

METRO DE LYON.
CONSTRUCTION SOUS LE NIVEAU
DE LA NAPPE PHREATIQUE

Bouyat, C. ; Picod, G. ; Fages, R.

ABSTRACT : The construction of the first line of LYON's Underground Railway which structures enter in the aquifer of Rhône's alluvions needed a complete study of the hydrologic relations between the rivers and the ground water table. Expounding the relations ground water table-river level, the mathematical models used have permitted to estimate the reverberations on the water table of different river rises for determined points of the concerned field and also, the influence of the underground works on the flood of the ground water and the consequences on the water table after stopping important pumping in the ground. These different calculations have permitted to define the water levels to take for each phase of the realization and the future exploitation of the works.

RESUME : La construction de la première ligne du Métro de LYON, dont les ouvrages pénètrent dans l'aquifère des alluvions du Rhône, a nécessité une étude approfondie des relations hydrologiques entre les fleuves et la nappe phréatique. En explicitant les relations nappe-fleuve, les modèles mathématiques mis au point ont permis d'estimer les répercussions sur la nappe de diverses crues fluviales en de points déterminés du domaine étudié, ainsi que l'influence de la présence des ouvrages du Métro sur l'écoulement de la nappe phréatique et les conséquences de l'arrêt de pompages importants au voisinage du métro. Ces diverses simulations ont permis de définir les niveaux d'eau à prendre en compte à tous les stades de la réalisation et de l'exploitation future des ouvrages.

RESUMEN : La construcción de la primera línea del Metro de Lyon, bajo el acuífero de los aluviones del Ródano, ha requerido un estudio muy completo de las relaciones hidrológicas entre los ríos y el acuífero freático. Los modelos matemáticos puestos a punto, al hacer explícitas las relaciones acuífero-río, han permitido estimar las repercusiones de diversas crecidas fluviales sobre el acuífero, en puntos determinados del dominio estudiado, así como la influencia de las obras del Metro en el drenaje del acuífero freático, y las consecuencias de las paradas de bombeos caudalosos en la proximidad del Metro. Esas diversas simulaciones han permitido definir los niveles de agua a tener en cuenta, en todas las fases de la realización y de la futura explotación de las obras.

S.E.M.A.L.Y. (Société d'Economie Mixte du Métropolitain de l'Agglomération Lyonnaise) *Grand Palais de la Foire - Quai Achille Lignon - 69459 LYON Cédex 3 - FRANCE.*

SIAMOS-78. Granada (España)

I - INTRODUCTION

La plus grande partie de l'agglomération lyonnaise est construite au confluent de deux cours d'eau importants, le Rhône et la Saône, sur les alluvions sablo-graveleuses déposées par les rivières (figure n° 1). Ces alluvions sont le siège d'une nappe phréatique puissante dont le niveau piézométrique moyen se situe généralement entre 4 et 6 m sous le terrain naturel.

La construction du Métro de LYON, nécessairement souterrain dans cette agglomération urbaine dense, a dû s'accommoder de la présence de cet aquifère particulièrement perméable, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} m/s, en plaçant les ouvrages le plus superficiellement possible. Néanmoins, plus de quatre vingt pour cent des travaux ont dû se dérouler "les pieds dans l'eau", ce qui a conduit la S.E.M.A.LY. à lancer une importante campagne de relevés piézométriques et une étude détaillée du système aquifère pour préciser les niveaux piézométriques statistiques à prendre en compte dans les calculs et sur les chantiers.

PRÉSENTATION SOMMAIRE DES TRAVAUX

Après avoir déplacé les canalisations et divers ouvrages de Services Publics hors de l'emprise des travaux, les terrassements à ciel ouvert ont été faits à l'abri de palplanches métalliques ou de parois moulées.

La perméabilité des alluvions, 10^{-2} m/s à 10^{-4} m/s, ne permettait pas la mise hors d'eau des fouilles par simple pompage, la S.E.M.A.LY. a eu recours à trois techniques différentes pour s'affranchir des venues d'eau par le fond de fouille :

- 1 - mise en place d'un béton immergé faisant bouchon en fin d'excavation (figure n° 2)
- 2 - mise en place d'un radier injecté dans le tréfond de la fouille avant terrassement (figure n° 3)
- 3 - ancrage des parois moulées dans le substratum molassique (figure n° 4)

Outre les aspects techniques de choix entre les diverses solutions de soutènements en fonction de la largeur de la chaussée, le choix entre béton immergé, radier injecté ou ancrage à la molasse ressortait de considérations économiques dont la synthèse apparaît sur les figures 5 et 6 pour les conditions de prix des Travaux du Métro de LYON.

