

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

AIDE - MÉMOIRE
SUR L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU
DES AQUIFÈRES SUBORDONNÉS AUX COURS D'EAU

par

M. BONNET et J. MARGAT



Département géologie de l'aménagement

Hydrogéologie

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

76 SGN 060 AME

Janvier 1976

S O M M A I R E

- - - - -

	<u>Page</u>
RESUME	
INTRODUCTION	1
1. AQUIFERES SUBORDONNES A DES COURS D'EAU	1
1.1. Définition du concept	1
1.2. Caractères communs	2
1.3. Variétés	3
1.4. Exclusions	4
2. DEBIT DES NAPPES ALLUVIALES SUBORDONNEES A DES COURS D'EAU	4
2.1. Débit global	4
2.2. Débit de nappe	4
2.3. Débits de production	4
3. RESSOURCES EN EAU DE CES AQUIFERES	5
3.1. Ressources naturelles	5
3.2. Ressources exploitables	6
4. CONTRAINTES POUVANT INTERVENIR DANS L'EVALUATION DES RESSOURCES EXPLOITABLES	6
a) Contrainte liée au débit de la rivière	6
b) Contraintes techniques	7
c) Contrainte de qualité	7
d) Contrainte économique	8
5. CONCLUSION	9
ANNEXE	

R É S U M É

Rappel du mode d'évaluation des ressources en eau exploitables des aquifères subordonnés à des cours d'eau, en fonction des conditions particulières de ces aquifères et des diverses contraintes physiques, pratiques et économiques qui peuvent intervenir.

Cet aide-mémoire, réalisé dans le cadre des travaux méthodologiques d'hydrogéologie du département "Géologie de l'aménagement", dérive de la note technique présentée à la réunion des hydrogéologues du B.R.G.M. à Nantes, le 11.10.1975. Il se propose surtout de faciliter une formulation correcte des objectifs d'étude fréquemment demandée aux hydrogéologues pour l'exploitation de ces aquifères d'une importance économique majeure.

Il rappelle en annexe la liste des questions à poser (et si nécessaire à résoudre) pour conduire ces études rationnellement et donne une bibliographie des principales méthodes à employer.

AIDE-MEMOIRE
SUR L'EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU
DES AQUIFERES SUBORDONNES AUX COURS D'EAU

INTRODUCTION

Une part notable des quantités d'eau souterraine exploitées en France* tant pour les "A.E.P." que pour l'industrie ou l'irrigation - est prélevée dans des aquifères subordonnés à des cours d'eau, aquifères alluviaux pour l'essentiel. Aussi l'évaluation correcte des ressources en eau de ces aquifères revêt-elle une importance particulière.

Ce bref rappel de notions générales à ce sujet est destiné surtout à aider les hydrogéologues à éliminer quelques confusions encore entretenues par certains de leurs interlocuteurs, à propos des débits et des ressources en eau exploitables dans les aquifères alluviaux liés aux rivières, donc à faciliter une formulation correcte des questions posées - et des objectifs d'étude demandée - visant à évaluer ces ressources.

1. AQUIFERES SUBORDONNES A DES COURS D'EAU

(cf "Water-course aquifers" des auteurs américains)

- 1.1. Ce concept est plus précis que celui d'aquifère alluvial : il exclut des aquifères alluviaux perchés ou non, ou peu liés à des cours d'eau (terrasses étagées par exemple), mais il peut inclure des aquifères non alluviaux (notamment le substratum aquifère des alluvions d'une vallée).

Autrement dit, tous les aquifères alluviaux ne sont pas liés à des cours d'eau et tous les aquifères subordonnés à des cours d'eau ne sont pas alluviaux.

* L'ensemble de ces prélèvements doit être actuellement de l'ordre de 4 à 5 km³/an (équivalent à un débit moyen de 120 à 150 m³/s) et il n'est pas excessif d'estimer à près de la moitié les prélèvements d'eau souterraine dans les aquifères subordonnés aux cours d'eau.

En outre, il s'agit d'aquifères liés à des cours d'eau exogènes **, ce qui exclut les aquifères liés à des cours d'eau indigènes, qui ne sont que des émergences de la nappe.

1.2 - Caractères communs :

- a - Liaison hydraulique continue et permanente, développée avec un cours d'eau exogène dont le niveau crée à la limite une condition de potentiel et dont les variations influencent la majeure partie de l'aquifère de manière prédominante sur d'autres facteurs du régime de la nappe, notamment sur l'alimentation propre de l'aquifère.

La configuration en général très allongée de ces aquifères (largeur faible au regard de leur extension longitudinale) rend leur régime partout très sensible aux conditions à cette limite.

En corollaire, les autres limites du système se caractérisent par une condition de flux, c'est-à-dire un débit imposé, en pratique indépendant des conditions internes du système ; ce débit peut être nul dans le cas d'une limite étanche.

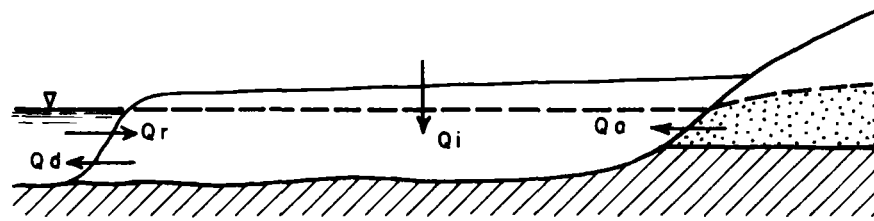
N.B. Cette définition exclut les aquifères alluviaux encaissés dans des aquifères plus étendus dont les caractéristiques sont du même ordre de grandeur (par exemple un aquifère alluvial en pays calcaire...), et qui ne constituent pas des systèmes aquifères indépendants.

- b - Il s'agit d'aquifères dont la fonction conductrice est beaucoup plus utilisable que la fonction capacitive : leur réserve est faible, mais surtout les fluctuations de niveau de la nappe - donc les variations de réserve - sont très dépendantes des variations des niveaux du cours d'eau ; la proximité de cette limite à condition de potentiel ne permet donc d'amplifier volontairement cette variation de réserve que dans une très faible mesure, par l'action des captages et un régime de prélèvements variables.

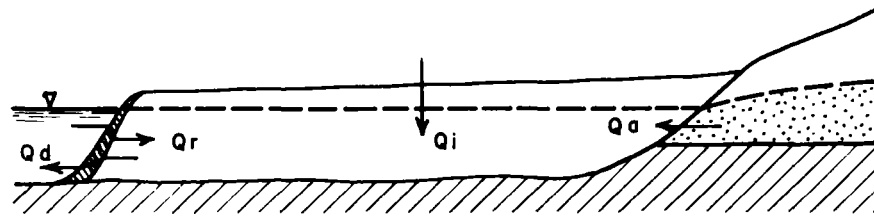
- c - Les ressources exploitables (renouvelables) peuvent être très supérieures aux ressources naturelles (alimentation en régime non perturbé).

