particulier, ces lois peuvent être exprimées de façon approchée par une loi rationnelle, il est possible d'inclure des modifications automatiques de la forme du lit dans les modèles de propagation des crues.

L'étude de la propagation de la salinité et de certaines natures de polluants, phénomènes importants pratiquement, se heurte à des difficultés essentielles. En effet, envisagé dans sa généralité, le problème concerne l'écoulement non permanent d'un fluide stratifié ou non avec une diffusion liée à des causes diverses (turbulence, instabilité de l'interface, existence d'un mascaret interne). Il serait cependant possible, en faisant des hypothèses simplificatrices — dont la validité devrait être examinée dans chaque cas particulier — de mettre sur pied des programmes de calcul. *L'établissement de tels programmes constitue une voie ouverte* à la recherche qui devrait déboucher sur des applications pratiques dans un délai relativement bref. Récemment on a déjà pu mettre sur pied des programmes pour l'étude des phénomènes de l'auto-épuration biologique le long d'un cours d'eau.

En définitive, les modèles mathématiques hydrauliques dans leur état actuel rendent déjà de grands services et donnent des résultats suffisamment précis, par exemple, pour les études suivantes :

- Influence de modifications du lit (coupures, endiguements, approfondissements) sur la propagation des crues.

- Possibilités de réduire les pointes de crue par la construction de retenues. Détermination des consignes d'exploitation d'un ou plusieurs barrages écrêteurs de crues.

- Influence de l'exploitation d'une retenue sur la production d'énergie, sur la navigation etc. (atténuation des pointes journalières de débit, navigation par écluses, protection des berges et des riverains).

- Influence des modifications du lit sur la propagation de la marée dans les estuaires.

Les améliorations prévisibles à apporter à ces modèles se rapportent à l'inclusion du transport des sédiments et à l'étude de la diffusion de la pollution chimique.

#### *Études des eaux souterraines.*

Les échanges entre le réseau hydrographique et les nappes souterraines connexes sont souvent importants. S'ils sont relativement négligeables devant les débit de crues, ils peuvent constituer en étiage la totalité du débit disponible des rivières. Le sens même de ces échanges est quelquefois mal connu : la rivière draine-t-elle une nappe de versant ou, au contraire,

alimente-t-elle la nappe aquifère? Le lit de la rivière est-il ou non colmaté? En raison de la propagation relativement lente des ondes de pression dans les nappes, des observations fragmentaires risquent de provoquer des conclusions erronées par utilisation de lois hydrodynamiques en elles-mêmes irréprochables. Que dire alors des évaluations quantitatives qu'il est nécessaire de faire si l'on doit prévoir, par exemple, le comportement d'une nappe en fonction de modifications artificielles du régime de la rivière ou d'un programme d'exploitation intensive des eaux souterraines.

La présence de la rivière constitue une condition aux limites que l'on peut prendre en compte analytiquement par la méthode des images, lorsqu'une schématisation simple de la réalité est acceptable. Même dans ce cas, les calculs peuvent être extrêmement laborieux, par exemple si la nappe est exploitée par de nombreux puits de pompage. Par utilisation d'un ordinateur on pourra cependant exécuter rapidement les calculs qui permettront de déterminer les relations débit-rabattements dans l'ensemble des ouvrages. Réciproquement, un programme de calcul, voisin du précédent, sera à même de définir les caractéristiques moyennes hydrodynamiques de nappe aquifère à partir d'observations de niveaux et de débits. Ces valeurs moyennes présentent un intérêt tout particulier pour élaborer des prévisions d'exploitation, car les déterminations plus localisées (essai pontuel, méthodes de Dupuit-Thiem, de Theis, etc...) peuvent présenter une dispersion considérable, alors que les interprétations globales se recoupent souvent de façon remarquable.

Une autre méthode d'évaluation des caractéristiques moyennes du terrain, consiste à reproduire par le calcul la propagation dans la nappe aquifère des ondes provoquées par les fluctuations de niveau du cours d'eau. Après deux ou trois tâtonnements, on arrive généralement à obtenir un très bon accord entre les observations piézométriques et les résultats de l'intégration numérique.

Dans la situation la plus générale où le cours naturel de la rivière est irrégulier ou sinueux, où les nappes aquifères en contact sont plus ou moins hétérogènes, où les conditions aux limites de ces nappes sont mal définies, la prévision des échanges entre la rivière et les nappes alluvionnaires n'est plus possible avec une précision suffisante sans le secours des modèles mathématiques encore plus élaborés.