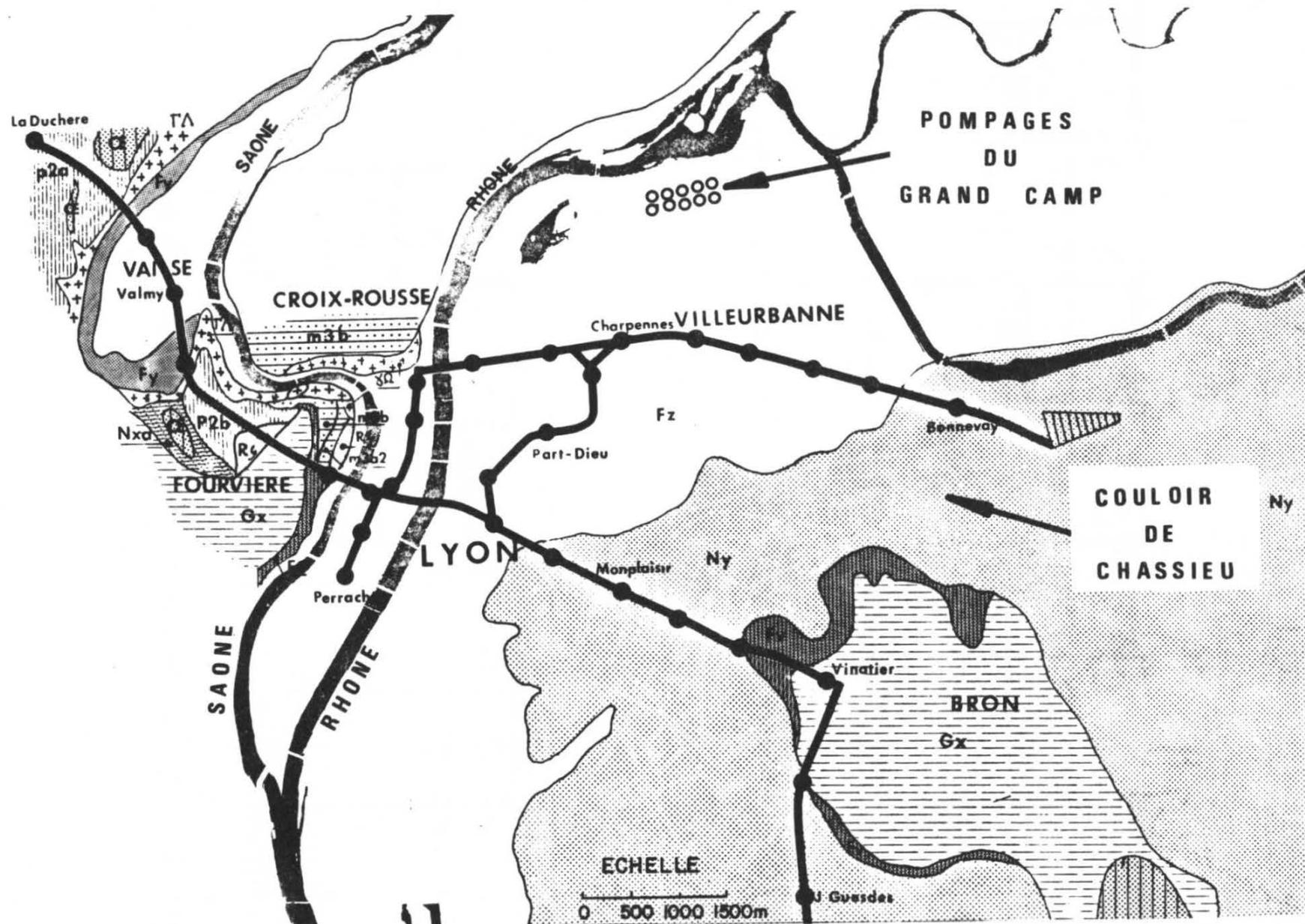


figure n° 1 - Situation hydrologique de l'Agglomération Lyonnaise

SIAMOS-78. Granada (España)

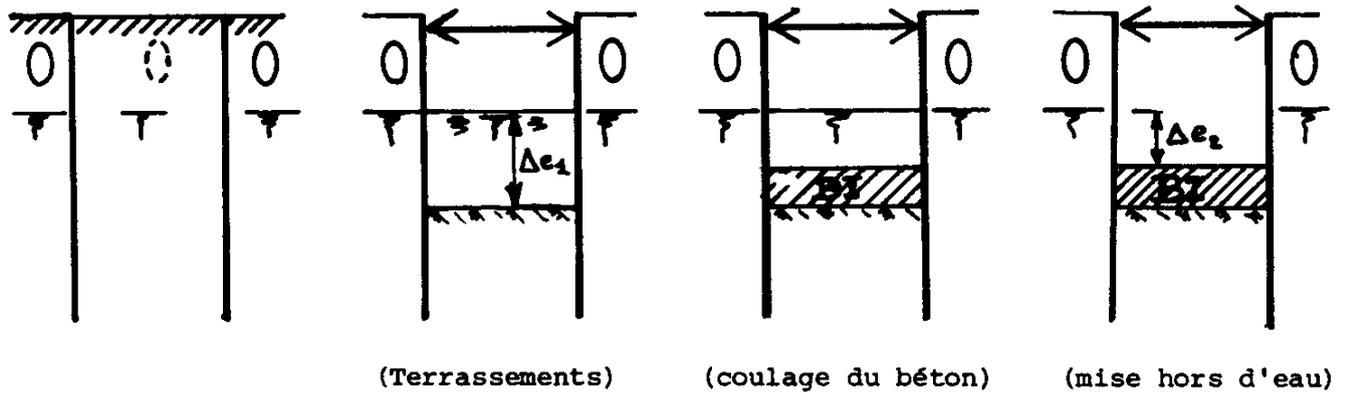


figure n° 2 - Mise hors d'eau de la fouille par bouchon de béton coulé sous l'eau .