Ces ressources exploitables "excédentaires" procèdent essentiellement de la possibilité d'agir sur les flux d'échange à la limite nappe/rivière, par l'influence des captages sur cette limite : l'effet de cette action, appelé réalimentation induite, au bénéfice de la nappe est la somme algébrique d'une diminution du flux qui s'écoulait initialement de la nappe à la rivière et/ou d'un accroissement du flux passant (initialement ou non)

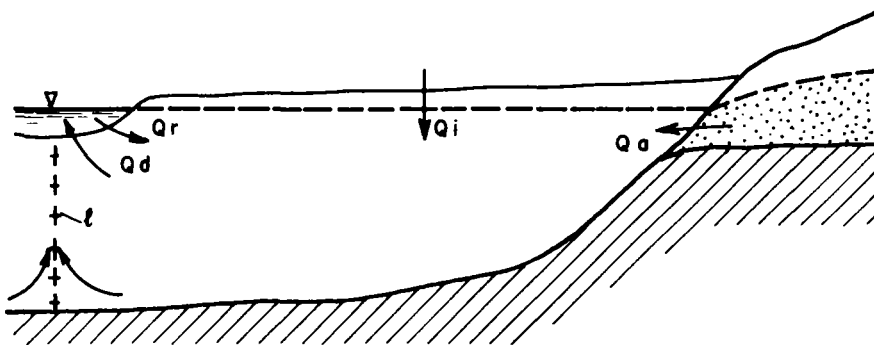
** C'est-à-dire né hors du système et dont en pratique le débit est relativement grand par rapport à celui qu'il reçoit du système, en régime naturel.



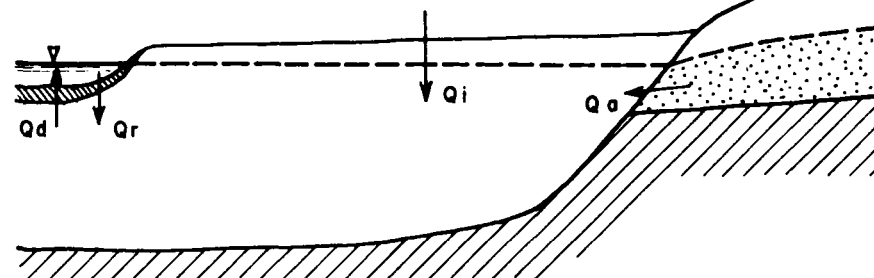
1 - rivière complète , non colmatée



2 - rivière complète , colmatée



3 - rivière à pénétration partielle non colmatée
l : ligne de séparation des écoulements



4 - rivière à pénétration partielle , colmatée

LEGENDE

	potentiel imposé (niveau de la rivière)		aquifère affluent
	niveau piézométrique		substratum "imperméable"
	colmatage		

fig.1 - Types d'aquifères subordonnés à une rivière selon la condition à la limite "rivière" (coupes)

(schémas de monocouches à nappe libre avec aquifère affluent à la limite "coteau")

les symboles sont identiques à ceux de la fig.2 -

de la rivière à la nappe (= $\Delta Q_d + \Delta Q_r$, fig.3). Cette même somme constitue le préjudice (manque à gagner + perte) subi par le débit de la rivière.

N.B. S'il est licite d'additionner pour définir ce "préjudice", les quantités "d'eau qui va en moins à la rivière" et "d'eau qui vient en plus de la rivière", il va de soi que la distinction de ces deux catégories d'origines différentes d'eau captée par un puits est d'un grand intérêt pratique sur le plan de la qualité. Il peut être nécessaire, de ce point de vue, de limiter les proportions d'eau de rivière captée par un puits riverain (cf infra 4, c).

1.3 - Variétés :

Distinguer plusieurs types selon :

- le degré de pénétration du cours d'eau - limite dans l'aquifère (rivière plus ou moins complète).
- le degré de colmatage du lit et des berges de la rivière.

D'où quatre schémas fondamentaux, à l'un desquels tout système réel doit pouvoir être ramené :

- rivière "complète", non colmatée
- rivière "complète", colmatée
- rivière à pénétration partielle ("incomplète"), non colmatée
- rivière à pénétration partielle, colmatée.

(cf fig. 1)

N.B. A chacun de ces schémas pourrait être ajoutée une variante substituant un substratum semi-perméable, imposant une condition de flux (entrant en général), au substratum "imperméable" (à flux nul) ; mais cette subdivision est de second ordre par rapport à celle basée sur la condition à la limite-rivière.

En principe il n'est pas nécessaire que la pénétration de la rivière dans l'aquifère soit totale pour que celle-ci constitue une limite du système : une ligne de séparation des écoulements existe généralement au voisinage de l'axe de la rivière et elle demeure stable à moins d'une très forte dissymétrie des prélèvements sur les deux rives.

En pratique, c'est seulement dans le cas où la pénétration d'une rivière est très partielle (par exemple de l'ordre du dixième de l'épaisseur de l'aquifère ou moins), ou dans le cas où l'aquifère est très stratifié (hétérogène verticalement) qu'une rivière incomplète ne constitue pas une limite rigoureuse d'un système aquifère : il faut alors -comme dans le cas d'une rivière très colmatée- considérer que les deux rives appartiennent au même système, limité par les deux coteaux.

1.4 - Sont à exclure de cette catégorie (en sus des parties alluviales d'aquifères étendus, à nappe libre) :

- des aquifères alluviaux libres très étendus peu ou non liés à des cours d'eau (exemple : nappe de la Crau)
- des aquifères alluviaux captifs ou semi-captifs, sous une couverture semi-perméable non recoupée complètement par les cours d'eau.

On ne considérera pas non plus, ici, le cas particulier des aquifères alluviaux de zone aride alimentés par des cours d'eau à écoulement très épisodique, donc sans liaison permanente ni continue, avec ceux-ci.

2. "DEBIT" DES NAPPES ALLUVIALES SUBORDONNEES A DES COURS D'EAU

Ne pas confondre :

2.1 - Le débit global naturel d'un système aquifère, terme de bilan du système : somme des flux sortant égale à la somme des apports (alimentation) pour l'ensemble d'un aquifère délimité, qui sont considérés soit à un instant donné, si le régime peut être supposé permanent (bilan de flux), soit pendant une durée assez longue pour rendre la différence de réserve négligeable (cf fig. 3).