Ces modèles procèdent des mêmes phases que les modèles traitant des eaux de surface : établissement, réglage, exploitation.

Le réglage terminé, le modèle mathématique est susceptible de se prêter à une extrapolation fonctionnelle; il suffit d'introduire les changements prévus (variation des niveaux de la rivière, rectifications du cours de celle-ci, implantation des puits de pompage...) dans les données du modèle pour prévoir les répercussions de ces aménagements sur le comportement d'ensemble de la nappe.

## Les modèles de recherche opérationnelle

Dans le cadre de l'aménagement du milieu naturel, la recherche de l'emploi optimal des ressources en eau fait appel aujourd'hui à des méthodes qui nécessitent de plus en plus l'utilisation des ordinateurs, dans le cadre de ce que l'on appelle couramment des modèles mathématiques. On entend par là la schématisation d'un système au moyen d'un ensemble enchaîné de processus de raisonnements logiques et de fonctions mathématiques, qui fournissent soit les éléments quantitatifs du comportement du système qu'on cherchait à représenter, soit les caractéristiques fonctionnelles qui assurent un comportement imposé.

Dans la représentation d'un aménagement du bassin, quels sont ces caractéristiques et ces éléments quantitatifs du comportement et comment sont-ils introduits dans les expressions des modèles? Schématiquement, on peut dire que dans ce cas, le système représenté réalise une transformation des ressources en eau du bassin pour en permettre une utilisation ordonnée aux fins d'un supplément de production ou de consommation.

Parmi les voies et les moyens qui assurent cette transformation, il en est de déterminants, tels que :

- les barrages de régularisation,
- les endiguements de protection contre les inondations,
- les centrales hydro-électriques,
- les réseaux d'irrigation,
- etc.

Chacun d'eux peut être caractérisé par une variable définissant son action et son coût, par exemple :

- la capacité de retenue utile d'un barrage réservoir,
- le débit maximal pouvant être contenu dans un endiguement,
- la puissance installée d'une centrale,
- la superficie irrigable,
- etc.

Ces variables, dont les valeurs déterminent le comportement du système et sur lesquelles on peut avoir une action, sont dénommées précisément variables d'action ou de décision.

Quant aux ressources productibles ou plus simplement aux produits de la transformation, ils résultent des activités provenant de la fourniture d'eau industrielle, de la production agricole d'un périmètre irrigué, de la production d'énergie électrique, de la suppression plus ou moins totale des dommages consécutifs aux crues et parfois des aspects récréatifs et esthétiques qui résultent de l'aménagement projeté.

Entre les variables de décision et les produits, il existe des relations fonctionnelles que l'on englobe sous le terme de « fonction de production ». On exprime par là le concept qui associe à des éléments de production donnés, les valeurs des produits qu'on est susceptible d'obtenir dans des conditions technologiques déterminées. Sauf quelques cas particuliers relativement simples, il s'avèrera la plupart du temps difficile sinon impos-

sible d'exploiter sous une forme mathématique la fonction de production d'un aménagement hydraulique. Mais on pourra, en général, obtenir soit l'expression de ses dérivées partielles pour des valeurs particulières des variables, soit l'expression de certaines relations entre variables de décision et produits, par la formulation de leurs contraintes de dépendance (contraintes technologiques, socio-économiques, financières) et des relations fonctionnelles qui caractérisent certains types de transformations (par exemple : transformation des volumes turbinés en énergie, transformation des apports naturels par une réserve de régulation, transformation de la demande biologique en oxygène le long d'un cours d'eau, etc.).

Après avoir quantifié les transformations résultant de différents aménagements possibles, il faudra enfin définir un critère qui permette d'établir une hiérarchie concluante, assurant le choix du ou des meilleurs d'entre eux. C'est le but assigné à la « fonction économique » ou à la « fonction objectif », expression quantitative dont les valeurs extrêmes (minimale ou maximale) caractériseront les aménagements les plus souhaitables. Dans certains cas, la fonction économique pourra expliquer le bénéfice ou la valeur ajoutée par l'aménagement considéré, et l'objectif sera de définir les valeurs des variables de décision qui maximisent cette fonction. Dans d'autres cas, l'objectif à atteindre pourra être d'assurer au moindre coût actualisé la satisfaction des besoins en eau, dans le cadre du plan de développement envisagé ou défini par la Puissance Publique. Mais de toute façon, chaque fois que l'on pose le problème de l'optimisation d'un aménagement hydraulique, il faut définir sans confusion le critère économique du choix.