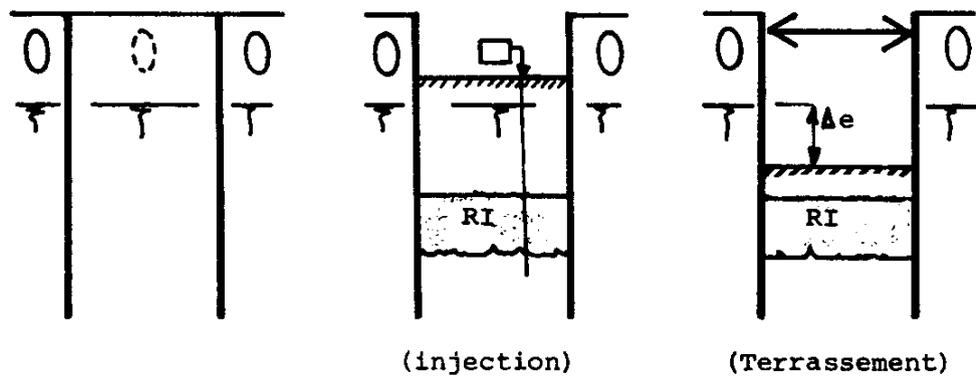
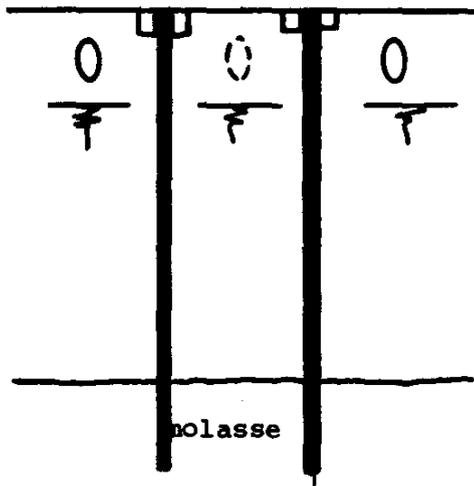
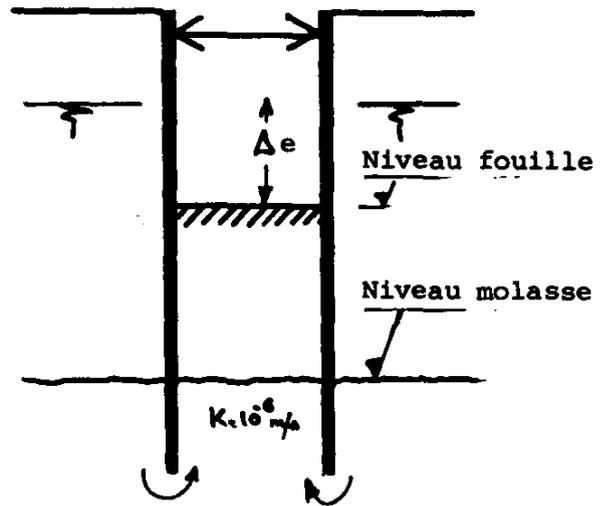


figure n° 3 - Mise hors d'eau de la fouille par bouchon de terrain injecté.

SIAMOS-78. Granada (España)



(parois moulées)



(Terrassements)

figure n° 4 - Mise hors d'eau de la fouille par rabattement à l'abri de parois moulées ancrées dans la molasse

SIAMOS-78. Granada (España)