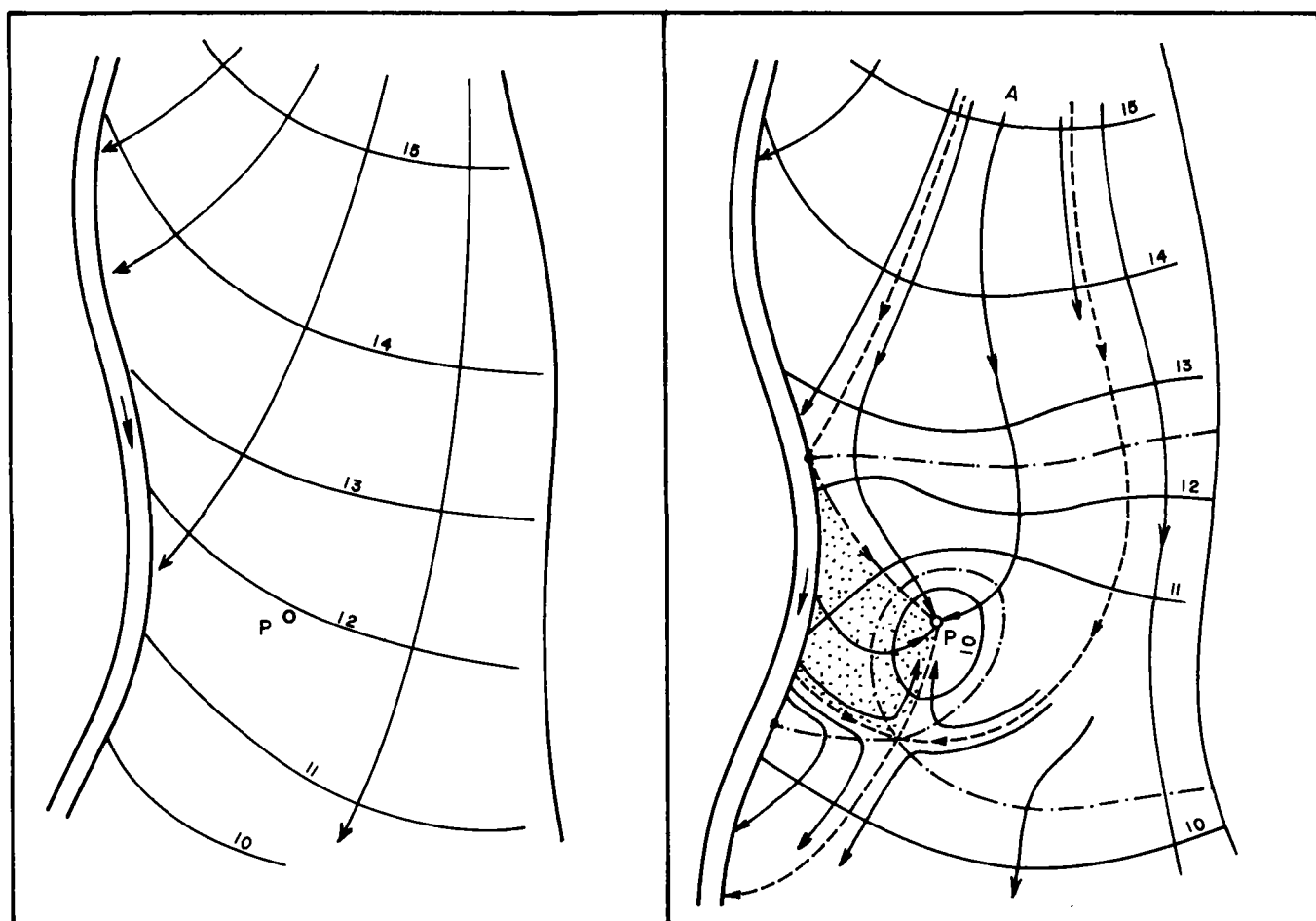
2.2 - Un débit de nappe suivant une section de vallée donnée : le flux local traversant une surface équipotentielle "transversale".

L'écoulement dans les aquifères de ce type étant, en général, sensiblement convergent -ou parfois divergent- et non parallèle au cours d'eau (et, en outre, souvent tri-dimensionnel localement) les surfaces équipotentielles pouvant servir à calculer des débits de nappe, peuvent différer notablement des sections planes "transversales" dans l'aquifère.

De ce fait, les évaluations de flux basées sur la transmissivité T , le gradient hydraulique i et la largeur de la vallée l ($Q = T.i.l$), qui supposent un état permanent de la surface piézométrique et un écoulement bi-dimensionnel sont très approximatives.

De toute manière, compte tenu de la configuration de ces aquifères et de la forme des écoulements, les flux qui traversent une section amont ou aval d'un système donné sont, en général, très inférieurs au débit global du système. Ces flux n'ont par ailleurs, aucun rapport avec les débits exploitables (cf 2.3).

2.3 - Les débits de production unitaires des puits (en régime permanent moyen) dans un aquifère donné, et leur somme (= débit d'exploitation global), qui peut être supérieure, égale ou inférieure au débit global.



a - Etat naturel

b - Etat influencé par le captage
(régime permanent)

LEGENDE

- ligne équipotentielle
- ligne de courant
- - - - - ligne de partage des eaux souterraines (limite de la zone d'appel du captage)
- . - . - ligne équipotentielle passant par des points singuliers
- //// limite étanche (coteau)
- P puits de captage (exploité en b)
- zone parcourue par l'écoulement de la rivière ou puits

fig. 2 - Effets d'un captage dans une nappe subordonnée à une rivière
Le débit capté en P est la somme du flux traversant la section A (fraction du "débit de la nappe" dans la section transversale amont) et du flux d'alimentation induite par la rivière. La forme de l'écoulement est influencée à la fois par la limite à condition de potentiel (rivière) et la limite étanche (coteau).

Ces débits ne dépendent (outre de la qualité des ouvrages) que des caractéristiques locales de l'aquifère et de la réaction sur une limite d'"alimentation" qui rend possible l'établissement d'un régime d'équilibre (permanent).

Ces débits sont sans rapport avec le flux traversant en régime non perturbé, la section aquifère où l'ouvrage est implanté puisque le captage modifie la distribution des potentiels, donc la forme des écoulements dans son voisinage jusqu'à la limite d'alimentation et dans toute son aire d'influence (cf fig. 2).

N.B. Comme on l'a souligné plus haut, à propos de la notion de "préjudice" porté au débit de la rivière, l'établissement du régime permanent au puits d'exploitation ne signifie pas que toute l'eau pompée -ni même une fraction- provient nécessairement de la rivière. La proportion d'eau de rivière effectivement captée peut varier de 0 à 100 % en fonction des caractéristiques de la nappe, du débit pompé et de la distance du puits à la rivière. En outre, cette proportion ne devient stable qu'après une durée nettement plus longue que la durée de mise en équilibre hydrodynamique.

Il ne peut donc y avoir cohérence entre les observations hydrodynamiques démontrant que le régime est permanent, et des observations directes sur le transfert des masses d'eau (par exemple par traçage), qu'après une durée très longue depuis le début d'un pompage.

3. RESSOURCES EN EAU DE CES AQUIFERES

N.B. Leur définition ne diffère pas foncièrement de celle de tout système aquifère à nappe libre en général.