Dans bien des cas, le choix final de l'aménagement à réaliser ne résultera pas uniquement de la valeur d'un critère économique, aussi bien ajusté soit-il.

Des éléments d'un caractère essentiellement non négociable mériteront souvent d'être pris formellement en compte, tels que : la sauvegarde de la beauté d'une région naturelle, le maintien d'une population active dans une zone défavorisée, la protection de la faune existante, etc.

Cependant, chaque fois que ce sera possible, la recherche d'une quantification de ces éléments méritera d'être entreprise, pour rester dans la voie d'une rationalisation de la décision.

Dans un premier temps on pourra tenter une approche globale au moyen de modèles d'optimisation. Cependant les schématisations qu'on est conduit à effectuer peuvent déformer la réalité physique ou économique. On est alors amené à utiliser des méthodes moins globales, mais qui peuvent mieux traduire les contraintes réelles : en particulier, non linéarité des relations, caractère aléatoire des variables. Ces méthodes font appel aux modèles de simulation et aux modèles stochastiques.

### Modèles d'optimisations

La conception de l'aménagement d'un bassin, en vue d'obtenir la valeur ajoutée

maximale par l'utilisation de l'eau à diverses fins d'activité économique, nécessite la mise en œuvre de données tellement complexes et d'éléments de décision tellement imbriqués qu'il est légitime pour en tenter une première approche de procéder à des simplifications qui, à première vue, pourraient paraître abusives. Les techniques de la programmation linéaire constituent à cet égard un outil mathématique, dont la puissance d'investigation trouve un large champ d'application, dès qu'on cherche à appréhender les solutions d'ensemble qui maximisent un objectif économique.

Dans son principe cette méthode d'optimisation consiste à écrire, sous forme d'inéquations linéaires, les contraintes auxquelles sont soumises les variables de décision et de rechercher les valeurs à donner à ces variables pour maximiser ou minimiser une fonction objectif linéarisée de ces variables.

Fort heureusement, bien des liaisons qui expriment la transformation des volumes liquides par les aménagements hydrauliques d'un bassin peuvent être traduites sous une forme linéaire. C'est ainsi que la transformation par une retenue des apports sauvages qui l'alimentent peut s'exprimer sous forme de l'inéquation suivante :

$$\text{volume mort de la réserve} < \text{volume disponible dans la réserve} + \text{apport mensuel} - \text{volume mensuel restitué en aval du barrage} < \text{capacité maximale de la réserve.}$$

Parmi ces variables, le volume mensuel restitué en aval du barrage et la capacité maximale de la réserve constituent des variables de décision, dont on cherche à déterminer la valeur par l'optimisation d'une fonction économique qui les implique toutes les deux.

Cette fonction qui peut être du type suivant :

$$\text{revenu actualisé provenant du turbinage} - \text{coût du barrage}$$

constitue l'objectif à maximiser et devra s'exprimer linéairement en fonction des variables de décision choisies.

Dans le cas assez général où par exemple le coût ou le revenu ne serait pas exprimable, sans simplification outrancière, par une fonction linéaire dans un large champ de variation de la variable, on peut linéariser la courbe traduisant la fonction en la décomposant suivant des cordes successives; l'inconvénient est alors d'introduire des variables supplémentaires soumises à de nouvelles contraintes.

Il est possible aussi de tenir compte dans une certaine mesure du caractère aléatoire des apports, en exprimant l'espérance mathématique de la fonction objectif et en remplaçant dans chaque intervalle de temps le volume disponible dans la réserve par l'espérance mathématique de cette variable.

Ce bref aperçu montre qu'on dispose avec les modèles mathématiques de programmation linéaire d'un moyen de traitement des problèmes d'aménage-

ment de bassin beaucoup plus souple qu'on ne pourrait se le figurer à première vue. Mais dans bien des cas le leurre de l'adéquation du modèle à la réalité se paye par la complexité des relations de contrainte, par la longueur des calculs et par la nécessité de recourir à des ordinateurs à très forte capacité de mémoires.

Pour étudier le management de l'eau dans un bassin on peut aussi, moyennant certaines hypothèses simplificatrices, utiliser le « Principe d'Optimalité » défini par Bellman et qui sert de base à la programmation dynamique.