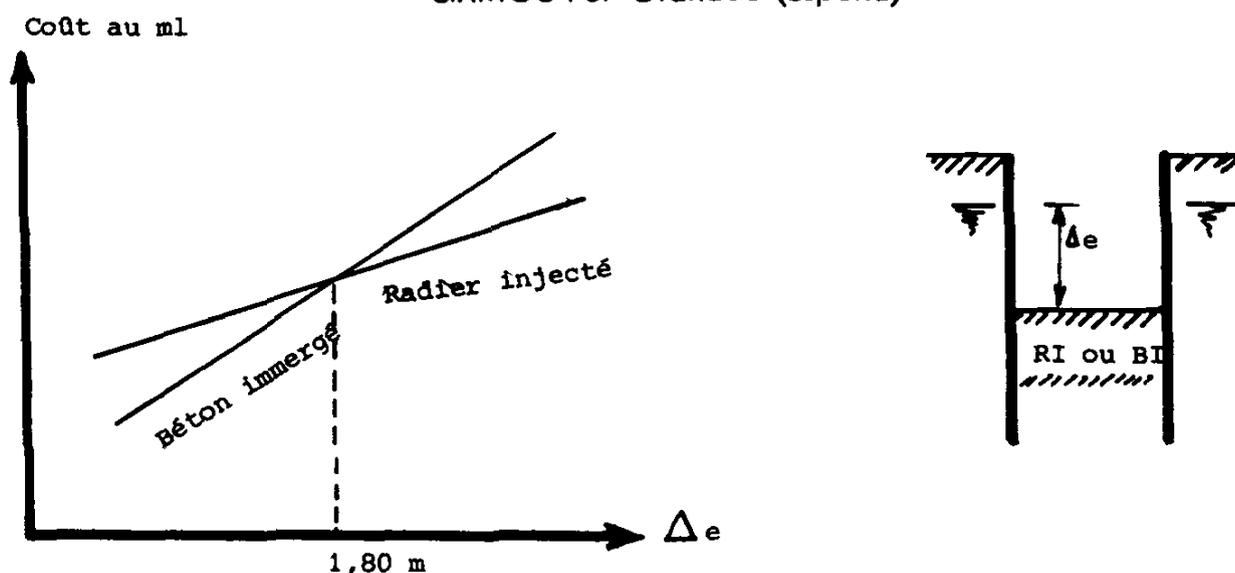


figure n° 5 - Choix entre béton immergé et radier injecté pour un soutènement en palplanches, en fonction de la charge d'eau Δe .
(Métro de LYON - prix 1972)

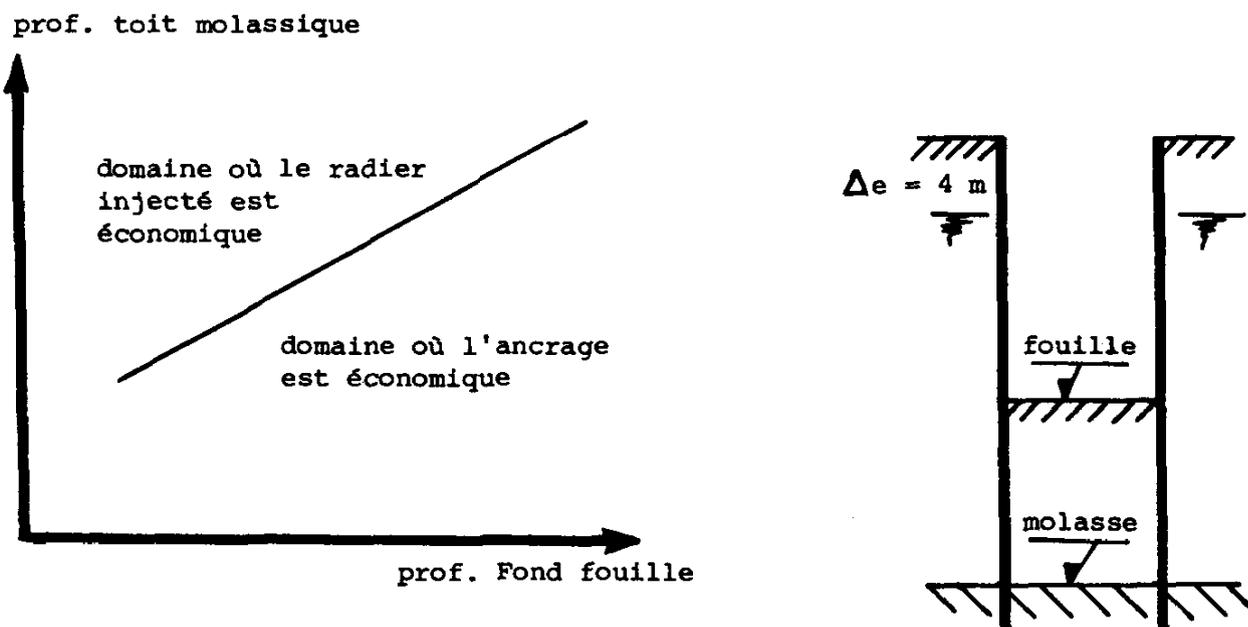


figure n° 6 - Choix entre l'ancrage des parois à la molasse et le radier injecté entre les parois moulées en fonction de la profondeur du fond de fouille et la profondeur du toit molassique.
(Métro de LYON - prix 1972)

II -

BUT DE L'ETUDE

L'importance considérable des sujétions que comptent les travaux en dessous du niveau piézométrique a conduit la S.E.M.A.LY. à entreprendre, dès la conception des ouvrages à construire, les études de l'évolution de la nappe phréatique de l'agglomération lyonnaise.

S'agissant de travaux très importants dans un site extrêmement perméable, il était tout d'abord nécessaire de s'entendre sur un vocabulaire adéquat et de clarifier les responsabilités de chacun dans le choix des niveaux à prendre en considération pour le dimensionnement des ouvrages et durant leur exécution.

