

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

**DIRECTION DE LA TECHNOLOGIE,
DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES MINES**

UTILISATION DES RÉSERVOIRS AQUIFÈRES

**Aide-mémoire sur les bases physiques de la
gestion des nappes souterraines**

par

J. MARGAT



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département GÉOLOGIE de l'AMÉNAGEMENT du TERRITOIRE

HYDROGÉOLOGIE

B.P. 6009 – 45 Orléans (02) Tél.: (38) 66.06.60

71 SGN 414 HYD

Octobre 1971

R E S U M E

Il est aujourd'hui concevable et techniquement possible de planifier l'exploitation d'une nappe souterraine et d'intégrer sa gestion dans le cadre plus large de l'utilisation optimale des ressources en eau globales d'un bassin ou d'un territoire. Les techniques appliquées à l'aménagement et à la maîtrise des ressources en eau de surface ne peuvent toutefois être transposées directement aux eaux souterraines.

Les propriétés physiques propres aux milieux aquifères (transmissivité, diffusivité) dotent les réservoirs d'eau souterraine de qualités spécifiques (capacité régulatrice naturelle, inertie amortissant les propagations d'influence) qui, compte tenu de leur extension, de leur configuration et de leur dynamique naturelle (régime d'alimentation et d'écoulement), conditionnent les modalités de leur utilisation.

L'exploitation à bon escient des caractéristiques d'un réservoir aquifère offre, selon les cas, une gamme plus ou moins variée de possibilités techniques d'utilisation globale, intégrable à divers degrés dans la gestion d'un bassin, et parmi lesquelles un choix économique peut être opéré. Une compréhension et une formulation correctes des conditions physiques (hydrogéologiques et hydrodynamiques) d'un système aquifère sont donc un préalable nécessaire à l'analyse du système économique dans lequel son utilisation peut s'insérer et un emploi optimal des ressources en eau peut être recherché.

Cet aide-mémoire dérive du rapport présenté au "Séminaire sur le rôle des eaux souterraines dans l'utilisation optimale des ressources hydrauliques" (1) organisé à Grenade (18-23 Octobre 1971) conjointement par la F.A.O. et par le Gouvernement espagnol (Institut géologique et minier) au terme du "Projet d'utilisation des eaux souterraines pour la mise en valeur agricole du bassin du Guadalquivir" (P.N.U.D.).

Il s'adresse à la fois aux hydrogéologues, aux projeteurs d'aménagements hydrauliques et aux spécialistes, d'"analyse de système" qui étudient l'optimisation de la gestion des ressources en eau, et se proposent de faciliter le nécessaire dialogue entre les uns et les autres.

(1) sous le titre : "Les réservoirs d'eau souterraine. Bases physiques de leur utilisation".

S O M M A I R E

INTRODUCTION

1. PROPRIETES PHYSIQUES DU MILIEU AQUIFERE

2. DEFINITION DES RESERVOIRS D'EAU SOUTERRAINE

3. DYNAMIQUE ET FONCTION REGULATRICE DES RESERVOIRS AQUIFERES

- 3.1. Dynamique des systèmes aquifères
- 3.2. Alimentation des réservoirs aquifères
- 3.3. Débit naturel des réservoirs aquifères
- 3.4. Fonction régulatrice naturelle des réservoirs aquifères

4. CONSEQUENCES PRATIQUES : Mode d'utilisation des réservoirs aquifères

5. UTILISATION DES RESERVOIRS EN LIAISON HYDRAULIQUE AVEC LES COURS D'EAU

- 5.1. Exploitation traditionnelle des réservoirs à nappe libre étendue
- 5.2. Réglage des pompages saisonniers dans les nappes alluviales pour minimiser leur effet sur le débit d'étiage des rivières
- 5.3. Exploitation régulatrice

6. QUELS SONT LES RESERVOIRS AQUIFERES UTILISABLES ?

- 6.1. Les réservoirs bien liés aux rivières
- 6.2. Les réservoirs imparfaitement ou partiellement liés aux rivières
- 6.3. Les réservoirs indépendants

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Pendant très longtemps l'exploitation des eaux souterraines, par captages et forages, et l'aménagement des eaux de surface, par barrages et canaux, ont été des entreprises sans commune mesure. Ces deux techniques concourent également à maîtriser les ressources en eau, c'est-à-dire à corriger l'irrégularité dans le temps et l'inégalité de répartition dans l'espace qui les affectent dans les conditions naturelles afin d'en disposer plus librement en fonction des besoins. Mais seule la seconde, qui nécessite en général de grands travaux appelant des investissements importants, a fait l'objet d'entreprises publiques et de plans pré-établis, tandis que l'exploitation des eaux souterraines a consisté surtout en travaux ponctuels à la portée d'investissements individuels, plus nombreux mais réalisés sans plan d'ensemble et sans que l'utilité d'en établir se soit fait sentir. Cette différence s'est traduite nettement sur le plan juridique (réglementation du droit de prélèvement d'eau) et dans les interventions de la puissance publique, aussi ces deux sortes d'actions sur les ressources en eau ont été généralement conçues et conduites à des échelles différentes et de manière à peu près indépendante.

Une double évolution en cours tend à rapprocher, voire à intégrer, ces deux actions :

- les aménagements hydrauliques de surface les plus faciles et les moins coûteux ont été réalisés en premier. Il devient de plus en plus coûteux de parfaire la maîtrise des ressources en eau par les moyens classiques de régularisation des cours d'eau. Aussi une utilisation bien comprise des eaux souterraines devient-elle plus compétitive, d'autant plus que les techniques d'action sur les réservoirs d'eau souterraine ont accru leur puissance et leur efficacité. C'est pourquoi on se préoccupe davantage aujourd'hui d'intégrer l'utilisation des eaux souterraines dans les plans d'aménagement optimal des ressources en eau d'un territoire
- le développement des exploitations (individuelles ou collectives) d'eau souterraine, pour satisfaire des besoins en eau croissants, a rendu nécessaire, en plusieurs régions de divers pays, par suite de leurs interférences ou de leur effet cumulé sur les eaux de surface, une réglementation. Il a fait prendre conscience de la possibilité et de l'utilité d'une gestion planifiée des nappes souterraines, analogue à celle des bassins fluviaux.

Ces deux tendances ont été favorisées à la fois par les progrès des connaissances théoriques et des techniques d'investigation, de prévision et d'action sur les eaux souterraines, et par l'extension des responsabilités de la puissance publique et de collectivités dans le domaine de l'eau, en de nombreux pays, d'où s'ensuivent un rapprochement entre les échelles des problèmes considérés, et entre les niveaux de décision et d'intervention en matière d'eau souterraine et d'eau de surface. Parallèlement s'est développée la prise de conscience de l'interdépendance fréquente des réservoirs aquifères et des cours d'eau de surface, c'est-à-dire de l'unicité des ressources en eau, qui impose une coordination sinon une intégration de leur évaluation et de leur gestion.

Passer de "la recherche et l'exploitation des eaux souterraines" à "l'utilisation optimale des réservoirs aquifères dans la gestion des ressources en eau d'un bassin" change la dimension des problèmes mais non les bases physiques des solutions. Ces bases demeurent pour l'essentiel d'ordre hydrogéologique et hydrodynamique. Comment, en général, les caractéristiques physiques des réservoirs aquifères permettent-elles de concevoir leur gestion ? Dans quelles conditions cette gestion est-elle possible en pratique et comment dans chaque cas concret les conditions particulières d'un réservoir le prédisposent-elles et en même temps imposent des contraintes, orientant ainsi le choix des modalités de gestion appropriées ? On s'efforcera de répondre dans ce rapport à ces questions.

Mais le fait de traiter seulement des aspects physiques de l'utilisation des réservoirs aquifères ne doit pas faire perdre de vue que le choix final d'un dispositif planifié et d'un régime dirigé d'exploitation -ou plus largement d'utilisation- d'une nappe souterraine sera dicté principalement par des critères économiques. Les données physiques décrites par l'hydrogéologue, et les modèles formulés par l'hydraulicien, compte tenu des contraintes pratiques exprimées, se traduisent seulement par une gamme de solutions techniques possibles, bases de calculs de rapport coût/avantage, laissant souvent une grande latitude à l'influence des facteurs socio-économiques et politiques.

1. PROPRIETES PHYSIQUES DU MILIEU AQUIFERE

Le milieu aquifère cumule les fonctions de conducteur et de réservoir d'eau, et c'est ce qui le différencie essentiellement d'un bassin versant où le système collecteur (cours d'eau) est distinct des réservoirs (naturels ou artificiels).

Cette double propriété s'exprime par les deux paramètres élémentaires qui caractérisent le même milieu physique.

- la transmissivité * (T) qui commande la fonction conductrice
- l'emmagasinement ** (S) qui commande la fonction de stockage

Il s'ensuit que le milieu aquifère est le champ de deux phénomènes hydrodynamiques bien distincts :

- l'écoulement, ou flux d'eau souterraine, dont le débit dépend de la transmissivité (T) et du gradient (pente hydraulique)
- la propagation d'influence (c'est-à-dire la transmission d'une différence de niveau ou de pression) qui dépend de la diffusivité (T/S).

Il résulte de ces propriétés que les variations dans le temps et la distribution dans l'espace des débits et des niveaux dans un réservoir aquifère sont liées, donc en particulier que toute action sur les débits (exploitation, injection) est indissociable d'une action sur les niveaux (rabattement, recharge) : quelle que soit celle qui est l'objectif visé, l'autre est le corollaire obligatoire (moyen ou conséquence). L'effet sur les niveaux peut être le résultat recherché aussi bien que la conséquence -admissible dans certaines limites- d'une exploitation.

On ne peut prélever (ou introduire) un certain débit dans un réservoir sans abaisser (ou élever) les niveaux, ni inversement rabattre (ou recharger) les niveaux d'une nappe souterraine sans soustraire (ou injecter) un débit. Mais dans les deux cas l'effet débit/niveau décroît avec la distance et croît avec le temps, et en cela un réservoir d'eau souterraine diffère essentiellement d'un réservoir d'eau de surface. L'action sur le débit (par exemple un prélèvement en un point donné, constant ou variable) se répercutera indirectement sur les débits en d'autres points et à d'autres moments par son effet plus ou moins étalé et différé sur les niveaux.

Conséquences pratiques :

- Les effets d'un dispositif (dans l'espace) et d'un régime (dans le temps) d'exploitation définis sur chacune des parties d'un réservoir aquifère sont très différents.
- Inversement une gamme étendue de dispositifs et de régimes d'actions sur le débit est concevable pour déterminer en un site donné un effet voulu (minimal ou maximal, constant ou discontinu, rapide ou retardé).

* produit de la perméabilité x épaisseur de la couche aquifère

**paramètre lié à la porosité pour les nappes libres, ou à la compressibilité de l'eau et des roches, pour les nappes captives.

Autrement dit un réservoir d'eau souterraine est doté d'une certaine inertie, d'une aptitude amortisseuse, qui dépend non seulement des paramètres du milieu, mais de ses dimensions. C'est à la fois un avantage et un inconvénient du point de vue de son utilisation, par rapport à celle d'un réservoir d'eau superficielle.

La distance permet de gagner du temps, mais inversement un effet recherché est amorti avec la distance.

En conclusion, alors que dans un système hydraulique de surface (bassin versant) on considère surtout des débits et leur variation dans le temps, un système aquifère souterrain est plus complexe : il faut considérer les relations débits/niveaux et leur variation dans le temps et dans l'espace.