3.1 - Les ressources naturelles ou potentielles équivalent au maximum à l'alimentation du système aquifère : somme des apports par l'infiltration efficace des précipitations sur le domaine, des apports souterrains à la limite "coteau" (accru éventuellement de pertes de cours d'eau affluant par cette limite), ou plus largement d'apports souterrains par le substratum (drainance), et d'apports naturels (non induits par des captages) de la rivière.

Ce débit global dépend surtout de l'étendue de l'aquifère : il sera souvent assez faible en raison de l'extension limitée des aquifères envisagés.

Il équivaut en moyenne (c'est-à-dire aux différences de réserve près, plus ou moins négligeables selon la durée de la période de référence) au débit total des émergences du système : pour l'essentiel au flux drainé par le cours d'eau limite et ses éventuels affluents "indigènes" (= écoulement souterraine fournir par le système).

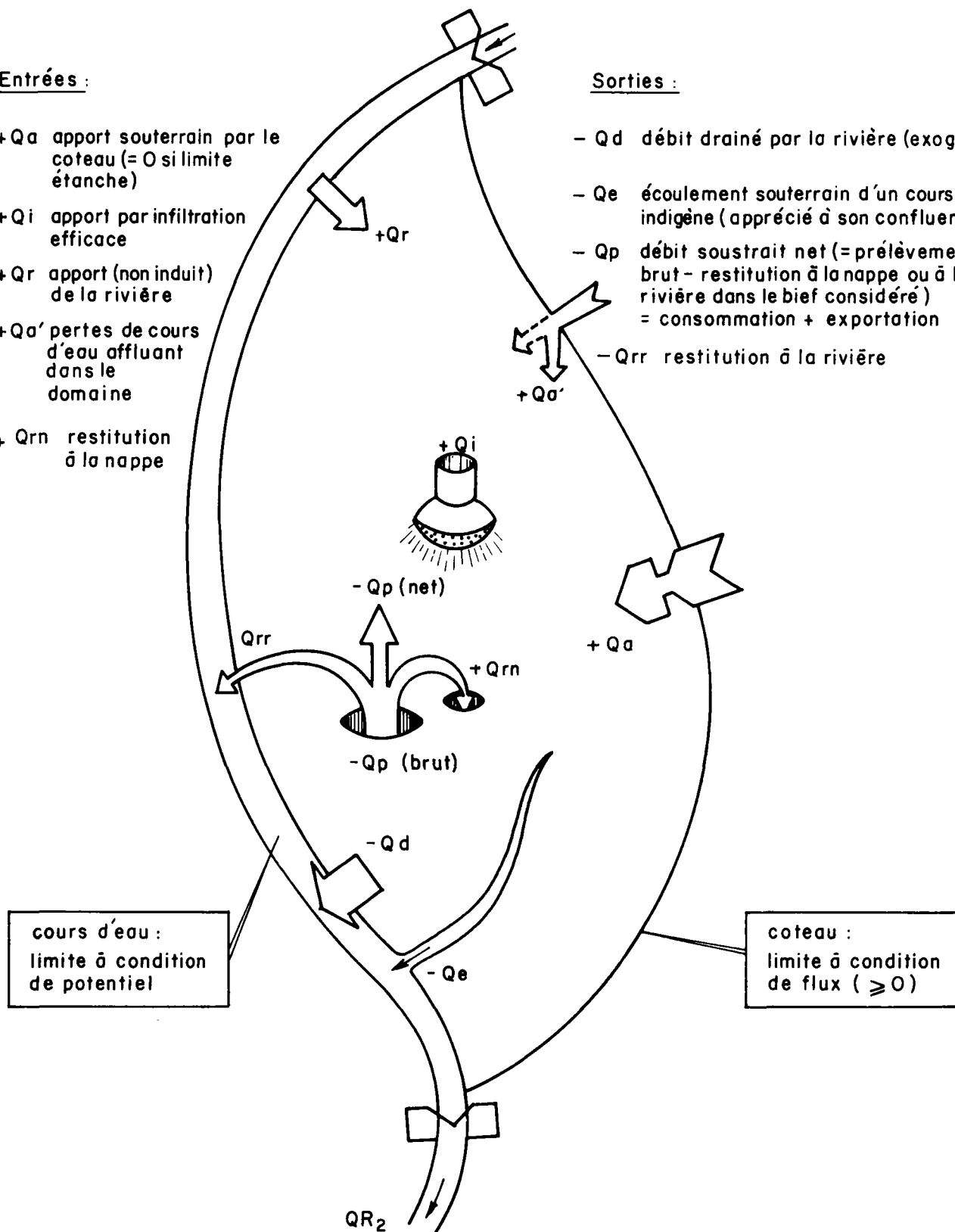
Ces ressources naturelles n'ont qu'une signification pratique très limitée.

Entrées :

- + Q_a apport souterrain par le coteau (= 0 si limite étanche)
- + Q_i apport par infiltration efficace
- + Q_r apport (non induit) de la rivière
- + Q_a' pertes de cours d'eau affluant dans le domaine
- + Q_{rn} restitution à la nappe

Sorties :

- Q_d débit drainé par la rivière (exogène)
- Q_e écoulement souterrain d'un cours d'eau indigène (apprécié à son confluent)
- Q_p débit soustrait net (= prélèvement brut - restitution à la nappe ou à la rivière dans le bief considéré) = consommation + exportation
- Q_{rr} restitution à la rivière



équilibre naturel : $Q_i + Q_a + Q_a' + Q_{r_0} - Q_{d_0} - Q_{e_0} = 0 \quad (Q_p = 0)$

équilibre en régime d'exploitation : $Q_i + Q_a + Q_a' + Q_{r_1} - Q_{d_1} - Q_{e_1} - (Q_{p_{brut}} - Q_{rn}) = 0$

avec $Q_{r_1} > Q_{r_0}$, $Q_{d_1} < Q_{d_0}$ et $Q_{e_1} < Q_{e_0}$

$\Delta Q_d + \Delta Q_e + \Delta Q_r - Q_{rr} = Q_p(\text{net}) = \text{préjudice subi par le cours d'eau}$

ressources exploitables = Q_p max. en respectant les contraintes

fig. 3 - Système aquifère alluvial subordonné à un cours d'eau (schéma monocouche)

- 3.2 - Les ressources exploitables dépendent des contraintes (physiques, économiques) qui commandent la proportion du débit global pouvant être captée en pratique, mais cette proportion s'applique non aux ressources naturelles définies ci-dessus, mais au débit global accru par les effets de l'exploitation sur la limite nappe/rivière (réalimentation induite).

De ce fait, les ressources exploitables sont celles du système nappe-rivière, et non du seul système aquifère.