Outre cet aspect de clarification, le but de l'étude a donc été de définir les niveaux à prendre en considération pour dimensionner les ouvrages vis à vis de leur régime d'exploitation et des sollicitations exceptionnelles, d'une part, et d'apporter, d'autre part, le maximum d'informations aux entrepreneurs pour qu'ils choisissent leurs risques de chantier avec la meilleure connaissance des niveaux statistiques.

En remarquant que la simple notion de "plus hautes eaux connues" n'a pas de sens statistique sur la nappe phréatique car il n'existe pas suffisamment de hauteurs de nappe observées, en particulier pour les niveaux "exceptionnels", l'étude faite aboutit à des valeurs CONVENTIONNELLES, obtenues par simulation.

Nous verrons plus loin pourquoi elles sont "conventionnelles".

Un point particulier important s'est greffé à cette étude par l'arrêt des pompages d'eau potable de l'Usine du Grand Camp de LYON. Bien que situés à proximité du Rhône, ces pompages de l'ordre de 8000 m³/h provoquaient (ils sont aujourd'hui arrêtés) un rabattement de la nappe sensible sur le trajet du Métro de LYON et le réhaussement devait être prévu pour être pris en compte dans la stabilité des ouvrages et dans leur dimensionnement.

LES NIVEAUX À CONSIDÉRER

Lorsqu'ils répondent à des préoccupations touchant les conditions d'exploitation des ouvrages à construire, les niveaux de nappe à définir sont de la responsabilité du Maître de l'Ouvrage : on parlera de l'inondation d'un parking au maximum une fois tous les dix ans par exemple ; on parlera du niveau de stabilité ultime de l'ouvrage aux poussées d'Archimède ; etc...

Que ces niveaux soient déterminés par un Bureau d'Etude extérieur ou par le Maître de l'Ouvrage lui-même, ces niveaux sont de sa responsabilité face au Maître d'Ouvre et à l'Entrepreneur.

SIAMOS-78. Granada (España)

Ainsi pour les vérifications de stabilité et de résistance ultérieure de ses ouvrages, la S.E.M.A.LY. s'est orienté vers la notion de TRES HAUTES EAUX CONVENTIONNELLES (THEC) en chaque point du réseau à construire, répercussion sur la nappe des évolutions du fleuve à ses "plus hautes eaux connues".

Ces THEC ne donnant pas automatiquement les sollicitations les plus défavorables pour des ouvrages remblayés où la poussée de l'eau a tendance à réduire les moments fléchissants en piédroits, cette remarque conduit à définir un niveau d'étiage de la nappe ou TRES BASSES EAUX CONVENTIONNELLES (TBEC).

Entre ces deux niveaux extrêmes, à caractère exceptionnel (faible probabilité d'apparition), il y a lieu de distinguer en général le niveau des "EAUX MOYENNES" (EM), le niveau des "HAUTES EAUX" (HE) et le niveau des "EAUX QUASI PERMANENTES" (EQP).

Ces niveaux sont liés à la vie normale de l'ouvrage en cours d'exploitation. Ce sera encore le Maître d'Ouvrage qui les définira.

Par exemple, pour les EQP, la S.E.M.A.LY. a retenu le niveau des eaux classées (nappe) dépassées trois cents jours par an. D'autres notions peuvent être retenues. Les HE pourront être définies comme le niveau de nappe dépassé au plus une fois tous les dix ans ; ou encore comme le niveau dépassé de moins d'une certaine hauteur d'eau pendant moins de x jours consécutifs ; etc.

Pour les calculs de ses ouvrages, la S.E.M.A.LY. a prescrit de considérer :

- les THEC et les TBEC comme des charges climatiques extrêmes
- les niveaux HE et EQP comme des charges d'exploitation variables autour des EM et subissant donc les majorations habituelles de charges variables.

Les ouvrages, subissant la poussée variable, généralement hydrostatique, de la nappe, il n'est pas inutile de rappeler que les pondérations pour charges variables s'effectuent, bien entendu, sur les variations de hauteurs d'eau (entre les HE et les EM par exemple) et non directement sur les poussées, erreur fréquente dans les calculs de dimensionnement.

Lorsqu'ils répondent à des préoccupations touchant au déroulement des chantiers, la responsabilité du choix des niveaux d'eau correspondants tient à la forme des marchés.

Dans le cadre de marchés sur appel d'offres, la responsabilité de ces niveaux est du ressort du Maître d'Oeuvre : ce sont des données pour l'Entrepreneur.

Dans le cadre de marchés sur concours, la concurrence entre les Entrepreneurs peut également porter sur le choix de ces niveaux eu égard aux risques que chacun admettra.

Les conditions d'exécution d'un chantier en site aquifère, résultent toujours d'un compromis d'ordre économique entre une évolution probable de la nappe, les délais et le coût des moyens mis en oeuvre : l'entrepreneur choisit, par exemple, entre

SIAMOS-78. Granada (España)

des soutènements provisoires pouvant s'opposer à toutes crues, et le coût moins élevé de soutènements plus légers avec prise en compte, ou non, d'éventuels arrêts d'équipes par immersion de la fouille. Il appartient au Maître d'Oeuvre d'en apprécier le réalisme et d'approuver éventuellement ces dispositions, par délégation du Maître d'Ouvrage.