Supposons par exemple qu'on envisage de construire dans un bassin un grand barrage destiné à régulariser les apports pour permettre ou développer des activités multiples telles que : l'irrigation, la production d'énergie, la maîtrise des crues, la navigation, la fourniture d'eau industrielle et potable, la dilution de la pollution, etc...

Pour déterminer le volume optimal de la retenue et le développement optimum de chaque nature d'activité, on est amené à répartir une ressource fractionnable dont on dispose en quantité limitée. Cette ressource, en l'occurrence le volume utile de la retenue, doit être répartie entre les besoins des diverses activités envisagées, de telle sorte que le revenu économique résultant soit maximal.

Ce type de problème peut être résolu en ayant recours à un modèle d'optimisation basé sur les concepts de la programmation dynamique. Schématiquement le principe de résolution consiste à ajouter successivement les activités en répartissant chaque fois la ressource, c'est-à-dire le volume de retenue, de façon optimum entre la nouvelle activité considérée et l'ensemble des activités envisagées auparavant. A l'issue du processus l'optimum obtenu est valable pour l'ensemble des activités. Mais auparavant il aura fallu associer les activités interdépendantes (par exemple l'irrigation et la production d'énergie) et déterminer pour chacune d'elles, le revenu optimal en fonction de la quantité de ressource utilisée (c.à.d. du volume de retenue). Cette étude préalable pourra nécessiter l'emploi de modèles d'optimisation partiels pour chaque nature d'activités.

Si on ne considère maintenant plus un seul, mais un ensemble de sites de retenues possible, le problème qui se pose est de déterminer quels sont les sites à aménager et les volumes de retenue.

Ce problème dans son essence n'est pas très différent du précédent, à condition de considérer que la ressource limitée et fractionnable n'est plus le volume d'une retenue, mais la part régularisable du volume des apports aux différents sites de barrage. On sera donc amené à exprimer pour chaque site envisagé le revenu optimal provenant de la satisfaction des diverses activités, en fonction non plus du volume de retenue, mais du volume régularisé. Ce changement de variable ne constitue pas une grosse difficulté, car on conçoit qu'on peut définir une relation entre le volume de retenue et le volume régularisé en un site de barrage. La

solution du problème posé pour un site devant assurer une pluralité de fonctions constituera donc une entrée dans le système de résolution du problème général d'une pluralité de sites de barrages à buts multiples. Par échelons successifs on peut ainsi traiter des problèmes de complexité croissante.

Ces modèles d'optimisation ne constituent qu'un moyen approché d'appréhender dans leur ensemble les problèmes que pose le management de l'eau dans un bassin. Ils nécessitent en effet une schématisation d'autant plus poussée que l'on cherche à conserver l'avantage de la maniabilité. Le caractère aléatoire des apports, les liaisons fonctionnelles entre les différentes utilisations de l'eau, les dépendances entre les périodes successives dans le temps, l'expression des coûts en fonction des variables de décision, tous ces éléments ne peuvent être pris en compte que moyennant des simplifications équivalent à une distorsion du réel. Il n'en demeure pas moins que l'intérêt fondamental de ces modèles est de fournir un premier choix de solutions.

Une analyse plus fine, mais plus laborieuse et souvent plus onéreuse est obtenue grâce aux modèles de simulation.

#### Modèles de simulation

La simulation d'un phénomène réel à l'aide d'un modèle, est une technique d'études très répandue. Un simulateur de vol, une étude de trafic ou même l'équation d'un phénomène sont des modèles de simulation d'une réalité souvent plus complexe.

Dans le management de l'eau, au niveau d'un bassin fluvial, les modèles sont en général suffisamment complexes pour qu'il soit nécessaire d'utiliser l'ordinateur.

Le modèle est établi à partir des principales règles et liaisons qui régissent l'ensemble étudié. On conçoit donc :

- que des études préalables souvent délicates et pouvant elles-mêmes faire appel à des modèles plus simples soient nécessaires pour établir le modèle final;
- que l'absence de formulation analytique rigide donne à ces modèles une grande souplesse et leur permette de représenter des phénomènes complexes;
- malgré l'existence de certaines règles générales, la formulation d'un modèle adapté à un certain bassin peut être très différente de celle d'un autre bassin.

A la différence des modèles d'optimisation, les modèles de simulation travaillent cas par cas et ne fournissent pas directement la solution optimale. Il faut explorer, par une série d'expérimentation, le domaine des solutions possibles, chacune de ces solutions étant caractérisée par des valeurs des variables de décision qu'on aura fixées à l'avance.