4. CONTRAINTES POUVANT INTERVENIR DANS L'EVALUATION DES RESSOURCES EXPLOITABLES.

Evaluer les ressources exploitables revient en pratique à identifier la contrainte prédominante, c'est-à-dire, celle qui restreint le plus la possibilité d'exploitation d'eau dans l'aquifère -ce qui rend donc, en principe, inutile sauf localement de tenir compte des autres- puis à apprécier la latitude d'exploitation permise en respectant cette contrainte.

Schématiquement, en sus des contraintes inhérentes à toute exploitation d'eau souterraine dans un aquifère quelconque (rabattements maximaux admissibles dans les puits et en tous points de l'aquifère), les contraintes spécifiques suivantes peuvent se présenter :

a - Contrainte liée au débit de la rivière :

D'abord une contrainte absolue : le préjudice total subi par la rivière doit être à tout moment $\leq$ à son débit à la section aval (QR2, cf fig. 3).

Plus généralement, cette contrainte sera plus sévère si on impose la conservation d'un débit minimal de la rivière, notamment en période d'étiage, et la continuité de l'écoulement sur toute la longueur de la rivière (cette contrainte ne peut naturellement pas être seulement globale). Les ressources exploitables sont alors au maximum égales au débit d'écoulement à l'aval diminué du débit à conserver, en se plaçant surtout en situation d'étiage, dans la mesure où la possibilité de tirer parti de la capacité du réservoir est réduite (c'est généralement le cas, on l'a dit (1.2.b), sauf si la liaison nappe/rivière est mauvaise et si le réservoir est assez puissant). De plus, le préjudice admis sur le débit de la rivière doit être suffisamment étalé dans l'espace.

- a' - Contrainte similaire complémentaire dans le cas particulier où existe un (ou plusieurs) cours d'eau "indigènes", formés dans le domaine aquifère et le drainant : conservation du débit (ou d'un % minimal du débit) de ces cours d'eau.

N.B. Les contraintes (a) et (a') sont essentiellement fonction de l'utilisation, locale ou éloignée en aval, des eaux de surface : demande de quantité et de qualité (le maintien d'un débit minimal peut être commandé d'abord pour assurer une dilution suffisante des effluents divers rejetés au cours d'eau et prévenir sa pollution). Elles doivent donc être fixées par les autorités responsables de la gestion des eaux où chargées d'arbitrage entre différents utilisateurs.

b - Contraintes techniques :

La possibilité pratique maximale de provoquer la réalimentation induite par rabattement des niveaux de la nappe au voisinage de la rivière sans rompre la liaison hydraulique nappe/rivière.

Cette possibilité dépend globalement de la longueur de la limite nappe/rivière (donc de la configuration et des dimensions du système aquifère), mais aussi de la qualité de la liaison qui peut varier selon les secteurs.

Cette contrainte peut limiter les débits exploitables, secteur par secteur, (plus ou moins), et partant, elle peut restreindre dans certains cas, davantage que la précédente (a), les ressources exploitables, notamment lorsque la rivière est assez colmatée ou à pénétration très partielle.

Il faut aussi tenir compte du fait que la réalimentation induite peut déterminer un accroissement du colmatage.

N.B. Les ressources exploitables peuvent dans ce cas être accrues par alimentation artificielle, mais inversement, elles peuvent être diminuées par un aménagement fluvial provoquant ou accusant le colmatage.

c - Contrainte de qualité :

On s'impose de ne pas appeler d'eau de la rivière, ou de limiter la proportion d'eau de rivière captée par les puits, à cause de sa qualité plus mauvaise que celle des eaux de la nappe provenant de son alimentation propre, (notamment lorsque la rivière est polluée ou se trouve très exposée à des risques de pollution).

Dans ce cas, les ressources exploitables sont au plus égales, et en pratique inférieures aux ressources naturelles (alimentation de l'aquifère).

N.B. Il en est de même, à fortiori, si l'aquifère est en partie limité par la mer, avec existence d'une interface eau douce/eau salée.

- d - Enfin, une contrainte économique peut intervenir, si l'on impose un coût de production maximal, limitant en pratique les rabattements tolérables ou fixant des productivités unitaires minimales admissibles, ce qui peut empêcher de provoquer toute la réalimentation induite physiquement et techniquement (ou administrativement) possible.

N.B. Cette contrainte est fixée par la demande et non par l'offre, mais elle est bien liée aux caractéristiques de l'aquifère qui déterminent les productivités unitaires des ouvrages.

Ces différentes contraintes pourraient se formuler par une série d'inéquations qu'il faut toutes satisfaire pour définir les ressources exploitables globales Q_p :

$$\begin{aligned} Q_p &< QR2 \\ Q_p &< QR2 - QR2_{min} - (Q_{d1} + Q_{e1}) \\ Q_p \text{ (brut)} &< Q_c \\ Q_p &\leq Q_i + Q_a \text{ si on impose } Q_{r1} = Q_{ro} \\ &\text{et } Q_d \text{ irréversible} \end{aligned}$$

En appelant :

- $QR1$ le débit de la rivière à sa section amont
- $QR2$ le débit de la rivière à sa section aval
- Q_d le débit apporté par la nappe à la rivière
- Q_e le débit d'écoulement souterrain de cours d'eau indigènes.
- Q_c somme des prélèvements risquant de rompre la liaison hydraulique nappe/ rivière
- Q_i alimentation de l'aquifère par infiltration efficace
- Q_a alimentation de l'aquifère par apports du coteau
- Q_{ro} alimentation de l'aquifère par apports non induits de la rivière.

N.B. En fait, pour la plupart, ces contraintes ne sont pas globales et elles interviendraient différemment selon les positions des captages dans le domaine aquifère et le régime de variation des prélèvements.

Dans la mesure où le choix des sites d'implantation des captages est limité, (notamment par l'occupation des sols dans le domaine) voire imposé par la demande, l'évaluation des "ressources exploitables" se ramène à la détermination du débit d'exploitation maximal (ou optimal) des captages fixés.

5. CONCLUSION

L'étude visant à évaluer les ressources en eau exploitables d'un aquifère subordonné à un cours d'eau consistera :

- 1° - à bien définir le système aquifère et ses conditions aux limites, notamment la nature de la liaison nappe/rivière ;
- 2° - à identifier et définir les contraintes, et à apprécier leur hiérarchie ;
- 3° - à évaluer les effets (éventuellement par simulation) de divers plans d'exploitation (dispositifs d'ouvrages et régime de prélèvement) et à comparer ces effets aux contraintes en cherchant :
 - . soit à maximiser le débit produit en respectant les contraintes,
 - . soit à optimiser le coût de production.

En pratique, il n'y a donc pas de réponse unique à la question souvent (mal) posée d'évaluer a priori les ressources en eau exploitables par un débit global (moyen) : ces ressources ne peuvent être évaluées qu'en fonction d'une demande (exprimée ou supputée) plus ou moins flexible mais fixant un minimum d'exigences réalistes.