Il est évident que ces dispositions de concurrence doivent apparaître dans les libellés des prix de rémunération (le forfait est à ce titre une disposition de concurrence).

Pour des travaux de radiers injectés par exemple, dont les dimensions doivent être décidées plusieurs mois à l'avance, la S.E.M.A.LY. a prescrit dans ses Cahiers des Charges la stabilité du fond de fouille jusqu'aux "Eaux à 300 jours", c'est-à-dire le niveau des eaux classées sur la nappe, dépassé, statistiquement, pendant 65 jours, non obligatoirement consécutifs, par an. En cas de dépassement, la fouille est immergée pour conserver sa stabilité et le délai de construction est prolongé d'autant de jours d'immersion et de nettoyage.

III - LES OUTILS DE SIMULATION

Afin de tenir compte de la présence d'une nappe phréatique sur le trajet de la Ligne A du Métro, la S.E.M.A.LY. a développé ses propres méthodes de calculs pour répondre aux questions suivantes :

- 1 - influence des fluctuations quotidiennes des deux fleuves sur la nappe phréatique, particulièrement sur le trajet de la Ligne A.
- 2 - définition des hauteurs d'eau à prendre en compte lors du calcul des ouvrages et lors des travaux.
- 3 - répercussion sur les hauteurs définies ci-dessus lors de l'arrêt (maintenant effectif) de la station de pompage du Grand Camp.

Une quatrième question s'est posée avec la mise en oeuvre de parois moulées ancrées à la molasse et barrant de ce fait, l'écoulement normal de la nappe : fallait-il s'attendre à un réhaussement effectif de la nappe à l'amont de ces écrans ?

Les questions ont été traitées différemment, suivant qu'elles fassent intervenir les fluctuations journalières de l'un ou des deux fleuves (questions 1 et 2), ou qu'elles correspondent à un effet pouvant être considéré constant sur toute la gamme des hauteurs de l'aquifère (questions 3 et 4).

1 - SIMULATION EN RÉGIME TRANSITOIRE

La méthode utilisée a consisté à simuler, jour après jour depuis 1913, l'évolution de la nappe phréatique en différents points caractéristiques du tracé du Métro. Suivant que l'on se trouvait sur la Presqu'île ou sur la Rive Gauche du Rhône, l'approche du problème a été un peu différente :

a) ETUDE ENTRE DEUX FLEUVES

La formulation fondamentale du modèle repose sur l'équation de la chaleur

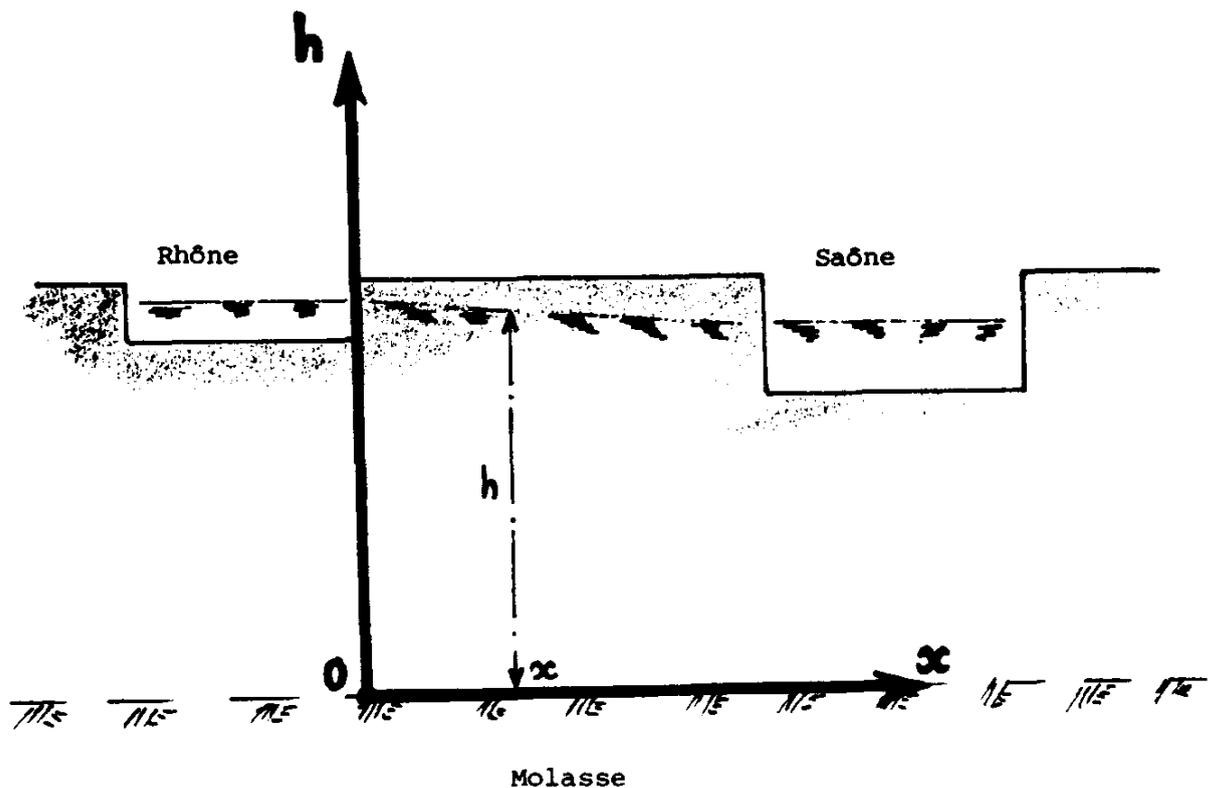
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t}$$