Cependant dans de tels modèles le caractère aléatoire des apports est pris en compte de façon relativement lourde, car pour obtenir des résultats valables, on se contente souvent d'effectuer des essais sur de très longues séquences hydrologiques. C'est pour pallier cette difficulté qu'on a recours à des méthodes plus

synthétiques en élaborant des modèles de simulation stochastiques.

Prenons un exemple :

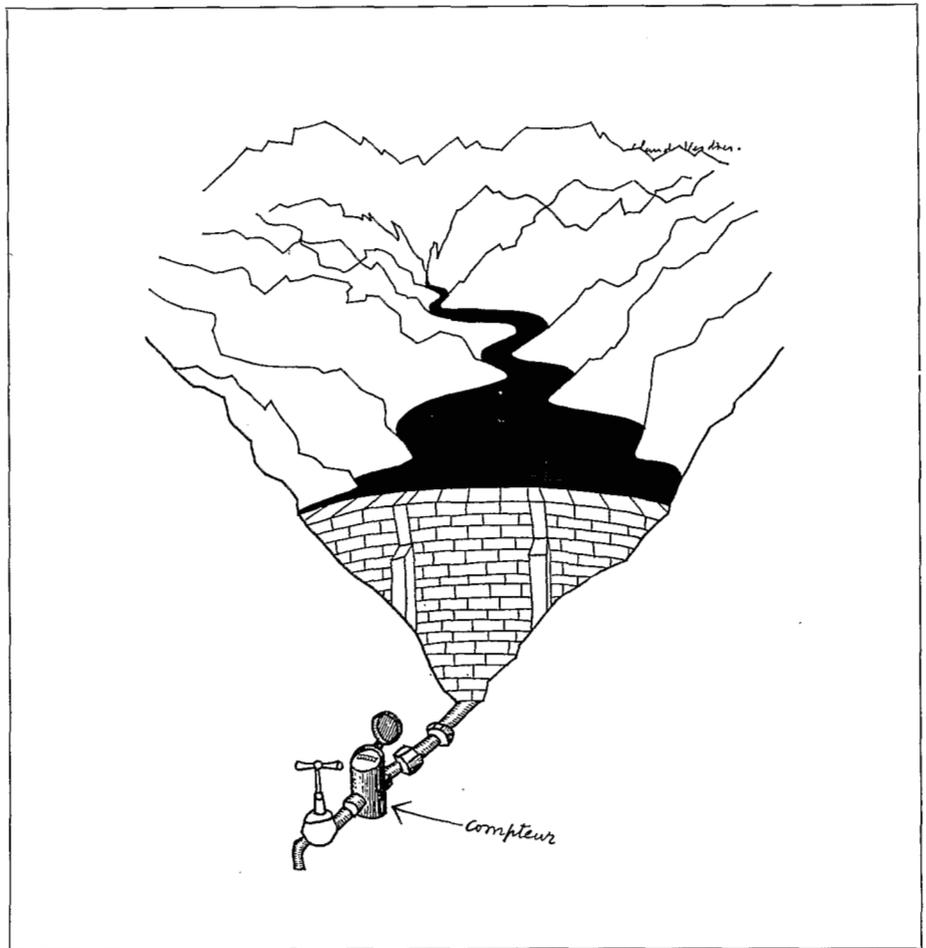
L'aménagement d'un bassin nécessite le plus souvent la constitution de réserves derrière des barrages en vue d'assurer une régularisation des apports dans le temps.

Pour déterminer les capacités à donner à ces réserves, un élément fondamental est la connaissance des conditions dans lesquelles on peut assurer chaque année la distribution d'un certain volume modulé dans le temps, en fonction des exigences de l'utilisation de l'eau. Plus précisément, il faut définir en fonction des capacités des réserves disponibles, la probabilité d'assurer la distribution d'un certain volume annuel régularisé, ainsi que l'importance et les risques des déficits éventuels. Ces éléments statistiques seront utiles pour entreprendre les calculs économiques qui permettent de définir la rentabilité des aménagements.