2. DEFINITION DES RESERVOIRS D'EAU SOUTERRAINE

Considéré comme unité physique de gestion possible en principe un réservoir d'eau souterraine, ou réservoir aquifère, ne peut être défini sur une base exclusivement géologique. Des discontinuités et des hétérogénéités affectent la constitution du sous-sol à des échelles très différentes (succession stratigraphique et changements de faciès des couches sédimentaires, discontinuités tectoniques, degré d'altération, dissection par l'érosion, etc...). Selon l'échelle considérée, une définition géologique pourrait osciller entre la strate de roche homogène et le bassin sédimentaire et le choix de l'échelle serait arbitraire. Cette définition doit être également hydrodynamique, donc tenir compte des propriétés fondamentales du milieu aquifère que l'on vient de rappeler :

- théoriquement, c'est un domaine dans lequel les propagations d'influence peuvent se propager librement, mais qui est circonscrit par des "barrières hydrauliques" faisant obstacle à ces propagations (dans les deux sens)
- en pratique, c'est un domaine dans lequel toutes les actions sur la nappe, naturelles (alimentation) ou artificielles (pompage par exemple) interfèrent (plus ou moins), mais sont sans effet appréciable sur l'extérieur et qui est également à l'abri d'influence provenant de l'extérieur.

Un réservoir aquifère ainsi défini ne doit pas être confondu avec une couche géologique (définie par des critères litho-stratigraphiques) ni avec l'ensemble des couches aquifères d'un même bassin versant (même si les limites de ce bassin coïncident assez bien avec des lignes de partage d'eau souterraine, c'est-à-dire avec les limites d'un "bassin hydrogéologique").

En effet, une même couche géologique perméable peut comprendre plusieurs réservoirs aquifères hydrauliquement indépendants, par exemple si elle est subdivisée par des cours d'eau drainants ; tandis que les lignes de partage des eaux souterraines sont des axes de dispersion des flux, mais non des barrières hydrauliques arrêtant les transmissions d'influence, et ne peuvent donc délimiter des réservoirs aquifères indépendants.

A l'inverse, un même réservoir aquifère peut être constitué par des couches géologiques différentes mais en continuité hydraulique : c'est le cas général des "systèmes multicouches".

On ne doit donc pas confondre l'unité d'un réservoir aquifère, considéré comme un même système hydraulique simple ou complexe, avec l'homogénéité de sa composition géologique. On peut aussi bien se trouver en présence, selon les conditions hydrogéologiques naturelles, de petits réservoirs aquifères homogènes et isolés, ou nombreux et juxtaposés, ou de réservoirs complexes hétérogènes très étendus. Dans tous les cas, l'utilisation d'un réservoir doit être conçue, et traitée, globalement. Sa complexité n'est pas pour autant indifférente, mais elle intervient seulement dans le choix des modalités d'action sur le réservoir.

En pratique l'hétérogénéité des réservoirs aquifères est le cas général et cela conduit à dissocier plus ou moins dans les conditions réelles les fonctions de conducteur et de stockage rappelées plus haut, qui ne sont rigoureusement confondues qu'en milieu homogène.

Un réservoir aquifère réel comporte généralement quelques couches conductrices privilégiées qui "accaparent" une grande partie - parfois la quasi totalité - de la transmissivité de l'ensemble et qui fonctionnent comme des drains collecteurs de la masse du réservoir, même si par leur volume elles ne recèlent qu'une faible partie de la réserve. Ces couches sont les plus productives, sinon les seules, pour les captages. Au contraire les autres couches comportent l'essentiel de la réserve. Bien qu'elles soient peu transmissives et peu ou non productives, la fonction de ces couches-magasin ne doit pas être méconnue, dans un schéma hydraulique global du réservoir, car elles assurent l'entretien des débits exploités. En particulier, il faut se garder du risque de sous-estimer la réserve qui s'ensuit lorsqu'on ne considère que celle des couches les plus productives, seules testées dans un réservoir hétérogène.

Dans la définition d'un réservoir aquifère, sa délimitation et la définition correcte des conditions aux limites importent finalement autant sinon plus que la description détaillée de sa constitution lithologique et de la distribution des paramètres qui la traduit quantitativement.

Ces conditions aux limites sont déterminées en fait à la fois par des facteurs géologiques et hydrologiques. On distingue essentiellement :

- des limites étanches ou passives (à flux nul) à potentiel variable et non imposé par les conditions extérieures, qui sont en général déterminées par des facteurs géologiques
- des limites "ouvertes" ou actives laissant passer un débit variable -entrant ou sortant- mais à potentiel (niveau) constant ou variable, imposé par les conditions extérieures, qui sont en général déterminées par des plans d'eau ou cours d'eau de surface en liaison hydraulique avec les nappes et constituant soit des lignes d'alimentation, soit des lignes de drainage ou d'émergence, y compris les "lignes de sources".

Remarques :

- 1°) La notion de limite étanche, comme celle d'"imperméabilité" n'est pas absolue, mais relative. En pratique, une différence de transmissivité de l'ordre de 1 à 0,01, ou même de 1 à 0,1, a la valeur d'une limite étanche. Mais cela dépend aussi de la constante de temps considérée : plus le terme est long, plus l'écart de diffusivité doit être grand.
- 2°) Les limites ouvertes ne sont pas toujours immuables et intangibles. Il faut notamment bien distinguer parmi les cours d'eau en liaison hydraulique avec les nappes, les "indigènes" dont le débit de base correspond pour l'essentiel aux apports du réservoir, des "exogènes" en général plus importants. Les premiers peuvent disparaître, donc leur fonction peut cesser mais non s'inverser, si l'exploitation du réservoir capte tout le débit en provoquant un rabattement suffisant ; les seconds seuls sont intangibles, et si une influence suffisante les atteint, peuvent donner lieu à une inversion de débit (suralimentation induite).
- 3°) Ces limites ouvertes sont également relatives lorsqu'elles sont constituées par des cours d'eau assimilables à des drains incomplets (ne pénétrant pas complètement la couche aquifère) ou imparfaits (lits et berges colmatés), ce qui est le cas le plus général. Le facteur temps est là aussi essentiel.

3. DYNAMIQUE ET FONCTION REGULATRICE DES RESERVOIRS AQUIFERES

3.1. Dynamique des systèmes aquifères

Trois variables (ou ensembles de variables) caractérisent le fonctionnement, ou dynamique, d'un réservoir aquifère :

- l'alimentation Q_a , ensemble des flux entrant à travers les limites y compris la surface libre
- le débit Q_s , ensemble des émissions d'eau ou flux sortant à travers les limites, y compris la surface libre
- l'évolution de la réserve V , liée à celle de la surface libre qui se traduit par les fluctuations des niveaux (potentiels).

La répartition des flux élémentaires et des variations de niveaux en tout point d'un réservoir aquifère est déterminée essentiellement par celle des paramètres, par sa configuration, par la situation des limites où les échanges de flux (Q_a et Q_s) se produisent et par les variations de ces flux, c'est-à-dire par les "conditions aux limites", définies dans l'espace et dans le temps.

L'ensemble de ces caractères fixes et de cas variables constitue un système physique (hydrodynamique) cohérent, dont la formulation analytique est théoriquement possible et peut s'exprimer par un "modèle" conceptuel, ou déterministe.

Remarques :

- 1°) que des solutions analytiques soient théoriquement possibles cela veut dire: pour des configurations et des lois de variations de flux entrant ou de potentiel imposé assez simples, c'est-à-dire moyennant différentes conditions simplificatrices, par rapport aux conditions réelles. Un système réel peut parfois être idéalisé par un schéma théorique simple, ou le plus souvent par un ensemble d'éléments simples simulant un système complexe en le discrétisant (dans l'espace et dans le temps) : c'est ce que font les modèles déterministes analogiques ou mathématiques.
- 2°) Ces variables et les facteurs stables qui les conditionnent étant liés par des relations déterminées, il n'est pas nécessaire de les connaître toutes de manière indépendante pour décrire le fonctionnement de l'ensemble. Il est donc inutile d'acquérir des informations redondantes ou surabondantes et on doit en tenir compte dans les programmes d'investigations.

En raison des approximations qui affectent la plupart des données d'observation, il est souvent illusoire de chercher à vérifier par des recouplements la cohérence qui doit unir en un même schéma les faits et les hypothèses relatifs à la dynamique d'un réservoir donné. C'est le cas notamment pour l'alimentation qu'il est en général difficile de décrire et d'évaluer de manière indépendante, mais dont cette connaissance n'est pas strictement nécessaire si les autres conditions sont connues. Et ceci d'autant plus que l'alimentation d'un réservoir aquifère est la variable sur laquelle il est le plus difficile d'agir directement.

Les bilans

La conservation de masse régit les quantités d'eau mises en jeu par les trois variables, c'est-à-dire les volumes reçus (ΣQ_a) et débités (ΣQ_s) par le réservoir, et la différence de réserve (ΔV) pendant la même période de n'importe quelle durée). Ces trois termes peuvent donc être mis en équation ou bilan :

$$\Sigma Q_a - \Sigma Q_s \pm \Delta V = 0$$

N.B. Chacun de ces termes peut être nul :

- Q_a est nul en période de tarissement (régime de "vidange" non influencé du réservoir)
- Q_s n'est nul qu'exceptionnellement, mais peut être très faible en fin de période de tarissement assez longue
- ΔV est nul ou négligeable si l'on se réfère à une durée assez longue (pluriannuelle au moins).

L'"équilibre du bilan", c'est-à-dire la vérification de l'équation ci-dessus, est bien une des conditions de cohérence du "modèle" hydrodynamique d'un réservoir. Elle est nécessaire mais non suffisante : ce bilan comptable reste global : il simplifie à l'extrême le modèle du réservoir aquifère en l'assimilant en quelque sorte à un réservoir d'eau de surface. Dresser un bilan global revient en somme à établir un "modèle" à une maille et à un pas de temps très grand, donc un schéma nécessairement grossier de la dynamique d'un réservoir aquifère.

Une description mieux approchée peut s'exprimer par des ensembles de bilans juxtaposés (dans l'espace) ou/et successifs (dans le temps).

Les modèles "matriciels" intemporels discrétisent le bilan dans l'espace pour représenter la distribution géographique des flux entrant et sortant du système (flux permanents réels ou flux moyens interannuels).

Les modèles globaux temporels discrétisent le bilan dans le temps, selon un pas plus ou moins court (année, mois, journée), pour représenter l'évolution des flux entrant et sortant et celle de la réserve, et rechercher une relation du type "boîte noire" entre ces variables.

Seuls les modèles conceptuels complets, à la fois matriciels et temporels décrivent avec une précision acceptable la dynamique réelle des réservoirs aquifères. Leur établissement nécessite un ensemble d'informations dont l'acquisition est plus ou moins difficile selon la précision recherchée et l'échelle désirée, qui doivent être subordonnées à l'approximation jugée suffisante en pratique.

Les bilans sont en somme d'autant plus faciles à établir qu'ils correspondent à des modèles plus simples et qu'ils sont, de ce fait, moins utiles.

3.2. Alimentation des réservoirs aquifères

Les quantités d'eau parvenant aux réservoirs aquifères proviennent directement ou indirectement des précipitations atmosphériques et de ce fait c'est la plus irrégulière et la seule discontinue des variables régissant la dynamique naturelle des nappes souterraines.

L'alimentation des nappes captives est commandée essentiellement par les niveaux de nappes libres comprises dans le même système (partie affleurante d'un réservoir monocouche ou nappes libres d'un système multicouche) ; elle est continue et peu variable. Il en est de même de certaines nappes libres alimentées principalement par des cours d'eau ou des lacs qui les limitent.

Mais dans le cas le plus général, l'alimentation des réservoirs aquifères à nappe libre (c'est-à-dire le flux traversant la surface libre) est subordonnée à l'infiltration des précipitations, donc régie par la dynamique de la zone non saturée et dépendante de deux variables aléatoires : les précipitations et les facteurs de l'évapotranspiration (température surtout).