一、引言

— — — — —

1.1. "Nature" des relations nappe-rivière

1.2. Délimitation du système et détermination des conditions aux limites

d'irrigation haut par exemple).

(voir fig. A1)

* Nota : Tous les cas intermédiaires peuvent exister.

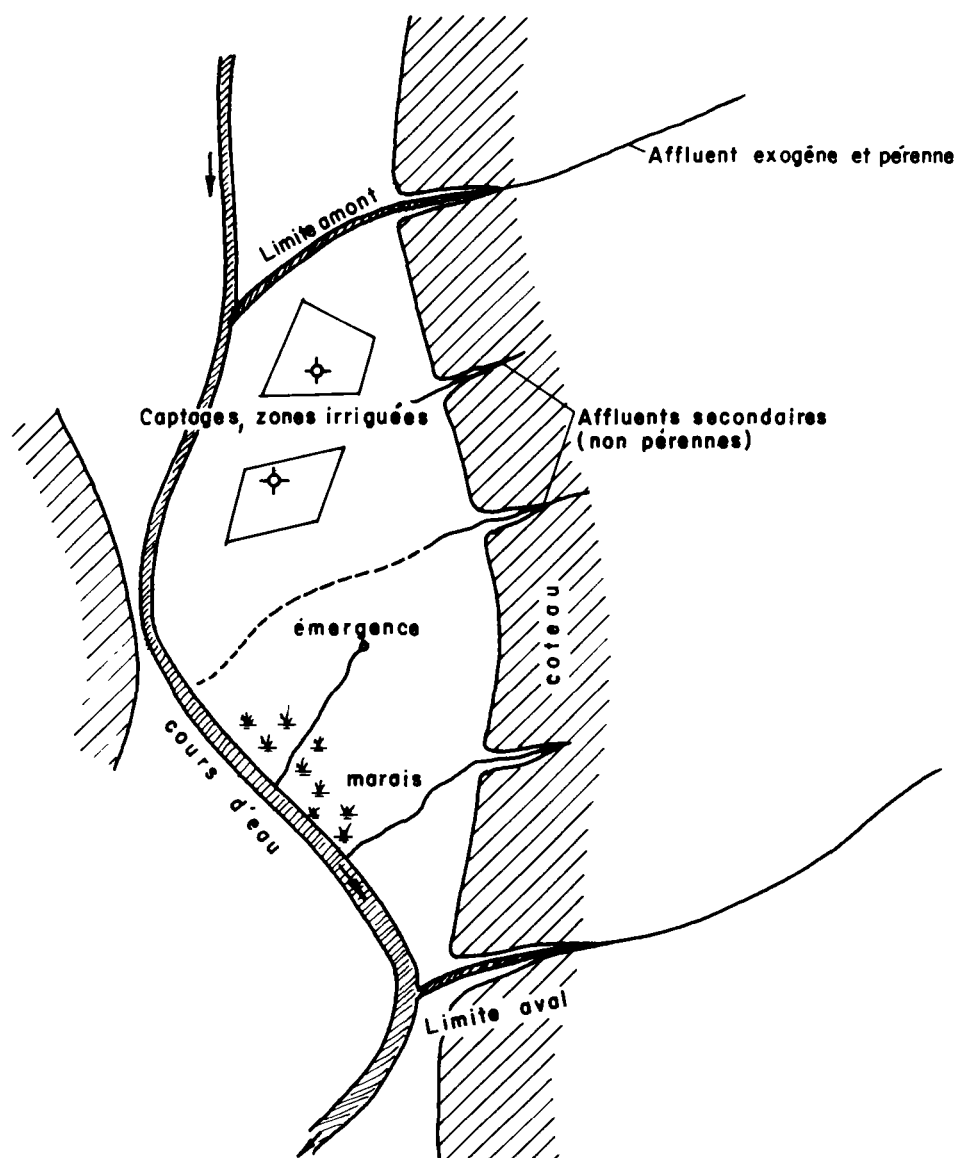


Figure A1 - SCHEMA D'AQUIFERE SUBORDONNE (ou nappe dite alluviale)

1.3. Prélèvements et apports dans le domaine

Recherche et évaluation sommaire des parts respectives de :

- prélèvements par puits et forages
- infiltration pluie
- infiltration des irrigations et pertes de canaux
- infiltration de cours d'eau non pérennes provenant des coteaux (voir fig.)
- évapotranspiration dans zones marécageuses
- échanges avec un aquifère sous-jacent.

2. ANALYSE DU COMPORTEMENT DU SYSTEME

Piézométrie - On peut se contenter d'une description assez sommaire de la piézométrie générale (cartes) instantanée surtout au milieu de la plaine. Mais resserrer les points d'observation au voisinage des limites :

- près du coteau (vérification de l'existence, importance et pérennité des apports)
- au contact rivière-nappe (analyse du colmatage).

Pour ce qui concerne la date d'établissement de cartes synchrones en considérer, si possible, 3 : hautes eaux, basses eaux et moyennes eaux (voir à ce sujet P. PEAUDECERF, 1970).

Insister, en quelques points judicieusement choisis, sur les variations dans le temps en enregistrant simultanément les phénomènes qui peuvent en être la cause :

. Piézomètre près du cours d'eau : enregistrer simultanément les niveaux du cours d'eau - au droit du piézomètre (ou mieux du profil)

. Piézomètre près du coteau : enregistrer un niveau dans le coteau

. Piézomètre central : enregistrer la pluie, les variations de production des captages, le régime des canaux et des irrigations.

Hydrométrie

Ne recueillir systématiquement des données hydrométriques que si les débits sont assez faibles, c'est-à-dire pour les cours d'eau endogènes nés dans le système et pour les affluents secondaires descendant du coteau. Critiquer plus soigneusement les données pour le cours d'eau principal.

Se rappeler que la technique des jaugeages différentiels ne donne des résultats significatifs que pour les faibles valeurs ; sinon l'erreur de mesure peut être supérieure à la différence que l'on souhaite apprécier (voir à ce sujet note technique n° 76/2 de M. CANCEILL) : faire, ou faire faire par AME, un calcul d'erreur pour valider toute mise en place de dispositif de jaugeage différentiel.

Toutefois, il faut connaître au moins l'ordre de grandeur du débit du cours d'eau car il peut être une contrainte d'exploitation (voir ce rapport page 6).

Dans le même ordre d'idée, enregistrer la qualité de l'eau.

3. MESURE DES PARAMETRES - INDENTIFICATION DIRECTE DES CONDITIONS AUX LIMITES

3.1. Transmissivités

C'est le paramètre essentiel dans la mesure où les "aquifères alluviaux" sont surtout utilisables comme drains vis à vis des écoulements superficiels - ou, pour une part souvent beaucoup plus faible, vis à vis des coteaux.

Pour la répartition des points de mesure et des types d'essais, distinguer trois zones :

. zone riveraine : utiliser autant que possible les variations induites par les fluctuations de niveau du cours d'eau sur des piézomètres implantés selon des profils perpendiculaires à la berge.