Pour apprécier ces éléments, la méthode qui vient immédiatement à l'esprit consiste à faire appel à une simulation du fonctionnement des aménagements prévus dans le bassin. C'est-à-dire qu'ayant fixé les volumes disponibles derrière les barrages et la valeur du volume régularisé constituant l'objectif à atteindre, on analysera mois par mois par exemple le fonctionnement des réserves et leur effet sur la régulation des apports du bassin, au cours d'une séquence de plusieurs années successives. La simulation pourra être rendue aussi fidèle à la réalité que possible, en choisissant un intervalle de temps qui convienne à la variabilité des phénomènes et en adoptant des consignes d'exploitation des réserves conformes à la réalité.

Mais pour obtenir des résultats qui tiennent compte de toutes les situations auxquelles on pourrait avoir à faire face au cours de l'exploitation du système, il faut que son fonctionnement soit simulé sur une très longue durée. Plusieurs séquences de 50 ans d'apports mensuels constituent la norme, si on veut tirer des résultats statistiques du fonctionnement d'un aménagement de bassin. Dans ces conditions, on conçoit qu'une simulation sur une séquence historique est rarement satisfaisante, parce que trop souvent limitée dans le temps. D'ailleurs dans son principe même, une telle séquence présente cet inconvénient que les chances d'en observer une semblable à l'avenir sont très réduites. On est donc naturellement conduit, ne serait-ce que pour faire un usage rationnel de la simulation, à constituer des séquences d'apports synthétiques grâce à une analyse statistique poussée de l'échantillon des apports observés dans le passé, analyse basée en général sur des corrélations multiples des apports d'une période par rapport à ceux d'une ou de plusieurs périodes antérieures et plus généralement sur l'adaptation de fonctions statistiques aux apports naturels.

En ce qui concerne l'adoption même d'un type de consignes d'exploitation des réserves dans un modèle de simulation, cela présuppose que l'on a déjà des



lumières sur les résultats économiques de la gestion de ces réserves. En fait la détermination de consignes optimales d'exploitation constitue une étude en soi qui fait nécessairement appel aux calculs des probabilités.

Ces considérations montrent l'intérêt des méthodes permettant de déterminer de façon plus directe les fonctions de probabilité de la satisfaction d'un volume régularisé en fonction des capacités de réserves disponibles dans le bassin, afin de permettre *a priori* un premier choix des caractéristiques optimales des aménagements.

Ces méthodes sont fondées sur l'utilisation de modèles qu'on a dénommés stochastiques, pour marquer le fait qu'on a recours au calcul des probabilités afin d'évaluer les résultats d'un plan d'aménagement ou d'une stratégie d'exploitation des réserves de régulation. Les apports liquides, et dans certains cas, les besoins en eau à satisfaire, sont alors traités comme des variables aléatoires, dont on connaît les lois de probabilité d'occurrence. Le modèle, basé en général sur la théorie des processus de Markov, calcule par récurrence les probabilités d'état du système dans la séquence  $n + 1$ , connaissant l'état du système dans la séquence  $n$  et la matrice des probabilités de transition de l'état  $n$  à l'état  $n + 1$ . Il ne faut donc pas confondre ces modèles avec les modèles du type de *Monte Carlo* où les résultats de la combinaison des différentes grandeurs aléatoires sont cons-

tatés d'après leur fréquence d'apparition, à la suite d'un certain nombre d'essais de fonctionnement du système, et non pas évalués par des méthodes numériques faisant appel au calcul des probabilités.

\* \* \*

La conception de l'aménagement d'un bassin fluvial à buts multiples peut être envisagée maintenant de façon rationnelle. Les progrès de la recherche opérationnelle et des techniques de calcul sur ordinateur permettent d'ajuster au mieux les caractéristiques de ces aménagements.

Avant de terminer cet exposé, nous pensons qu'il est bon de rappeler que des études, souvent fort complexes, sont nécessaires pour établir les équations et évaluer les données que l'ordinateur utilise au cours des calculs. Ces travaux doivent être élaborés par une équipe pluridisciplinaire de spécialistes, car les sujets abordés sont en général trop divers et les connaissances requises trop étendues pour qu'un seul expert puisse intervenir isolément. L'ordinateur n'interviendra que lorsque le problème aura été « mâché », élaboré et simplifié par l'équipe. Alors, il sera d'un grand secours et complètera heureusement les méthodes dont disposent les concepteurs pour tenter d'améliorer les conditions d'utilisation des ressources en eau dans le cadre de l'aménagement intégré du milieu naturel.