a^2 = diffusivité du terrain
 x = distance du point de simulation au Rhône
 h = puissance de la nappe.

dont on connaît la solution littérale pour les conditions aux limites de Cauchy :

$$h(x,t) = H_0(x,t) + H_1(x,t) + H_2(x,t)$$

H_0 , H_1 et H_2 sont respectivement liés à la position initiale de la nappe, à l'influence du Rhône et à l'influence de la Saône.



SIAMOS-78. Granada (España)

Trois profils en travers ont été choisis en fonction de l'intérêt qu'ils présentaient pour les travaux et de la présence de piézomètres permettant un calage du modèle mathématique.

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été adoptées :

- les deux fleuves sont rectilignes, parallèles et horizontaux
- les profils choisis sont perpendiculaires aux fleuves
- le substratum est étanche et horizontal
- les caractéristiques hydrogéologiques (T/S) sont isotopes et homogènes.

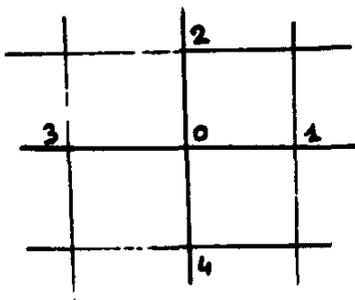
b) NAPPE DE LA RIVE GAUCHE DU RHONE : UN SEUL FLEUVE

Le substratum relativement étanche et la surface libre de la nappe ayant des pentes voisines de l'horizontale, la loi de DARCY donne l'équation d'évolution théorique du niveau de la nappe :

$$\operatorname{div} \overrightarrow{HK} \operatorname{grad} H = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} K = \text{perméabilité en un point} \\ S = \text{coef. d'emménagement} \\ H = \text{puissance de la nappe} \\ h = \text{niveau de la surface libre} \end{array} \right.$$

hypothèses : la perméabilité K est constante sur une verticale
les variations de h sont petites devant H .

La théorie des équivalences d'ABSI (*) permet la discrétisation dans l'espace de cette équation aux dérivées partielles sur un réseau à mailles carrées.



$$T_i = K_i H_i$$

$$2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{T_0 + T_i} \cdot (h_i - h_0) = \frac{S}{T_0} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{q_0}{T_0}$$

q_0 = débit d'un puits éventuel situé au point 0.

(*) E. ABSI et C. DHELLO : Théorie des Equivalences et Infiltrations de l'eau dans le sol. Annales I.T.B.T.P. - 1973 - (FRANCE) -

SIAMOS-78. Granada (España)

Les conditions aux limites sont mixtes :

- de type DIRICHLET sur les fleuves : le niveau h est connu par son évolution dans le temps.
- de type NEUMANN sur les frontières étanches (ici Sud et Sud-Est) $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$

(dérivée partielle suivant une direction normale à la frontière).

Plutôt que d'imposer, à chaque pas de un jour, la condition limite à la frontière-fleuve, opération longue et coûteuse, on a exploité la linéarité des équations en calculant, en chaque point de simulation, les fonctions d'influence des variations du fleuve sur la nappe. Ensuite, le programme de calcul travaille en différentiel, à partir des valeurs prises par le niveau journalier du Rhône entre 1913 et 1972.

2 - SIMULATION EN RÉGIME PERMANENT

Pour estimer les répercussions sur le niveau de la nappe phréatique de certains phénomènes, l'hypothèse simplificatrice de l'indépendance de ces répercussions vis à vis de l'évolution transitoire de la nappe a été adoptée au regard de la précision globale attendue.

C'est le cas des simulations des répercussions sur la nappe de l'arrêt des Pompages du Grand Camp et de l'effet de barrage partiel de l'aquifère résultant de la construction des ouvrages métro, en particulier lors de la mise en oeuvre de parois moulées ancrées dans le substratum étanche.

C'est une méthode de simulation parfois suffisante et économique. Sa mise en équation est simple : annulation de la dérivée partielle $\partial h / \partial t$ dans l'équation générale régissant le régime transitoire.