Identifier également le colmatage (voir à ce sujet P. PEAUDECERF, 1970 ou BERAUD, CLOUET, D'ORVAL, 1975).

Les interprétations de fluctuations ne donnent que la diffusivité (T/S). Il faut donc compléter par des essais. Ne pas les placer trop près des berges (stabilisation trop rapide). Penser au colmatage (BERAUD, CLOUET, D'ORVAL, 1975 - HANTUSH, 1975). Enregistrer les variations éventuelles de qualité dues à l'apport d'eau de la rivière.

. zone centrale : Essais classiques - Se préoccuper le cas échéant de la drainance. C'est là qu'elle doit être le plus aisé à déterminer (J. FORKASIEWICZ, 1972). Dans cette zone, qui peut être en cas d'exploitation intensive soumise à de forts rabattements, il faut bien connaître le substratum et éventuellement adopter des techniques d'essais particulières spécifiques des nappes libres (J. FORKASIEWICZ, P. PEAUDECERF, 1970).

. zone proche du coteau : Chercher également à préciser la nature du coteau (limite étanche ou limite à flux) donc positionner quelques essais assez près du coteau. Le cas échéant, contrôler même la transmissivité dans le coteau.

3.2. Emmagasinement

Assez peu utile en pratique. La diffusivité identifiée à partir des fluctuations doit suffire dans la plupart des cas.

3.3. Prélèvements

L'inventaire des prélèvements existants au moment de l'étude est fondamental. Dans le cas d'irrigations, la meilleure méthode est de connaître la surface irriguée et les besoins en eau des plantes.

Ne pas oublier de noter pour chaque point le prélèvement à la fois moyen annuel (essentiel) et sa modulation saisonnière.

3.4. Infiltrations des pluies

Souvent négligeables dans le bilan de telles nappes et surtout devant les débits exploitables par prélèvement induit à la rivière.

Donc, sauf exception, à justifier soigneusement, ne pas consacrer trop d'efforts à évaluer ce terme. Quelques calculs par méthode de TURC ou THORNTHWAITE (ref. : M. BONNET, O. DELAROZIERE-BOUILLIN, CL JUSSERAND, P. ROUX, 1970 - O. DELAROZIERE-BOUILLIN, 1971 - B. LEMOINE, 1972 - G. RAM-PON, 1973) doivent suffire.

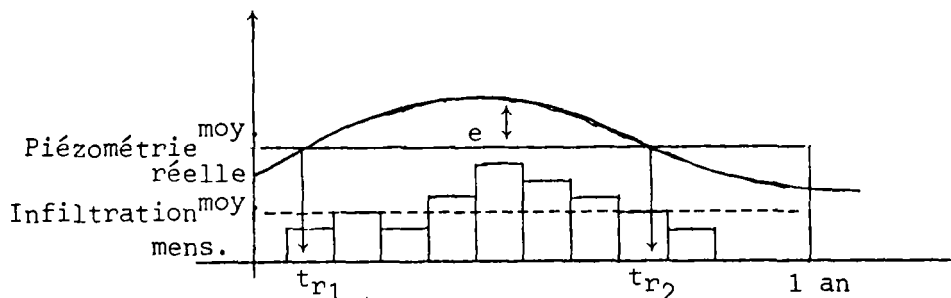
3.5. Infiltrations des irrigations

Peuvent être, dans certains cas, importantes. Si l'eau provient de forages à la nappe, tenir compte du retour pour calculer le prélèvement réel du forage (en général, il suffit d'appliquer un coefficient d'abattement au débit brut). Si l'eau est amenée de l'extérieur, faire la cartographie des zones irriguées et s'efforcer d'évaluer le retour à partir des consommations d'eau et des modalités de culture.

4. SYNTHESES - CALCULS - MODELES

4.1. Synthèse de "l'état actuel"

Elle se fait souvent par un modèle en régime permanent. Il faut alors ramener à une moyenne l'ensemble des données qui vont servir de condition imposée et de référence. Le mieux est de prendre une période de un an et de raisonner sur des moyennes annuelles (figure ci-dessous) surtout pour ce qui concerne les conditions imposées (infiltration, niveaux aux limites, prélèvements, etc...).



En ce qui concerne la piézométrie de référence, on peut prendre une carte synchrone enregistrée à un moment (t_{r1} ou t_{r2}) où les niveaux étaient voisins de la moyenne (ces instants sont déterminés sur les quelques piézomètres où ont été faits des enregistrements continus).

L'écart entre les niveaux moyens et les niveaux extrêmes donne une évaluation de la "précision" qu'il est raisonnable d'exiger du modèle, donc du critère de calage à adopter et du maillage.

4.2. Prévisions

S'il s'agit de prévisions d'influence locale, on peut avoir recours à des formules analytiques :

- influence des variations de niveau des cours d'eau (réf. : J.F. BERAUD et M. CLOUET D'ORVAL, 1975)
- calcul du préjudice subi par la rivière par suite de pompage dans la nappe (voir réf. : J.F. LELIEVRE, 1969 - L. LE BARBE, 1975 - et surtout J. FORKASIEWICZ et P. PEAUDECERF, 1976 qui fait le point de la question)
- calcul des ouvrages de captage (réf. : J. FORKASIEWICZ et P. PEAUDECERF, 1976 - à paraître).

Pour définir un plan d'exploitation de la nappe, il faut avoir recours à un modèle de simulation, mais aussi éventuellement aux techniques de recherche opérationnelle. Bien déterminer en complément de l'étude du système la liste des contraintes à l'exploitation.

Ce sont en général ces contraintes (de natures très diverses) qui fixent la ressource exploitable (voir ce rapport, page 6 §3.2. et pour plus de détail J. AURIOL, M. BONNET et M. VANDENBEUSCH, 1975) - M. VANDENBEUSCH, 1973 (nos 73 SGN 161 AME et 73 SGN 433 AME).

Une contrainte courante est la nécessité de maintenir le débit du cours d'eau à une certaine valeur imposée par les "droits d'eau" des riverains à l'aval ou par une règle de prévention de la pollution (qui résulterait d'une dilution insuffisante des rejets d'effluents dans le cours d'eau).

De nombreuses études ont été consacrées à ce problème aux U.S.A. (voir bibliographie détaillée à ce sujet).