On s'est longtemps contenté de chercher à lier l'"infiltration efficace" (alimentation des nappes libres) aux précipitations par une relation linéaire, le "coefficient d'infiltration", indexable sur les conditions de terrain (relief, végétation, sol, sous-sol), et valant surtout à petite échelle et pour des moyennes. En fait cette relation n'est pas linéaire, car ce coefficient varie lui-même selon la hauteur de pluie moyenne à laquelle on l'applique, ce qui restreint sa validité pour les extrapolations.

La hauteur moyenne de l'infiltration efficace est cependant, pour des conditions de terrain égales, liée davantage aux précipitations qu'à l'évapotranspiration (déficit d'écoulement). Nulle ou très faible en zone aride, elle varie ailleurs principalement entre quelques litres/seconde et plusieurs dizaines de litres/seconde par km² (ordre de 100 à 1 000 mm/an).

Une connaissance plus fine et plus rigoureuse de l'infiltration efficace implique une formulation analytique des transferts d'eau dans la zone non saturée qui constitue un système aquifère superposé aux nappes libres et plus complexe que le milieu saturé (écoulement diphasique eau/air, perméabilité variable avec la teneur en eau). Cette formulation est théoriquement possible et permet en principe d'établir des modèles déterministes de transfert, donc de transformation d'une variable - entrée (pluie) en variable - sortie (apport à la nappe libre), moyennant diverses simplifications. La portée pratique de ces modèles est néanmoins limitée par la difficulté technique de mesure in-situ des paramètres nécessaires, par la différence d'échelle entre un modèle ponctuel et l'aire d'alimentation d'une nappe libre, et surtout par la difficulté d'utiliser pour la prévision un modèle déterministe à entrée aléatoire.

A l'échelle des réservoirs aquifères, une approche statistique paraît mieux appropriée et peut être plus utile en pratique. Divers modèles globaux probabilistes ont été élaborés pour exprimer une fonction de transfert pluie/infiltration efficace, souvent intégrés à des "modèles de bassin" reliant les précipitations à l'écoulement. Ces modèles sont des "boîtes noires" ; calés sur des chroniques d'observations réelles, ils sont basés souvent sur un schéma physique simplifié (système de réservoirs) ou consistent dans une relation mathématique sans hypothèse physique (convolution), et ils sont utilisables pour la prévision à court terme.

On retiendra surtout que la zone non saturée a la fonction d'un amortisseur plus ou moins efficace (selon son épaisseur et sa constitution) entre la fraction des pluies qu'elle absorbe et retient, et le flux beaucoup plus régulier et continu qu'elle cède à la nappe libre.

La variation de ce flux peut dans une certaine mesure être décrite et reliée à celle des précipitations, plus facilement pour des pas de temps assez longs (moyennes) que très courts, mais l'utilité de cette connaissance indépendante de l'évolution de l'alimentation d'une nappe libre ne paraît pas générale. La connaissance détaillée de la distribution dans l'espace de ces flux est de même difficile car on ignore généralement l'échelle au-dessous de laquelle cette distribution n'est pas aléatoire. En pratique, ce n'est pas à l'échelle métrique que cette connaissance peut être utile, mais à l'échelle kilométrique ou décakilométrique, c'est-à-dire celle d'une cartographie de zonalité et des "mailles" de modèles de systèmes aquifères.

3.3. Débit naturel des réservoirs aquifères

Les sorties d'eau des réservoirs aquifères se font principalement par les émergences des nappes (sources, collecte par les cours d'eau drainant ou des nappes d'eau de surface, lacs ou mer), accessoirement (sauf en zone aride) par des émissions à travers la surface libre au profit de la zone non saturée soumise à l'évapotranspiration. Elles correspondent donc à des limites à niveau quasi-constant ou peu variable.

En dehors de cas particuliers (aquifères côtiers, zone aride), la répartition géographique des lieux d'émergence est liée au réseau hydrographique de cours d'eau permanents, donc à sa configuration plus ou moins dense, et à la qualité des liaisons hydrauliques entre nappes et rivières (plus ou moins colmatées).

Ces débits naturels sont dans la majorité des cas la variable que l'on peut connaître directement avec le plus de facilité et la meilleure précision, et dont on peut décrire les hydrogrammes.

Les débits sortant des réservoirs aquifères sont généralement continus. Font exception les sources temporaires ou intermittentes, et les drainages par des cours d'eau à inversion de flux en période de crue. Ces débits, liés aux niveaux dans le réservoir, évoluent en période de non-alimentation de ceux-ci (dite de vidange non-influencée) selon des lois de tarissement formulables analytiquement et souvent simples, facilitant la prévision à court terme.

Le débit des nappes souterraines affluant aux cours d'eau de surface constitue l'essentiel du "débit de base" de ceux-ci. En conséquence la détermination de cette composante de l'écoulement total des cours d'eau, par analyse des hydrogrammes, est une voie appropriée pour évaluer l'"écoulement souterrain", dans tous les cas où le débit des nappes ne s'écoule pas par des sources bien individualisées.

3.4. Fonction régulatrice naturelle des réservoirs aquifères

Les exutoires d'un réservoir aquifère (sources et drainage par des cours d'eau principalement) sont généralement localisés, ayant un caractère ponctuel ou linéaire. Les aires d'alimentation sont au contraire très étendues : elles correspondent à la plus grande partie de la surface des réservoirs à nappe libre.

De ce fait, et compte tenu de la lenteur des propagations d'influence -c'est-à-dire de l'inertie du réservoir-, à l'irrégularité des apports d'eau naturel (Q_a) correspond toujours une variation plus ou moins amortie des débits (Q_s) aux exutoires. Cette fonction régulatrice d'un réservoir aquifère, qui transforme un débit entrant discontinu et irrégulier en débit sortant continu et plus régulier, et est assurée par la variation de la réserve (fig. 1), dépend davantage de ses dimensions et de sa configuration, et naturellement de sa diffusivité, que du seul volume de la réserve.

Un réservoir de forme massive sera un meilleur régulateur qu'un réservoir de forme très découpée où aucune partie n'est très éloignée des limites (notamment des cours d'eau drainant) même si leur réserve et leur diffusivité sont du même ordre de grandeur.

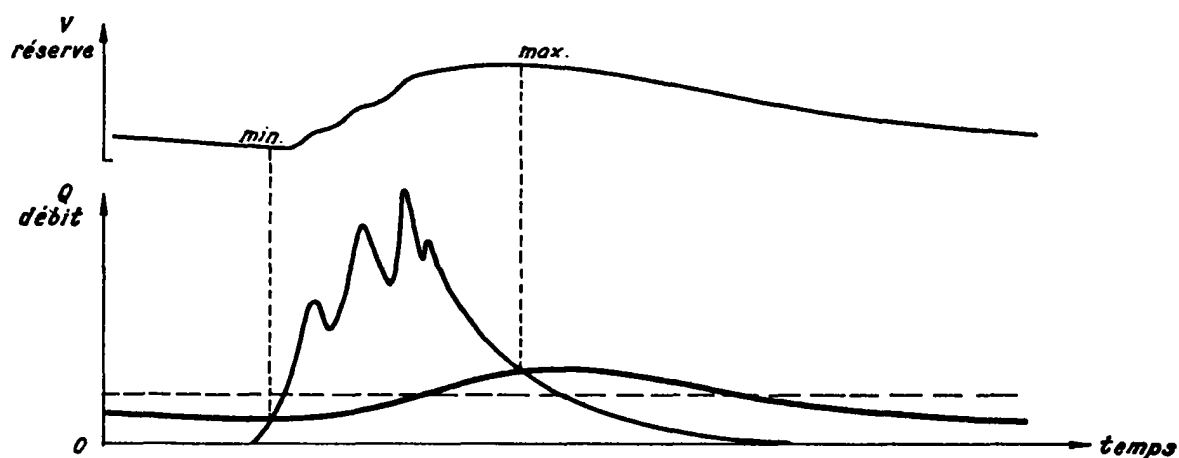


Fig. 1. Fonction régulatrice d'un réservoir aquifère

- débit global d'alimentation
- débit sortant total
- - - débit régularisé parfait théorique (débit moyen)

Le transfert des variables "alimentation/débit" opéré par un réservoir aquifère peut se comparer à la fonction de transfert "pluie/écoulement" d'un bassin versant (dans le cas symétrique où ne se produirait que du ruissellement). On a indiqué ci-dessus que dans le cas d'un réservoir aquifère, il s'agit pour l'essentiel du transfert "infiltration efficace"/"débit de base" des rivières.

Si l'on considère la relation "pluie utile"/"débit des nappes" (= "débit de base"), ce qui revient à incorporer dans un même modèle la zone non saturée et le réservoir aquifère, on remarquera que deux amortissements successifs sont opérés. Ceci accentue la faible sensibilité des réponses (sorties d'eau) à la variation aléatoire des entrées d'eau, c'est-à-dire l'inertie du milieu souterrain par rapport au système superficiel.

On a cherché à exprimer l'aptitude ou "capacité régulatrice" d'un réservoir par divers index :

- la variabilité de la réserve ("réserve régulatrice") et sa confrontation avec la réserve totale
- le renouvellement de la réserve, c'est-à-dire la confrontation entre la quantité d'eau échangée (débit moyen d'une nappe) et la réserve totale (cf. rapport "budget/trésorerie").

Mais ces notions n'ont qu'un intérêt pratique restreint car elles ne prennent en compte, comme les bilans, que des quantités d'eau globales et négligent la dynamique du réservoir. En outre, elles sont relatives à une constante de temps, c'est-à-dire à un terme plus ou moins long qu'il faut choisir.

Il serait plus utile de considérer un index exprimant l'"inertie" du réservoir, par exemple le rapport entre la variabilité du débit sortant et celle d'une variable "entrée" (soit les précipitations directement, soit la "pluie efficace" ou l'"infiltration efficace"). En pratique, la régularité du débit sortant est déjà par elle-même une indication.

Il est bien connu que la fonction régulatrice des réservoirs aquifères a dans les conditions naturelles pour principal effet d'entretenir le "débit de base" des cours d'eau et de régulariser plus ou moins leur régime. Ils exercent donc une action naturelle appréciable sur les ressources en eau. Mais cette fonction peut être utilisée directement et de plusieurs manières, comme on l'examinera plus loin.

4. CONSEQUENCES PRATIQUES : Mode d'utilisation des réservoirs aquifères

Les principes de conception et les règles de mise en oeuvre d'une utilisation globale des réservoirs aquifères découlent directement des notions de base que l'on vient de rappeler.

- 4.1. En premier lieu, un projet d'exploitation d'eau souterraine -ou d'action quelconque sur les eaux souterraines (rabattement de nappe, drainage, alimentation artificielle)- ne peut valablement se concevoir en considérant seulement des débits et en établissant des bilans de flux, de quantités d'eaux reçues et débitées par les nappes souterraines. Il faut tenir compte

également des influences déterminées par les prélèvements. Ce sont ces influences qui à la fois rendent en définitive possible la continuité à long terme des prélèvements, tout en les restreignant dans la mesure où elles créent une sensibilité aux diverses contraintes intervenant, notamment aux limites du réservoir aquifère.

Toute exploitation d'eau souterraine, c'est-à-dire tout prélèvement de débit, exerce en effet une action (variant avec la distance et le temps) sur les niveaux, donc sur la réserve, sur les rendements des autres captages exploitant la même nappe, et enfin sur les débits aux limites actives du réservoir lorsque l'influence les atteint.