ANNEXE II

BASSIN DE LA GARONNE

Cette Étude portant sur les vallées de la Garonne et de ses principaux affluents (440 000 ha) et utilisant des données techniques (climatologie, hydrologie, agronomie) recueillies ou élaborées au cours d'études antérieures, avait pour but de fournir les éléments de décision permettant d'établir le programme d'aménagement hydro-agricole du Bassin de la Garonne.

Pour ce faire on a utilisé :

— un modèle d'optimisation utilisant les techniques de la programmation linéaire pour la recherche du plan de culture optimum à l'intérieur de « terroirs » homogènes.

Le graphique joint montre pour un « terroir » dont les caractéristiques principales sont :

Sol : boubène profonde.

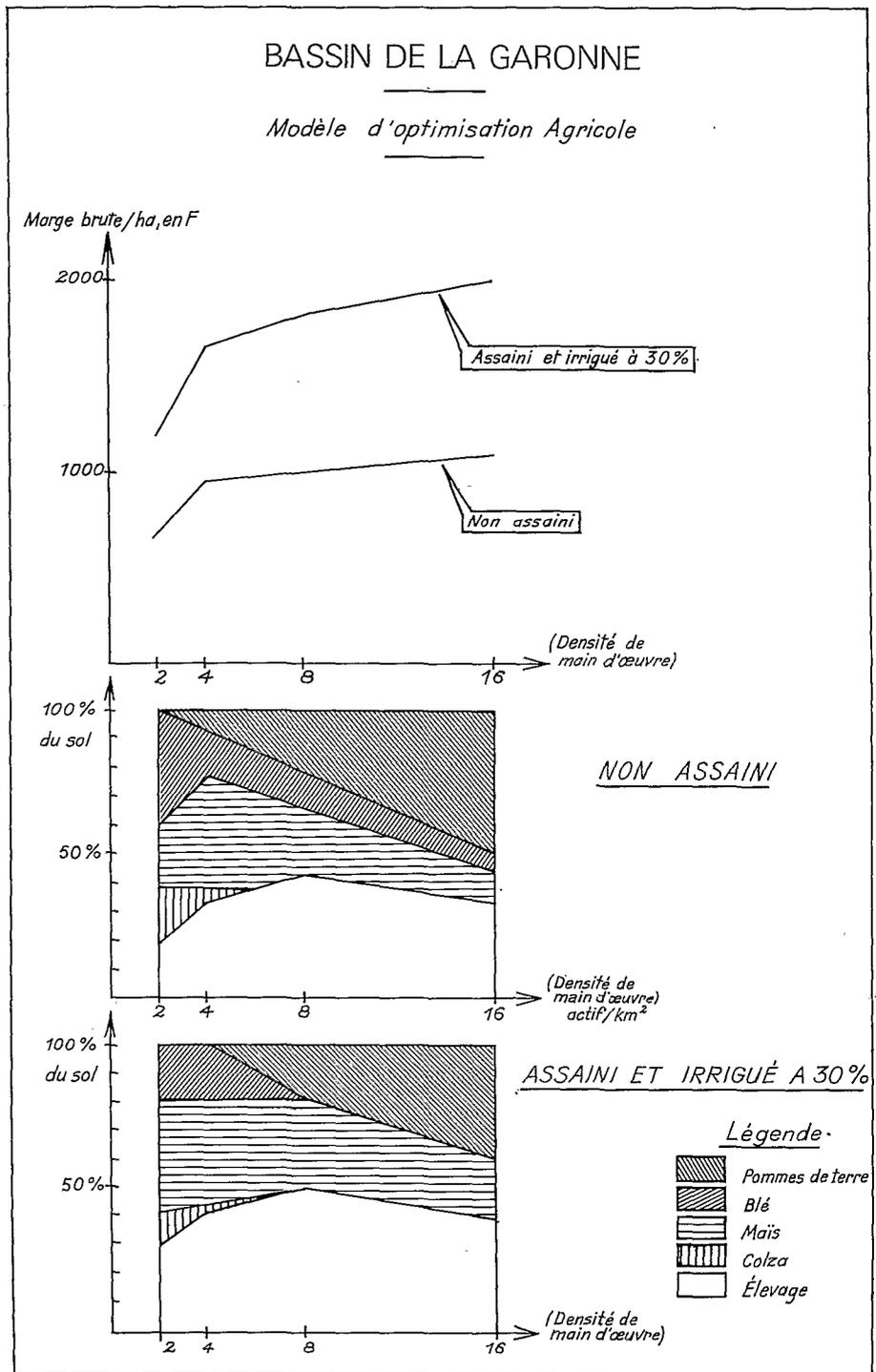
Vocation culturale : polyculture.