BIBLIOGRAPHIE

Identification des paramètres

1. J. FORKASIEWICZ (1972) .- Interprétation des données de pompages d'essai. Aide mémoire .- Rapport BRGM n° 72 SGN 273 AME.
2. J. FORKASIEWICZ et P. PEAUDECERF (1970) .- Méthode d'interprétation des pompages d'essai en nappe libre .- Rapport BRGM n° 70 SGN 359 HYD.
3. P. PEAUDECERF (1970) .- Calcul automatique de la diffusivité des nappes en relation avec un plan d'eau libre .- Rapport BRGM n° 70 SGN 083 HYD.
4. J.F. BERAUD et M. CLOUET D'ORVAL (1975) .- Etude du colmatage du lit d'une rivière en relation avec une nappe souterraine.- Rapport BURGEAP, janv. 1975.
5. S.M. HANTUSH (1965) .- Pompage d'essai dans un puits à proximité d'une rivière colmatée .- Traduction BRGM en cours.
6. P. PEAUDECERF et H. TALBO (1970) .- Etude des méthodes de mesure ponctuelle de la diffusivité des couches aquifères .- Rapport BRGM n° 70 SGN 269 HYD.

Infiltration - pluie efficace

7. M. BONNET, O. DELAROZIERE-BOUILLIN, C.L. JUSSERAND, P. ROUX (1970) .- Calcul automatique des "bilans d'eau" mensuels et annuels par les méthodes de THORNTHWAITE et de TURC .- Rapport BRGM n° 70 SGN 107 HYD.
8. O. DELAROZIERE-BOUILLIN (1971) .- Evaluation des ressources hydrauliques. Utilisation comparée des formules de THORNTHWAITE, TURC mensuelle, TURC annuelle et PENMAN pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle moyenne. Application au territoire français .- Rapport BRGM n° 71 SGN 173 HYD.
9. B. LEMOINE (1972) .- Utilisation comparée des formules de THORNTHWAITE, TURC mensuelle et TURC annuelle pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne. Application à une sélection de points répartis dans le monde .- Rapport BRGM n° 72 SGN 372 AME.
10. G. RAMPON (1973) .- "Bilans d'eau et pluie efficace". Calcul automatique des "bilans d'eau" décennaires et annuels par la méthode de TURC. Définition et représentation graphique des variations du "solde de la pluie efficace".- Rapport BRGM n° 73 SGN 373 AME/BDP

Calculs

11. J.F. LELIEVRE (1969) .- Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel .- Rapport BRGM n° 69 SGL 073 HYD
12. L. LE BARBE (1975) .- Part du débit d'un puits provenant d'un cours d'eau voisin. Calcul en régime permanent .- Rapport BRGM n° 75 SGN 159 AME.
13. J. FORKASIEWICZ et P. PEAUDECERF (1976) .- Evaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain .- Rapport BRGN n° 76 SGN 032 AME
14. J. FORKASIEWICZ et P. PEAUDECERF .- Calcul des ouvrages de captage (puits ou forages, puits à drains rayonnants, ouvrages de drainage) .- Rapport BRGM - AME à paraître en 1976.
15. M. CANCEILL (1976) .- Conditions d'emploi de la méthode des pompages différentiels .- Note technique n° 76/2.

Optimisation du projet d'exploitation

16. J. AURIOL, M. BONNET et M. VANDENBEUSCH (1975) .- Optimisation des dispositifs de captage pour l'irrigation par simulation sur modèles mathématiques et programmation linéaire .- Communication au congrès C.I.I.D., Moscou, 1975.

et pour plus de détails :

17. M. VANDENBEUSCH (1973) .- Implantation optimale des captages. Programme OPPER .- Rapport BRGM 73 SGN 161 AME.
18. M. VANDENBEUSCH (1973) .- Gestion des ressources . Programme PROLI .- Rapport BRGM n° 73 SGN 433 AME.

Références américaines diverses : (contacter Département AME-Documents)

- BITTINGER M.W., Simulation and analysis of stream-aquifer systems
Ph.D. dissertation, 107 pp., Dep. of Civ. Eng., Utah State Univ.,
Logan, Utah, 1967.
- BOUWER H., Theory of seepage from open channels, in *Advances in Hydroscience*, edited by V.T. Chow, vol. 5, pp. 121-172, Academic, New York, 1969.
- BREDEHOEFT J.D. and R.A. YOUNG, The temporal allocation of groundwater - A simulation approach, *Water resour. Res.*, 6 (1), 3-21, 1970.
- CARSLAW H.S. and J.C. JAEGER, *Conduction of Heat in solids*, 510 pp
Oxford at the Clarendon Press, London, 1959.

- DOOGE J.C.I., Linear theory of hydrologic systems, *U.S. Dep. Agr. Tech. Bull.*, 1468, 327 pp., 1973.
- DOUGLAS J. and H.H. RACHFORD, On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables, *Trans. Amer. Math. Soc.*, 82, 421-439, 1956.
- ESHETT A. and M.W. BITTINGER, Stream-aquifer system analysis, *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, 91 (HY6), 153-164, 1965.
- FORSYTHE G.E. and C.B. MOLLER, Computer solution of linear algebraic systems, 148 pp., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1967.
- GARABEDIAN P.R., *Partial Differential Equations*, 672 pp., John Wiley, New York, 1964.
- GLOVER R.E., Groundwater-surface water relationships, paper presented at Western Resources Conference, Colo. State Univ., Boulder, Colo., August 1960.
- JENKINS C.T., Techniques of computing rate and volume of stream depletion by wells, *Ground Water J.*, 6 (2), 37-46, 1968a.
- JENKINS C.T., Electric-analog and digital-computer model analysis of stream depletion by wells, *Ground Water J.*, 6(6), 27-34, 1968b.
- MADDOCK T., III, Algebraic technological functions from a simulation model, *Water Resour. Res.*, 8(1), 129-134, 1972.
- MADDOCK T., III, The operation of a stream-aquifer system under stochastic demands, *Water Resour. Res.*, 10(1), 1-10, 1974.
- MOREL-SEYTOUX H.J., Domain variations in channel seepage flow, *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, 90(HY2), 55-79, 1964.
- MOREL-SEYTOUX H.J., A simple case of conjunctive surface groundwater management, *Ground Water J.*, in press, 1975.
- MOREL-SEYTOUX H.J., R.A. YOUNG and G.E. RADOSEVICH, Systematic design of legal regulations for optimal surface-groundwater usage, *OWRR Competition, Rep. Ser. 53*, 81 pp., Environ. Resour. Center, Colo. State Univ., Fort Collins, August, 1973.
- MOULDER E.A. and C.T. JENKINS, Analog-digital models of stream-aquifer systems, *Ground Water J.*, 7(5), 19-24, 1969.
- PINDER G.F. and J.D. BREDEHOEFT, Application of the digital computer for aquifer evaluation, *Water Resour. Res.*, 4(5), 1069-1093, 1968.

PRICKETT T.A. and G.G. LONNQUIST, Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation, *Ill. State Water Surv. Bull.*, 55, 1971.

YOUNG R.A., Safe yield of aquifers : An economic reformulation. *J. Irrig. Drain. Div. Amer. Soc. Civil Eng.* 96(IR4), 377-385, 1970.

YOUNG R.A. and J.D. BREDEHOEFT, Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems, *Water Resour.* 8(3), 533-556, 1972.