C'est en définitive dans la mesure où une exploitation parvient à influencer les limites d'une nappe et à réduire d'autant les débits de ses exutoires naturels (ou à accroître les débits de son alimentation) qu'elle est durable et que des "ressources en eau souterraine exploitables" entretenues ou renouvelées sont procurées. Les contraintes aux limites, notamment la latitude laissée de réduire les débits qui s'écoulent aux émergences naturelles d'une nappe (et par conséquent ses apports aux rivières) peuvent donc restreindre la possibilité d'exploiter une nappe, parfois dans une grande mesure, ou du moins limiter le choix des dispositifs de captage, si l'on cherche par exemple à moduler au maximum leur effet sur les limites. Il en est de même pour les contraintes sur les niveaux imposées parfois, sans parler des contraintes de production qui se traduisent par des maximums de rabattement admissibles aux puits.

C'est bien parce que la situation des captages dans un réservoir aquifère n'est pas indifférente et commande les répercussions du régime des prélèvements sur les limites, que l'établissement de bilans -c'est-à-dire de modèles globaux de fonctionnement des réservoirs- est une méthode insuffisante pour évaluer des ressources exploitables. Les ressources potentielles globales sont suffisamment estimées d'après le débit moyen sortant d'une nappe à la connaissance duquel l'écriture du bilan n'ajoute généralement pas d'information indépendante. Le rapport entre les quantités d'eau exploitées et le débit global naturel d'un réservoir, ainsi que des points de repère sur l'évolution pluri-annuelle des niveaux sont les meilleurs indicateurs pour apprécier l'opportunité et l'utilité d'une gestion.

Remarque

Il est bien évident que ces notions ont été méconnues dans le passé et qu'elles peuvent encore l'être sans inconvénient aujourd'hui au niveau des exploitations locales et individuelles, tant que leur somme pour un même réservoir reste petite par rapport au débit naturel global de la nappe.

L'exploitant d'un puits ne se soucie pas de l'effet aux limites qu'il détermine inconsciemment -et qui peut être négligeable- mais seulement de la productivité locale et des interférences possibles avec des captages voisins. Il n'en est plus de même à l'échelle globale du réservoir lorsque l'on envisage de capter une fraction importante de son débit naturel, ce qui n'est généralement pas possible sans abaisser notablement les niveaux sur une étendue assez grande.

- 4.2. Utiliser un réservoir aquifère c'est à la fois capter -c'est-à-dire détourner- une fraction (plus ou moins grande) de son débit naturel et entamer jusqu'à un certain point sa réserve.

On oppose ces deux aspects physiquement liés en distinguant l'exploitation d'eau souterraine opérée avec le souci et dans une perspective d'équilibre (ressource renouvelée), d'une exploitation provoquant involontairement un déséquilibre ("surexploitation") ou le visant délibérément (épuisement des réserves ou "mining").

Dans certains cas, il s'avère que l'exploitation d'une nappe souterraine fasse appel essentiellement à son débit sans action appréciable sur la réserve, ou au contraire prélève surtout l'eau de la réserve :

- les captages des nappes alluviales riverains de cours d'eau en régime permanent (avec ou sans réalimentation induite) se trouvent dans le premier cas ; ils sont analogues à des "prises au fil de l'eau"
- dans l'exploitation de nappes captives au contraire, en régime purement transitoire, l'essentiel de l'eau produite provient de la décompression de la réserve.

Cette opposition n'est pas sans valeur pratique, car il convient aussi bien selon les cas d'éviter les inconvénients directs ou indirects (par exemple l'altération de la qualité) de la surexploitation d'une nappe, que de ne pas exclure a priori la possibilité d'épuiser progressivement les réserves. Elle est cependant trop simplificatrice car l'équilibre que l'on cherche à sauvegarder ou dont on néglige le maintien, est en fait essentiellement relatif au temps.

En régime d'exploitation, l'équilibre entre les quantités d'eau reçues par le réservoir et la somme des quantités prélevées et débitées, peut être recherché à des termes très différents (saisonnier, annuel, pluri-annuel, voire pluridécennal) ou bien ne pas être recherché. En pratique, c'est la durée pour laquelle on désire que la différence de réserve soit négligeable qui définit conventionnellement le terme de référence séparant une exploitation équilibrée d'une surexploitation. Mais la réserve peut être largement utilisée et sa variation peut être notablement amplifiée à l'intérieur de la période convenue, dans le cas de l'exploitation "équilibrée".

En fait, l'utilisation des réservoirs aquifères à nappes libres ou semi-captives, qui constituent la grande majorité, consiste à la fois à capter leur débit et à exploiter leur réserve en se servant de leur fonction régulatrice.

Utiliser la fonction régulatrice d'un réservoir, c'est substituer des débits prélevés à une partie des débits d'exutoires naturels, de telle sorte que la conversion naturelle d'un débit entrant irrégulier en débit sortant plus régulier se transforme en régime d'exploitation, en conversion d'un débit entrant irrégulier en débit sortant (global) commandé par la demande, soit plus régulier, soit variant en fonction de celle-ci.

La capacité régulatrice d'un réservoir aquifère est la faculté qu'il offre non seulement de fournir un débit régulier, mais aussi bien de régler la variation des prélèvements en s'affranchissant plus ou moins de la variation des apports naturels, donc de pouvoir s'adapter à la variation des besoins pourvu que la réserve soit suffisante, et que les contraintes éventuelles soient respectées. A l'extrême, un régime d'exploitation plus discontinu et irrégulier que celui des apports naturels est concevable.

La capacité régulatrice utilisable est certes fonction du volume de la réserve, qui doit être assez grand pour permettre de régler librement la variation des prélèvements, mais elle dépend aussi en pratique de la possibilité de prélever dans le réservoir sans créer d'influences préjudiciables.

Les contraintes aux limites et les sensibilités aux influences restreignent en général davantage la possibilité d'utiliser la capacité régulatrice d'un réservoir que la grandeur de sa réserve.

- 4.3. Des modes très variés d'utilisation d'un réservoir aquifère sont donc concevables et techniquement possibles. Chaque mode d'utilisation doit être défini à la fois par un dispositif situé dans l'espace et par un régime de variation des prélèvements dans le temps. Mais les choix de l'un et de l'autre ne peuvent être indépendants : la liberté de réglage de la variation des débits prélevés par rapport aux contraintes imposées -aux limites notamment- est liée à la position des points de prélèvement dans le réservoir.

D'une manière générale, l'effet d'un prélèvement irrégulier sur les limites est à la fois plus retardé et plus modulé avec la distance, et il diffère peu de l'effet d'un prélèvement régulier s'il est assez éloigné. Inversement un prélèvement temporaire ou périodique exerce une action peu différée ni étalée sur une limite proche.

Un réservoir aquifère peut donc se prêter :

- à un captage plus ou moins régulier, extensif ou intensif, de son débit pour satisfaire directement des besoins concentrés ou dispersés avec effet à peu près constant aux limites. C'est ce que fait depuis longtemps l'exploitation des eaux souterraines par les techniques traditionnelles
- à un réglage du régime des captages de nature à minimiser leurs effets aux limites, à certaines périodes, ce qui n'est possible qu'à proximité de celles-ci
- à des prélèvements temporaires rejetés dans les cours d'eau pour renforcer leur débit d'étiage (exploitation "régulatrice"), avec effet différé en période de hautes eaux
- à l'alimentation artificielle qui, à l'inverse, utilise la capacité régulatrice en introduisant un apport supplémentaire, détourné d'un cours d'eau de surface en période de hautes eaux, de telle sorte que son effet sur les

limites d'émergence soit assez différé et maximal en étiage, ou du moins étalé sur toute l'année (par exemple pour renforcer des possibilités d'exploitation).

En dehors des deux cas-limites indiqués plus haut (exploitation de nappe alluviale réalimentée en équilibre permanent imposé, ou exploitation de nappe captive en déséquilibre, définitif, physiquement nécessaire), tous ces modes d'utilisation d'un réservoir aquifère se servent de sa capacité régulatrice.

5. UTILISATION DES RESERVOIRS EN LIAISON HYDRAULIQUE AVEC LES COURS D'EAU

L'effet aux limites le plus courant de l'exploitation des nappes souterraines est une réduction du débit des cours d'eau et c'est l'une des principales contraintes intervenant sur l'utilisation des réservoirs aquifères, y compris lorsque l'on se préoccupe de l'intégrer dans la gestion des ressources en eau globales. Aussi est-il utile d'examiner plus particulièrement les réactions sur les débits des cours d'eaux de surface des modes d'exploitation des réservoirs limités par ceux-ci.

5.1. Exploitation traditionnelle des réservoirs à nappe libre étendue

Tout volume d'eau prélevé dans la nappe est naturellement soustrait aux collecteurs du système, donc au débit de base des cours d'eau drainant le réservoir. Si le prélèvement est permanent, l'effet de réduction de débit l'est également quelle que soit la distance du point de captage. Mais si le prélèvement est variable, voire discontinu (c'est le cas le plus général) la variation de l'effet dépend de la distance de l'ouvrage d'exploitation à la limite influencée : plus un puits est éloigné du cours d'eau, plus l'influence du captage est modulée et plus l'effet d'un prélèvement discontinu sera différé et étalé, dans une mesure commandée aussi par les paramètres de l'aquifère (diffusivité). (fig. 2)

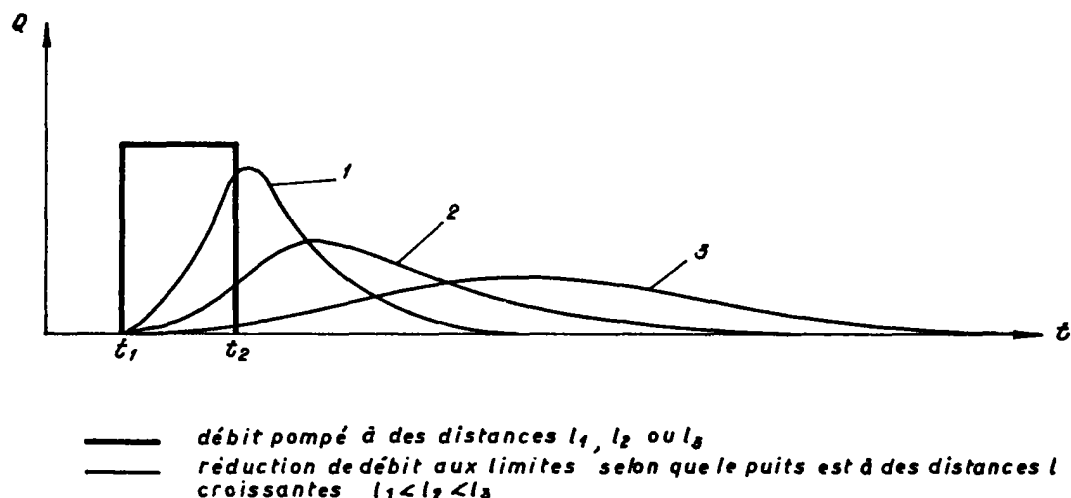


Fig. 2.

Les effets successifs de pompages discontinus, ou continus mais à débit variable, s'additionnent (fig. 3 et 4).