Les résultats fournis par le modèle d'optimisation agricole dans les deux cas suivants :

1° terrain non assaini;

2° terrain assaini et irrigué à 30 p. 100.

Le plan de culture optimal et la marge brute maximale correspondants ont été déterminés pour 4 densités de main-d'œuvre : 2, 4, 8 et 16 actifs/km<sup>2</sup>.

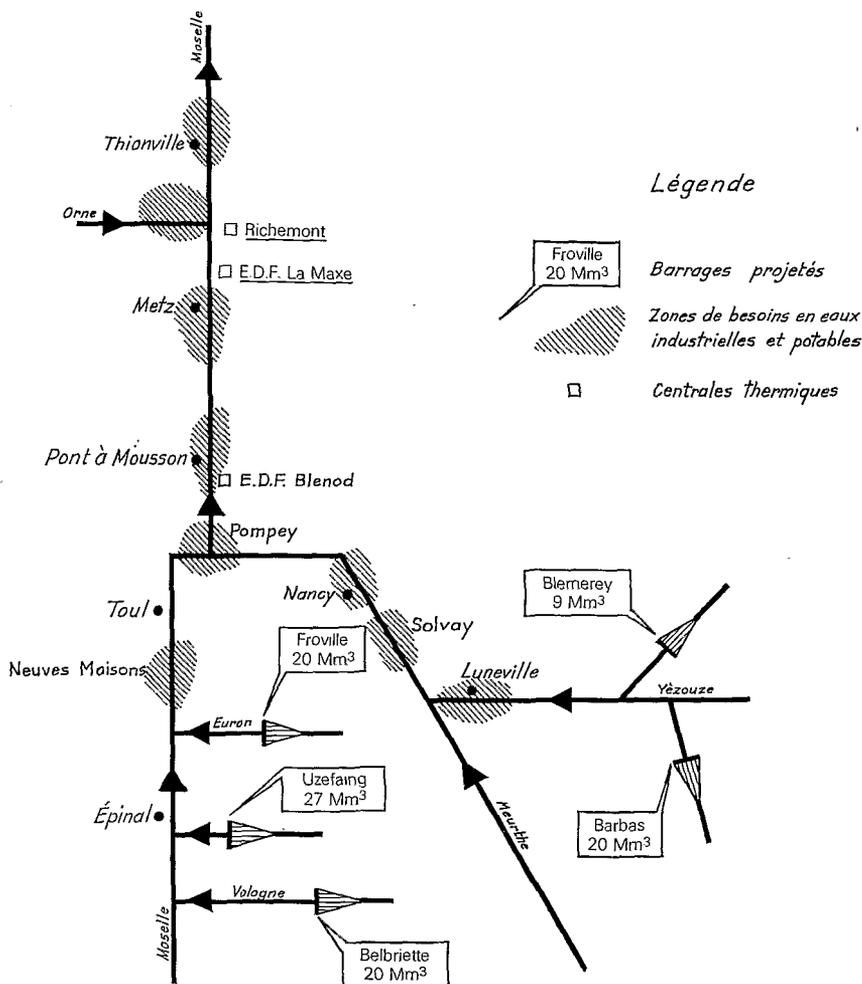


ANNEXE III

ALIMENTATION EN EAU DE LA MÉTROPOLE LORRAINE

ALIMENTATION EN EAU DE LA MÉTROPOLE LORRAINE

Schéma de situation



— Le modèle stochastique devait définir le programme de construction optimum des barrages de retenue qui seront nécessaires dans l'avenir pour satisfaire les besoins en eau de la région Lorraine, pendant les périodes d'étiage de la Moselle et de la Meurthe.

— On a dû effectuer au préalable une étude hydrologique détaillée de la Moselle et de ses affluents, une étude des besoins en eau et de leur croissance jusqu'à l'horizon de l'année 2 000 en fonction de différentes hypothèses de développement, une étude préliminaire des coûts des barrages de retenue.

— Pour un coût minimum des investissements actualisés, le modèle a permis de déterminer l'échéance de la mise en service successive des barrages, qui assurera avec une probabilité donnée et pour toute année à venir, les débits d'étiage nécessaires à la satisfaction de la demande.

### Programme de mise en service des barrages et évolution des probabilités de satisfaction de la demande sur la Moselle et la Meurthe

(Hypothèses de développement et de demande en eau fortes)