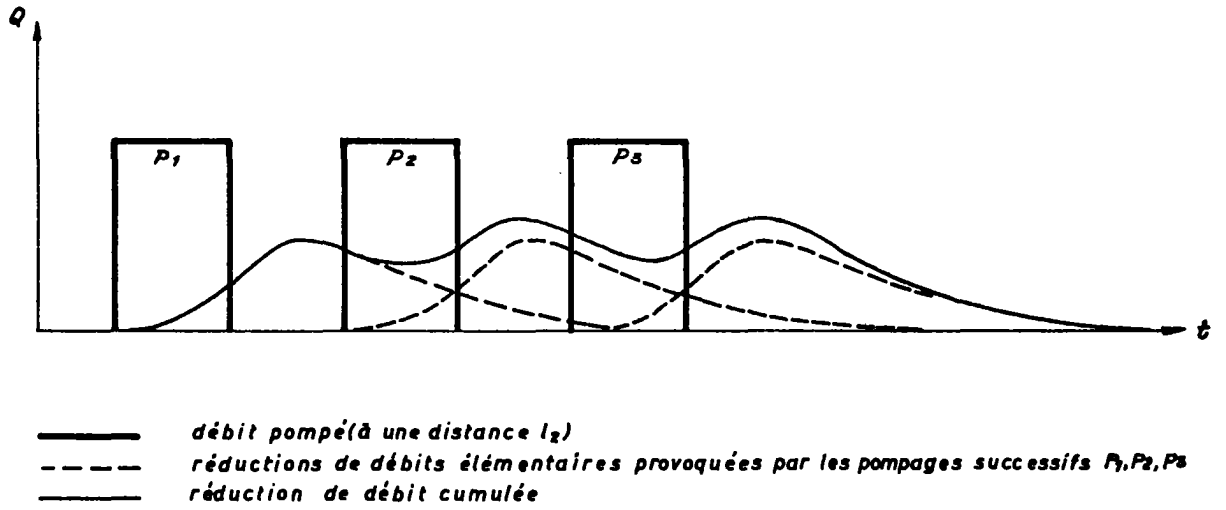


Fig. 3 -

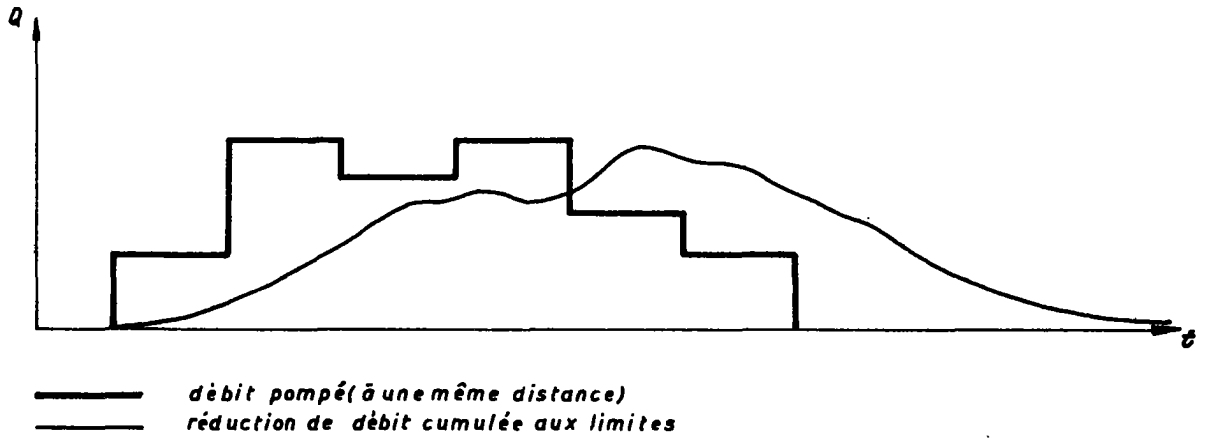


Fig. 4 -

Les effets de pompages synchroniques opérés à des distances différentes s'additionnent de même (fig. 5).

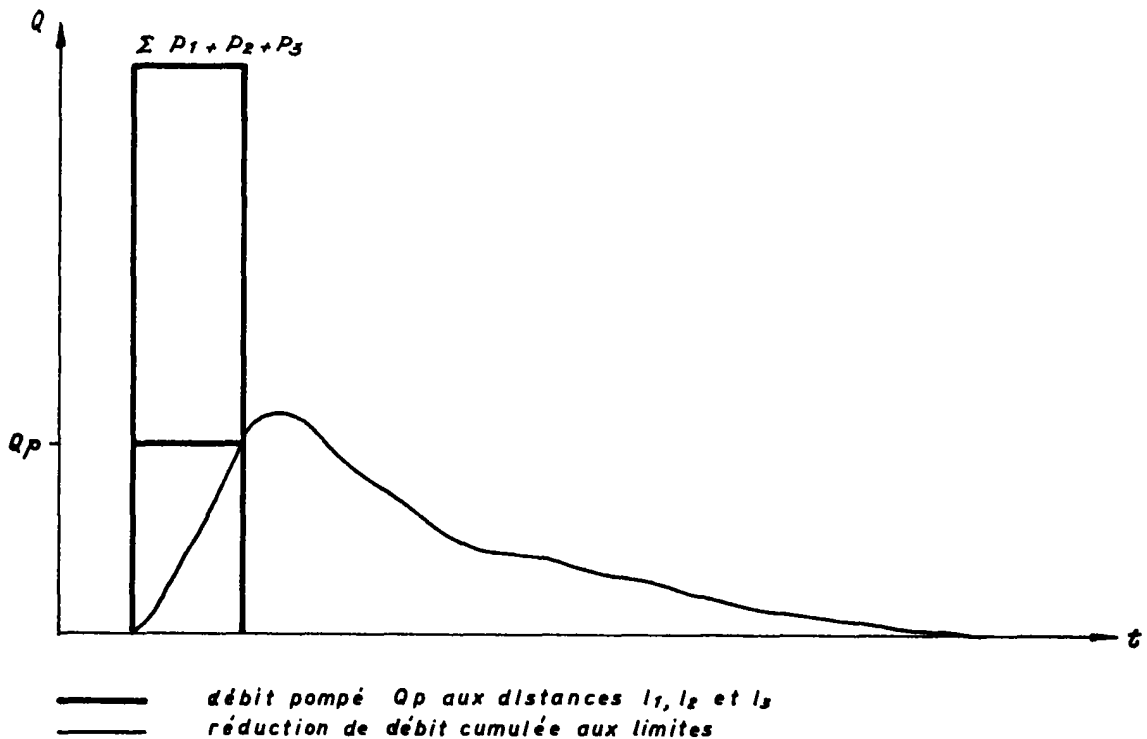


Fig. 5.

L'effet global de l'ensemble des exploitations sur le débit des collecteurs naturel est donc à tout instant la somme des effets élémentaires de chaque prélèvement ponctuel. Une distribution aléatoire de points d'exploitation dans un réservoir aquifère et une variabilité peu accentuée de prélèvements discontinus ont toute chance de produire un effet cumulé très modulé quasi-permanent (fig. 6).

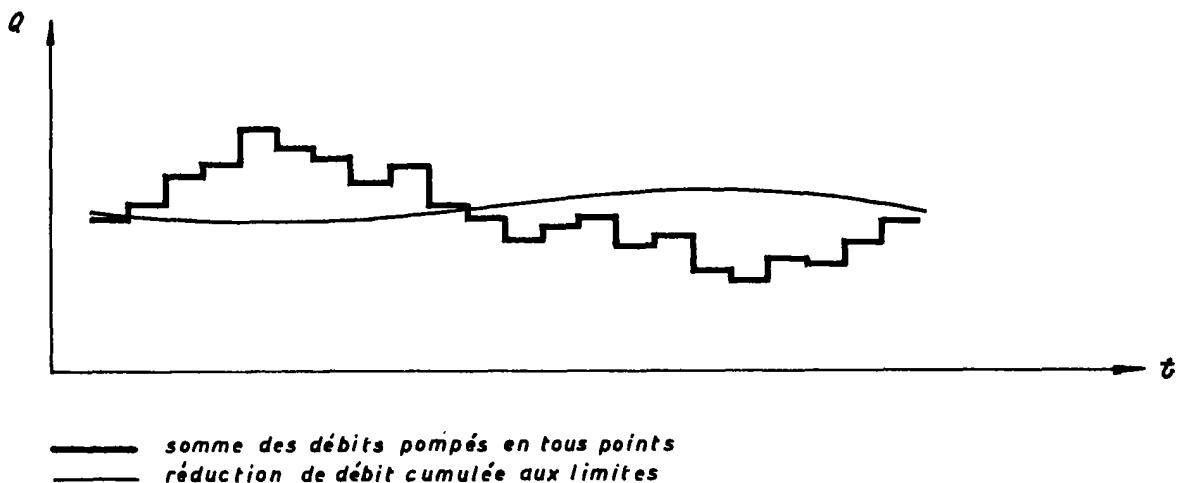


Fig. 6.

Tant que cet effet est inférieur à une diminution mesurable (au moins 10 %) du débit des cours d'eau drainant en période d'étiage, il n'est pas perçu et aucun problème de préjudice éventuel ne se pose.

5.2. Réglage des pompages saisonniers dans les nappes alluviales pour minimiser leur effet sur le débit d'étiage des rivières

Dans le cas particulier d'un pompage dans un réservoir aquifère à proximité d'un cours d'eau avec lequel il est en liaison hydraulique -cas général des nappes alluviales- le débit du cours d'eau subit un préjudice globalement égal en moyenne au débit pompé, et qui est la somme du manque à gagner (réduction du débit drainé par la rivière) et d'une perte (réalimentation induite de la nappe).

Ce préjudice est variable si le pompage est discontinu et temporaire (saisonnier, par exemple), et plus ou moins différé et étalé dans le temps, comme on l'a vu ci-dessus. La part du préjudice subie par le cours d'eau pendant l'étiage (fig. 7) dépend donc, toutes choses égales :

- de la durée et de l'époque du pompage
- de la distance du puits exploité à la rivière.

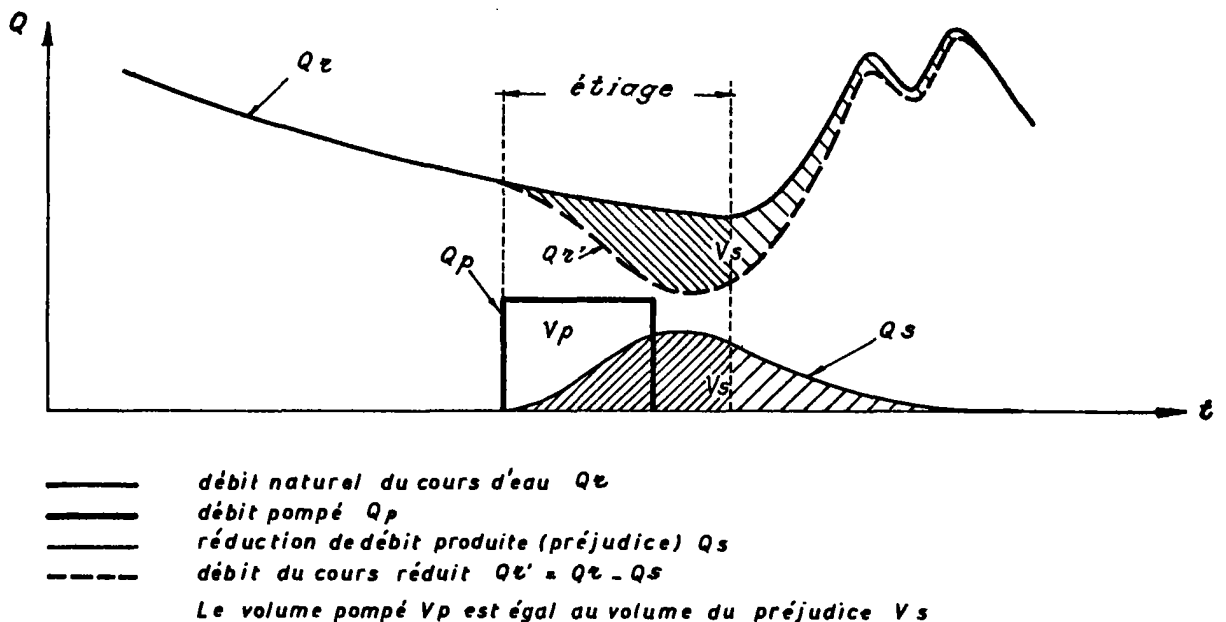


Fig .7-

Pour conserver l'étiage, en minimisant l'effet du pompage, il est donc possible de pomper soit plus loin de la rivière, soit plus tôt ou plus tard, dans une mesure calculable (fig. 8 et 9).

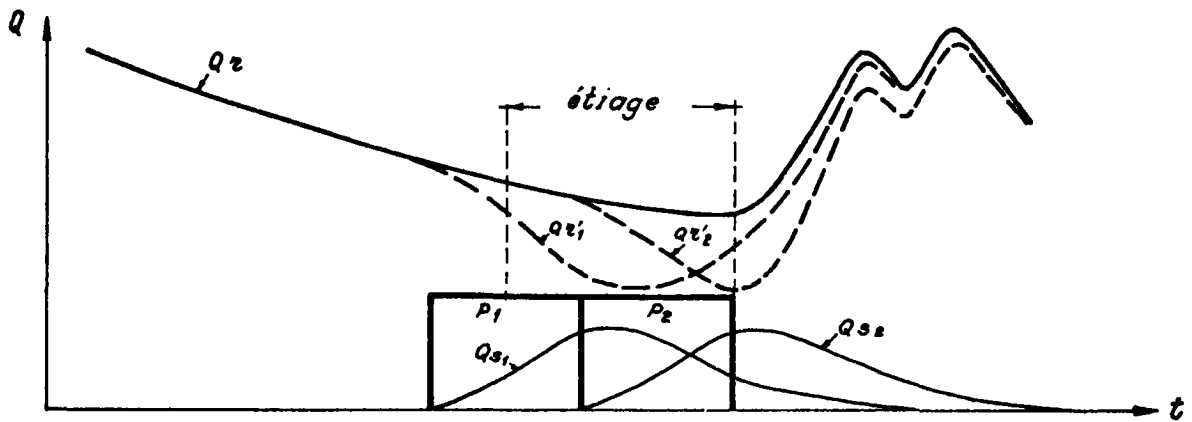


Fig. 8. L'effet du pompage P_1 sur le débit d'étiage est plus important que l'effet du pompage plus tardif P_2 (au même puits).

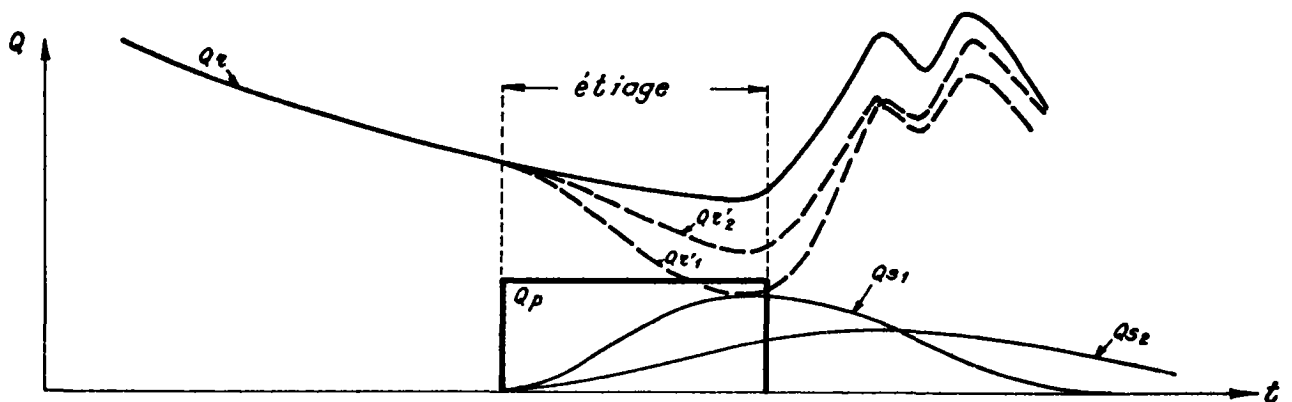


Fig. 9. L'effet du pompage (Q_p) synchrone de l'étiage est plus important et moins différé à une distance courte l_1 qu'à une distance plus grande l_2 .

Pour diverses configurations simples (géométrie et paramètres de l'aquifère, relations nappe/rivière, conditions aux limites), des solutions analytiques ont été formulées (COLLINS, HANTUSH), permettant le calcul de la variation du préjudice instantané (rapport du débit soustrait Q_s au débit pompé Q_p) produit par chaque pompage élémentaire, donc leur somme. Les cas trop complexes pour être ramenés à un schéma simple peuvent être traités par simulation.

Une zonalité des % des débits pompés synchrones de l'étiage préjudiciels au débit d'étiage de la rivière peut donc être établie. Par exemple on trouvera que la distance en deça de laquelle plus de 50 % du volume pompé est préjudiciel à la rivière pendant un étiage de 4 mois, dans un aquifère dont la diffusivité serait de l'ordre de $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ ($T \simeq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ et $S \simeq 0,05$), serait de 500 à 1 000 mètres.

5.3. Exploitation régulatrice

Au lieu d'être utilisée directement, l'eau prélevée saisonnièrement dans un réservoir aquifère peut être rejetée dans un cours d'eau pour accroître son débit d'étiage : cette exploitation régulatrice a un double effet sur le débit d'un cours d'eau :

- un effet immédiat d'accroissement
- un effet retardé de réduction, comme on l'a décrit plus haut, si le cours d'eau draine le réservoir exploité.

Ces deux effets s'additionnant, il faut donc qu'ils soient suffisamment décalés pour que le rendement de l'opération soit acceptable (fig. 10).

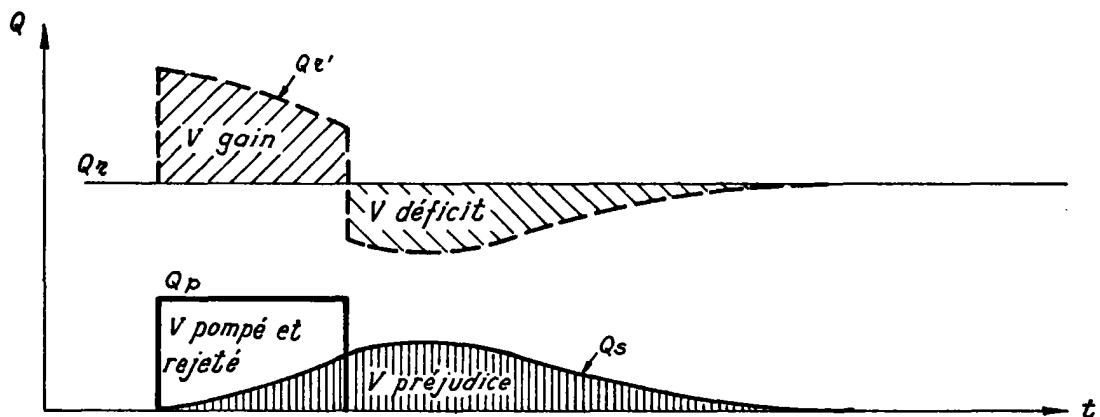


Fig-10. Effet d'un pompage temporaire, de débit Q_p , à une distance donnée d'un cours d'eau drainant le réservoir et le débit naturel Q_r supposé théoriquement constant.
 $V \text{ pompé et rejeté} - V \text{ préjudice non différé} = V \text{ gain} = V \text{ déficit différé.}$

Par suite de la superposition des deux effets :

- le gain de débit instantané ($Q_p - Q_s$) diminue au cours du pompage
- le rendement global (rapport V pompé/ V gain) dépend du déphasage entre le pompage et le préjudice qu'il cause au débit de la rivière (fig. 11)
- la répétitivité de l'opération (annuelle par exemple) n'est possible qu'après la fin de l'effet de préjudice (fig. 12)

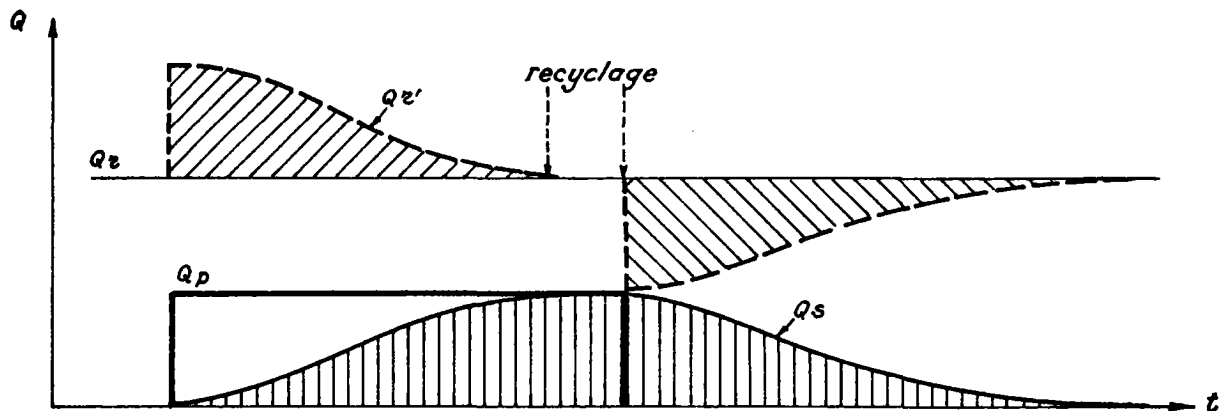


Fig. 11.- Un déphasage insuffisant entre le pompage et le préjudice affaiblit le rendement et peut entraîner un recyclage (rendement instantané nul).

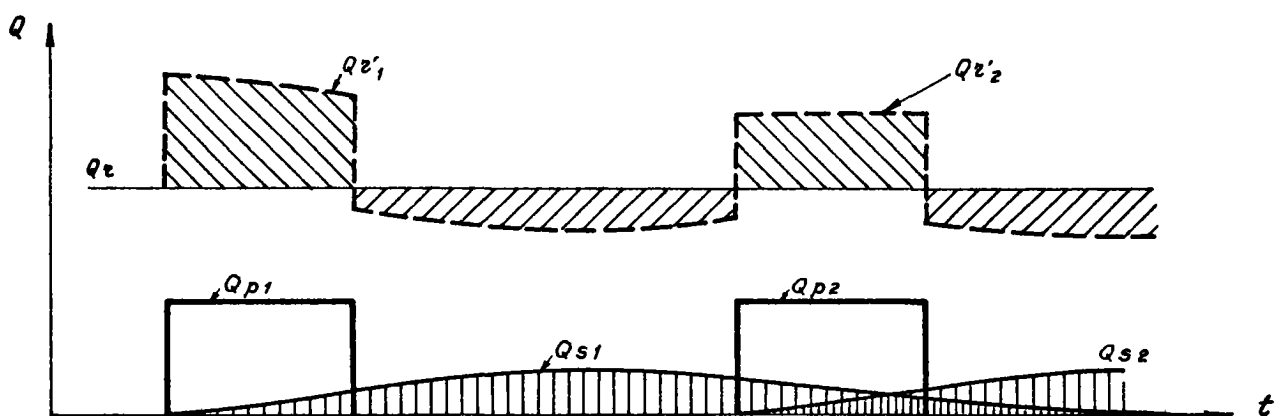


Fig. 12.- Un étalement accentué du préjudice améliore le rendement mais peut faire obstacle à la répétition de l'opération, c'est-à-dire affaiblir le rendement du pompage suivant.

En pratique, il s'agit de régler l'opération de manière à accroître le débit d'étiage de la rivière au détriment du débit de hautes eaux, plus précisément au détriment du débit de base en période de hautes eaux (fig. 13).

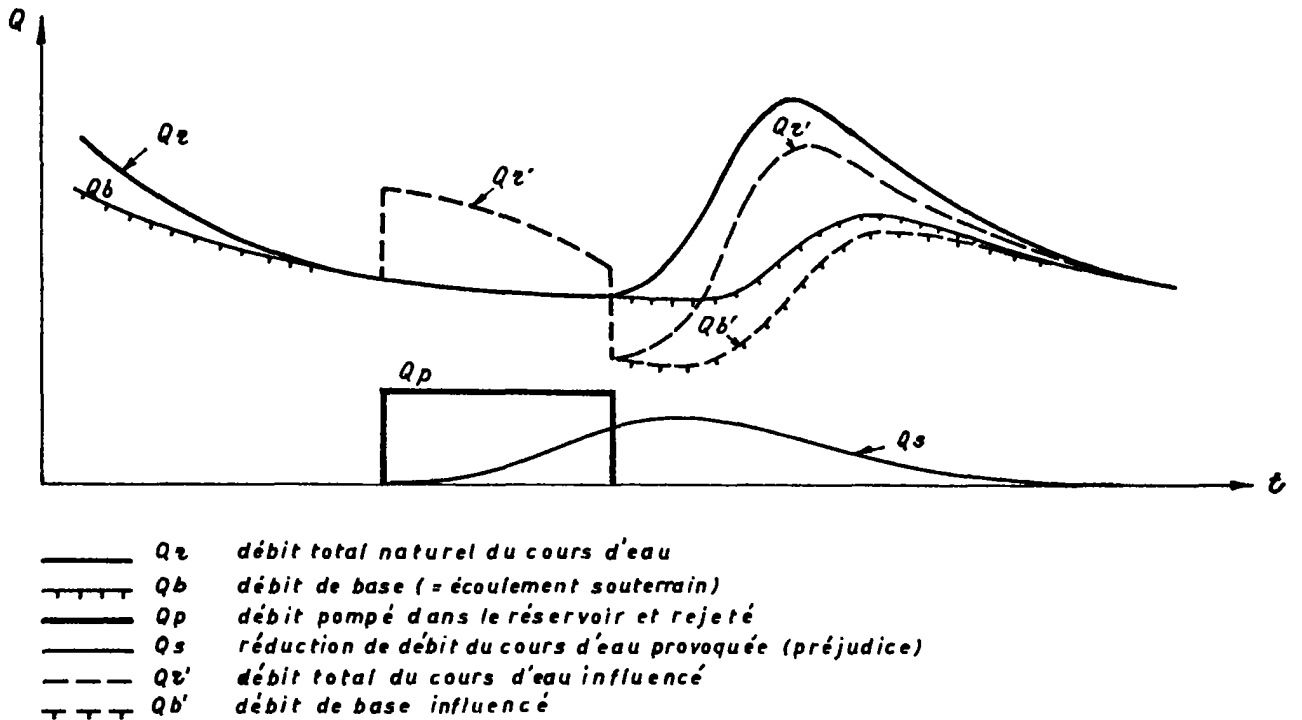


Fig. 13.

La diminution du rendement au cours du pompage peut être évitée en augmentant progressivement le débit pompé et rejeté à la rivière, de manière à obtenir un gain constant (fig. 14).

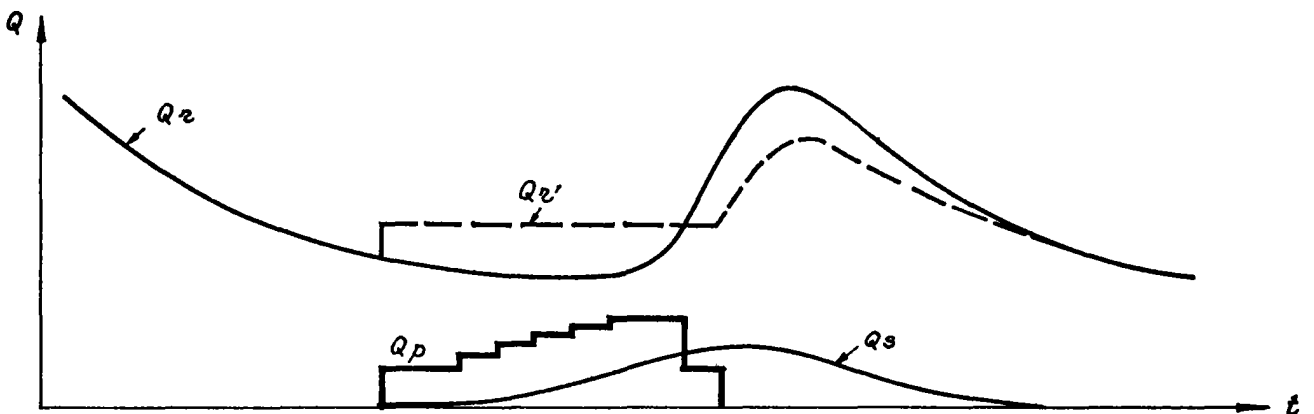


Fig. 14.

Deux types différents de dispositifs sont concevables pour réaliser une exploitation régulatrice :

- On peut situer les ouvrages assez loin de la rivière, dans un système monocouche, pour obtenir un effet assez différé (comme dans le cas envisagé plus haut en 5.2.) de sorte que le débit rejeté soit notablement et assez longtemps supérieur à la réduction de débit provoqué. Dans un système multicouche cet éloignement peut être vertical si l'on exploite une couche inférieure à nappe captive, séparée par un "aquitard" de l'aquifère drainé par le cours d'eau.
- On peut au contraire placer les ouvrages très près du cours d'eau à renforcer -ou même pomper dans une source- en maximisant l'influence de telle sorte que le débit prélevé soit aussitôt notablement supérieur au débit naturel. Cela nécessite que les inversions de flux entre nappe et rivière soient impossibles ou du moins réduites pour empêcher le recyclage, ou du moins le minimiser assez longtemps (fig. 15).

N.B. Ces deux techniques se ramènent, la première à étendre plus loin l'action drainante du cours d'eau en créant un affluent artificiel temporaire, la seconde à abaisser le cours d'eau, intensifiant ainsi son action drainante.

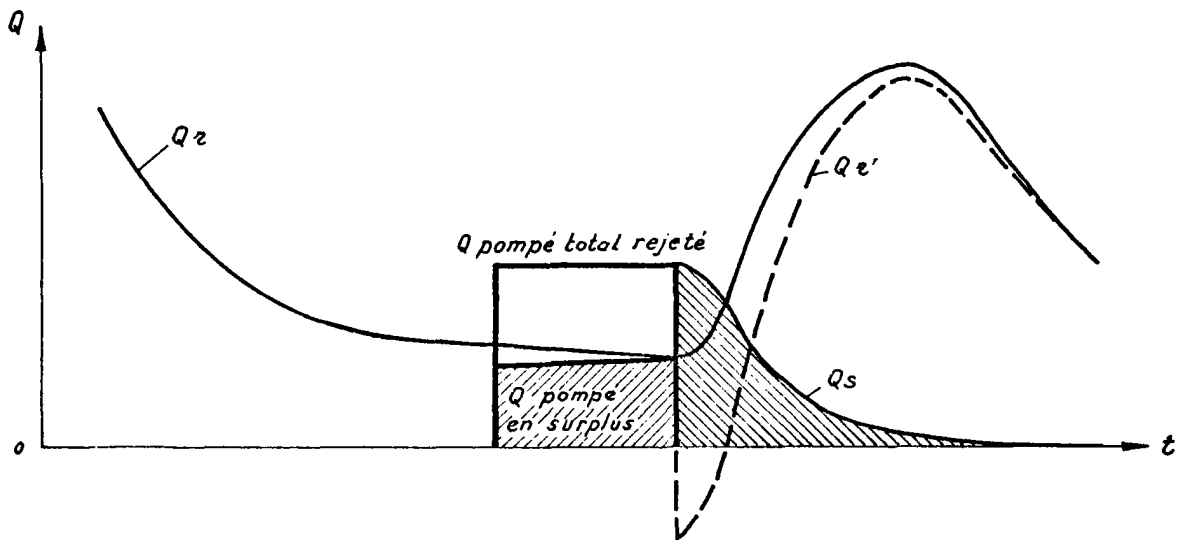


Fig .15.-

Pompage dans une source, ou à proximité d'un cours d'eau drainant avec effet immédiat sur les émergences, à débit supérieur à leur débit naturel Q_r . Le préjudice Q_s déterminé par le surplus du débit pompé sur le débit naturel est entièrement différé.

Il est maximal dès l'instant d'arrêt du pompage. Le débit du cours d'eau résultant est égal au débit pompé pendant le pompage (si aucun recyclage ne se produit), puis au débit naturel diminué du préjudice. Ce débit peut donc être "négatif" pendant une certaine durée après le pompage, ce qui correspond à une interruption de l'écoulement aux émergences et à la reconstitution de la réserve préalable à la reprise de l'écoulement.

6. QUELS SONT LES RESERVOIRS AQUIFERES UTILISABLES ?

Pour être utilisable, dans le sens global envisagé ici, c'est-à-dire à une échelle entrant en ligne de compte dans l'aménagement et la gestion des ressources en eau d'un bassin, selon l'une ou l'autre des modalités énumérées plus haut, un réservoir aquifère doit répondre à trois conditions physiques principales :

- a - Dimension minimale et paramètres (T,S) convenables pour déterminer une réserve et une inertie (donc une capacité régulatrice) suffisantes. En particulier il faut que l'emmagasinement (S) soit assez grand (pour que la réserve soit assez grande, mais aussi pour que la diffusivité ne le soit pas trop). Mais inversement la transmissivité ne doit pas être trop grande (risque d'écoulement souterrain trop rapide et de niveaux trop profonds : cas des réservoirs karstiques, exception faite s'il s'agit d'exploitation "régulatrice" saisonnière de réserve, notamment par pompage dans les sources).
- b - Existence d'une ou plusieurs couches assez productives (transmissivité minimale), à profondeur accessible garantissant un rendement suffisant des ouvrages de production.

N.B. Une fourchette de transmissivité "optimale" est donc nécessaire pour assurer à la fois la productivité et la capacité régulatrice dans le cas d'un réservoir assez homogène, à nappe libre.

- c - Débit moyen global naturel assez grand, d'un ordre non négligeable par rapport au débit global -ressources en eau potentielles- du bassin à aménager. La variabilité de l'alimentation est par contre secondaire si la condition (a) est remplie. La possibilité de prévoir sa variation ne s'impose généralement pas sauf lorsque la capacité régulatrice est réduite et que le régime d'exploitation ne peut s'affranchir suffisamment de la variabilité des apports.

N.B. Cette condition n'est pas nécessaire dans le cas d'un réservoir à nappe captive dont on exploite essentiellement la réserve, comme une mine.

De plus, les contraintes auxquelles le réservoir est soumis aux limites (niveau de nappe ou débit de rivière à conserver) et notamment le maintien de modes d'exploitation préexistants, doivent laisser un minimum de liberté d'action.

Chacune de ces conditions est nécessaire et son défaut est éliminatoire (sauf dans les exceptions notées). Mais aucun seuil de valeur absolue ne peut leur être attribué, car l'utilisabilité d'un réservoir ne peut être appréciée indépendamment d'une confrontation économique avec une gamme de solutions concurrentielles ou combinées à divers degrés, pour atteindre un objectif donné, donc sans tenir compte de la distribution de la demande (dans le temps et l'espace). Certains seuils peuvent de plus évoluer dans le temps, avec la valeur d'usage de l'eau, (compte tenu de sa qualité) et avec les coûts de production.

Le classement des réservoirs en "utilisables" et "inutilisables" ne peut reposer sur des critères purement physiques qui laissent subsister une marge de choix assez large. De plus il serait révisable. Néanmoins, beaucoup de réservoirs aquifères peuvent être éliminés sans hésitation et voués seulement aux exploitations individuelles "domestiques" c'est le cas notamment de tous ceux que leur productivité médiocre protège naturellement contre tout risque de surexploitation, ce qui rend inutile tout souci de gestion.

Tout réservoir répondant aux conditions précédentes, donc considéré comme utilisable ne se prête cependant pas également avec la même facilité à n'importe quel mode d'utilisation : ses conditions particulières, le type de système aquifère auquel il correspond, le prédisposent naturellement à certaines modalités techniques de gestion et peuvent au contraire en empêcher d'autres.

Le critère principal permettant de classer les réservoirs aquifères de ce point de vue est le degré de liaison hydraulique entre nappe et rivière, c'est-à-dire une condition aux limites.

Pour simplifier on peut distinguer, d'après ce critère, trois classes principales de réservoirs aquifères utilisables :

6.1. Les réservoirs bien liés aux rivières : réservoirs principalement monocouches, à nappe libre, en liaison avec des cours d'eau drainants -ou parfois alimentaires- à lit peu ou non colmaté, ou des sources.

Ces réservoirs sont les plus sensibles à l'irrégularité de l'alimentation naturelle et aux contraintes aux limites. Selon ces contraintes peuvent s'envisager :

- une exploitation permanente ou irrégulière, équilibrée avec effet étalé sur le débit des rivières. A l'extrême, le débit moyen d'exploitation globale peut approcher du débit naturel et les captages sont substitués aux émergences naturelles (tarissement des sources, des cours d'eau "indigènes" en étiage), si aucune contrainte ne s'y oppose.
- l'exploitation temporaire "régulatrice", soit en minimisant le risque de recyclage (effet minimal et différé sur le débit naturel des cours d'eau en étiage), soit en rendant le recyclage secondaire au regard du gain temporaire.
- l'alimentation artificielle, dans les mêmes conditions.

6.2. Les réservoirs imparfaitement ou partiellement liés aux rivières :

- soit des réservoirs comme les précédents, monocouches à nappe libre, mais en liaison avec des cours d'eau à lits colmatés et parfois à sources temporaires (trop-plein)
- soit des réservoirs hétérogènes multicouches à ensemble de nappes semi-captives et libres.

Ces réservoirs sont moins sensibles aux contraintes aux limites et offrent donc plus de liberté dans le choix des régimes et des dispositifs de captage, dont les effets sont généralement bien étalés dans le temps et dans l'espace sur les cours d'eau collecteurs. Mais inversement ils offrent moins de possibilités d'influencer sélectivement certaines limites à certaines périodes.

- soit encore le cas particulier des réservoirs à nappe libre en liaison discontinue (dans le temps) avec les cours d'eau : par exemple les réservoirs calcaires (karst) à zone noyée, à débit d'émergence périodiquement interrompu, l'influence de prélèvements; par exemple par rabattement de source vaclusienne, est alors essentiellement différée (retard dans la reprise de l'écoulement).

6.3. Les réservoirs indépendants

- soit des réservoirs simples ou complexes, à nappes libres ou semi-captives, à exutoires indépendants du système de cours d'eau de surface (émergences sous-marines, zones d'évaporation). Ces réservoirs peuvent être exploités de manière indépendante, mais sont soumis généralement à des contraintes particulières telles que la nécessité de rabattements extensifs soit pour diminuer les risques d'invasion marine, soit pour diminuer des "pertes" par évaporation.
- soit des réservoirs à nappe captive, à renouvellement généralement très faible. Ils permettent un régime d'exploitation indépendant, procurant des suppléments de ressource nets, mais temporaires (quoique à terme souvent assez long, décennal à séculaire).

CONCLUSIONS

L'étude d'un réservoir aquifère en vue d'apprécier la possibilité puis de proposer à bon escient les modalités de son utilisation aux calculs économiques, doit s'attacher essentiellement à la recherche des informations physiques suivantes :

- géométrie du réservoir (délimitation, dimensions)
- conditions aux limites, notamment liaisons avec les cours d'eau et origine de ces cours d'eau (interne au domaine du réservoir ou externe)
- constitution lithologique : système mono ou multicouches, ordre de grandeur des paramètres
- conditions hydrodynamiques : nappe libre, semi-captive ou captive
- ordre de grandeur du débit naturel moyen et régime de variation de l'alimentation.

L'ensemble de ces informations constitue un "modèle" du réservoir et de son fonctionnement, c'est-à-dire une synthèse schématique cohérente (beaucoup plus complète que le seul "bilan" global), pouvant être concrétisée par une simulation analogique ou mathématique s'il en est besoin.

Ce modèle sert d'abord à éprouver la sensibilité du système aux paramètres physiques et aux variables qui le conditionnent, donc à hiérarchiser les informations selon leur importance et à estimer quelles approximations nécessaires et suffisantes doivent les affecter.

Il sert ensuite à rechercher quels sont les effets de diverses hypothèses d'utilisation du réservoir et à vérifier leur compatibilité avec les conditions physiques aussi bien qu'avec les contraintes, C'est donc l'infrastructure d'un modèle économique.

ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE RESTREINTE

Les idées générales exposées sont fondées sur les concepts et les méthodes de l'hydrogéologie et de l'hydraulique souterraine modernes, formulés en de nombreux ouvrages de base qu'il n'est pas nécessaire de citer ici.

Les références suivantes ont trait essentiellement à l'utilisation des réservoirs aquifères considérée en relation avec les eaux de surface (à l'exclusion de l'alimentation artificielle *).

ALVAREZ FERNANDEZ C., de LUCIA R.J., FIERING M.B., LUECKE D.F.,
NGUYEN QUANG TRAC (1971)

Application of systems analysis models to the problem of conjunctive use of surface and groundwater in the Vega of Granada.

(Séminaire sur les eaux souterraines, F.A.O., Grenade, Oct. 1971)

BERKALOFF E., TIXERONT J. (1951)

Bilan d'eau des massifs calcaires en Tunisie.

(Description de cas de surexploitation saisonnière de réservoirs calcaires avec réaction sur des sources).

(Ass. gén. de Bruxelles, publ. A.I.H.S. n° 35, pp. 47-53)

CASTANY G. (1965)

Unité des eaux de surface et des eaux souterraines, principe fondamental de la mise en valeur des ressources hydrologiques.

(Bull. A.I.H.S. 1965, n° 3, pp. 22-30)

CASTANY G. (1967)

Structures hydrogéologiques et régularisation des ressources en eau.

(Sympos. HAIFA A.I.H.S., publ. A.I.H.S. n° 72, pp. 413-425)

* Consulter sur ce thème la bibliographie jointe à l'article de J. ARCHAMBAULT, J. BIZE et J. MARGAT "Alimentation artificielle des nappes souterraines" publié in Bull. B.R.G.M. section III, n° 1, 1968.

COLLINS R.E. (1959)

Fluid migration across fixed boundaries in reservoirs producing by fluid expansion.

(Petroleum transactions, A.I.M.E., vol. 216, p. 78-84)

CONKLING H. (1946)

Utilization of groundwater storage in stream-system development.

(Trans. Am. Soc. civ. eng., vol. III)

DROGUE C. (1969)

Contribution à la connaissance quantitative des systèmes hydrogéologiques karstiques péri-méditerranéens.

(comprend la description d'un cas de rabattement temporaire de source de karst par pompage : la source du Lez, dans l'Hérault).

(Thèse doc. état, Univ. Montpellier)

DUROZOY G. (1957)

Régularisation par pompage d'une source importante issue de massifs calcaires (Ain Bou Merzoug, près Constantine, Algérie).

(XXè Congr. géol. intern. Mexico, IV, p. 285-298)

FIERING M.B. (1971)

Simulation models for conjunctive use of surface and groundwater.

(Séminaire sur les eaux souterraines, F.A.O. Grenade, Oct. 1971)

FIERING M.B. (1971)

Models for groundwater analysis.

(Séminaire sur les eaux souterraines, F.A.O. Grenade, Oct. 1971)

FORKASIEWICZ J., GUILLAUME M. (1967)

Expérience d'exploitation de la réserve de la nappe sous-alluviale et sous-fluviale de la Meuse, au Nord de Verdun.

(Sympos. HAIFA A.I.H.S., publ. A.I.H.S. n° 72, pp. 143-158)

HANTUSH M.S. (1964)

Depletion of storage, leakage and river flow by gravity wells in sloping sands.

(Journ. Géoph. research, 1964)

HANTUSH M.S. (1965)

Wells near streams with semipervious beds.

(Journ. Geoph. research, 1965)

HANTUSH M.S. (1967)

Depletion of flow in right-angle stream beds by steady wells.

(Water resources research, 1967)

HOUDAILLE A., MARSILLY G. de (1969)

Débits soustraits à une rivière par un pompage effectué dans une nappe alluviale. Application aux périodes d'été.

(L'eau, n° 1, p. 25-29)

INESON J. (1970)

Accroissement du débit des rivières par exploitation de nappes souterraines.

(Soc. hydrot. de France, XI^e journées de l'hydraulique, Paris 1970)

INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE (1967-1968)

Etude de la régularisation du débit d'étiage des rivières par pompage dans la nappe. Simulations numériques.

(Rapports I.F.P. n° 225, 233, 248, 271, contribution à l'opération de recherche D.G.R.S.T. action concertée EAU)

JENKINS C.T. (1968)

Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells.

(Ground water, vol. 6, n° 2)

JENKINS C.T. (1968)

Electric-analog and digital computer model analysis of stream depletion by wells.

(Ground water, vol. 6, n° 6)

JOHNSON T.A., PETERS H.J. (1967)

Regional integration of surface and groundwater resources.

(Sympos. HAIFA A.I.H.S., publ. A.I.H.S. n° 72, pp. 493-499)

LELIEVRE R.F. (1969)

Influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel.

(Rapport Géohydraulique/BRGM, 69 SGL 073 HYD, janvier 1969)

MARGAT J. (1965)

Possibilité d'exploitation saisonnière des réserves régulatrices des nappes.

(Rapport B.R.G.M. - DS 65 A 42)

MARGAT J. (1968)

Balances de acuiferos y recursos en aguas subterraneas.

(F.A.O., Seminario de Hidrogeologica, Proyecto hidrogeologico de la Cuenca del Guadalquivir, Madrid, Mars 1968)

MARGAT J. (1969)

Ressources en eau souterraine et bilan des nappes.

(Rapport B.R.G.M. - 69 SGL 208 HYD)

MARGAT J., RAMON S. (1971)

Renforcement du débit d'étiage des cours d'eau par surexploitation saisonnière des réserves d'eau souterraine. Etude méthodologique et application au bassin de la Haute-Lys.

(C.R. de contrat de recherche D.G.R.S.T., action concertée EAU, rapport B.R.G.M. - 71 SGN 102 HYD)

MORTIER F. (1971)

Le rôle des eaux souterraines dans l'utilisation optimale des ressources hydrauliques.

(Séminaire sur les eaux souterraines, F.A.O. Grenade, Oct. 1971)

MOULDER E.A., JENKINS C.T. (1969)

Analog-digital models of stream-aquifer systems.

(Ground Water, vol. 7, n° 5, Sept. Oct.)

NAVARRO A., SAMPER A.A. (1965)

Problèmes de stockage des eaux dans le Sud-Est espagnol.

(Colloque Dubrovnik AIHS, publ. A.I.H.S., n° 73, p. 378-380)

SHANE R.M., MAVRIGIAN G., DAY H.J. (1968)

Hybrid computer simulation of a low-flow augmentation sub-surface storage system.

(Sympos. Tucson A.I.H.S., II, publ.A.I.H.S. n° 81, pp.604-609)