IV - LES DONNEES NECESSAIRES AUX SIMULATIONS

S'agissant de simulation des effets que produisent sur la nappe, en un point donné du système aquifère, les fluctuations des fleuves et autres apports ou départs d'eau sur la frontière du domaine étudié, il est nécessaire d'avoir la meilleure connaissance possible du système aquifère, quant à ses caractéristiques hydrologiques, et bien entendu d'être en possession d'un nombre aussi grand que possible de données sur les évolutions passées des fleuves et autres variations hydrauliques sur le domaine étudié.

SIAMOS-78. Granada (España)

a) LES DONNEES GEOTECHNIQUES

Outre les dispositions géométriques du site et la puissance de l'aquifère surmontant le substratum étanche, les données géotechniques nécessaires aux simulations portent essentiellement sur la perméabilité k du terrain et son coefficient d'emménagement S , pour chaque maille du quadrillage du domaine étudié.

Seuls des essais de pompage in situ peuvent donner un ordre de grandeur valable de ces caractéristiques hydrotechniques.

Bien que les performances des modèles actuels ne permettent pas de prendre en considération une variation de ces données le long de la verticale, il est utile de connaître les valeurs de k et de S à différentes profondeurs pour en obtenir une moyenne représentative de la zone concernée.

b) LES DONNEES HYDROLOGIQUES

S'il s'agit d'un système aquifère simple, alimenté par un seul fleuve sur une partie de la frontière, le domaine étant semi infini, la représentation de l'ensemble est relativement simple et sûre.

Quand il s'agit d'un domaine comportant des alimentations d'eau souterraines par des "couloirs" de déversement de bassins versants latéraux, la difficulté est grande pour apprécier leur grandeur ; de même des "soutirages" naturels dus aux écoulements de la nappe au travers des frontières. Quant aux pompages industriels éventuels, bien que leur déclaration auprès des Agences de Bassin soit obligatoire, leurs débits sont souvent fort mal connus (et généralement sous estimés pour des raisons fiscales).

La grande difficulté pour obtenir les données nécessaires au montage des simulations conduit à procéder au "calage" par approximations successives du résultat en fonction de relevés effectifs des relations fleuve-nappe pour différentes hypothèses sur les grandeurs mal connues.

Ces relevés limnimétriques simultanés fleuve-nappe doivent être effectués régulièrement durant plusieurs mois pour être significatifs, d'autant plus longtemps que la perméabilité du terrain sera faible.

Une fois les paramètres de la simulation convenablement "calés" pour traduire au mieux les évolutions effectives de la nappe en fonction de celles du fleuve et éventuellement des apports ou soutirages déterminés, la simulation des répercussions d'évolutions conventionnelles du fleuve peut être engagée afin de prévoir les niveaux de nappe auxquels le chantier devra faire face notamment.

Par contre, pour le Bureau d'Etude et le dimensionnement des ouvrages, il est nécessaire de connaître les évolutions passées du fleuve pour faire l'analyse statistique de leurs répercussions sur la nappe. Dans ce cas, il faudra en général "actua-

SIAMOS-78. Granada (España)

liser" les données limnimétriques pour tenir compte des aménagements successifs du lit du fleuve, depuis les premiers relevés que l'on possède.

L'organigramme présenté page 713 rappelle le cheminement le plus général de ce travail de prévision statistique.

1 - ACTUALISATION DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

Le calage des simulations étant établi pour des conditions hydrologiques données, l'étude de l'évolution piézométrique du niveau de la nappe phréatique doit être faite avec des données "cohérentes" avec celles de la période de calage adoptée, et les résultats obtenus seront exprimés en "valeurs" correspondantes à cette époque.

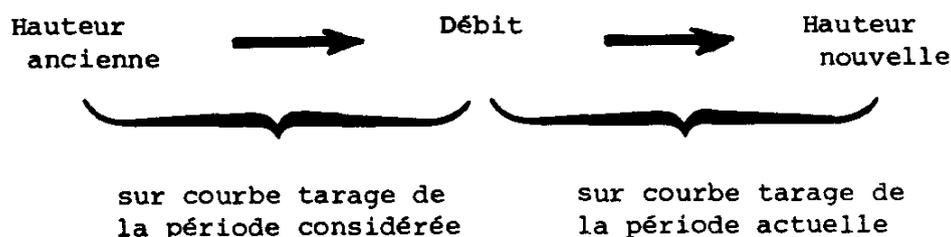
Il y a donc lieu d'actualiser les données hydrologiques utilisées dans la simulation, tant le niveau des fleuves alimentant la nappe que l'évolution des pompages industriels, que toute alimentation ou soutirage dans la nappe.

Certaines de ces actualisations résulteront du choix pur et simple de diverses hypothèses à titre de prévision des changements qui pourraient intervenir au cours de la période sur laquelle porte la simulation. D'autres résulteront d'une démarche plus scientifique, surtout pour l'établissement de résultats statistiques : c'est, en particulier, le cas de l'actualisation des données limnimétriques sur les fleuves.

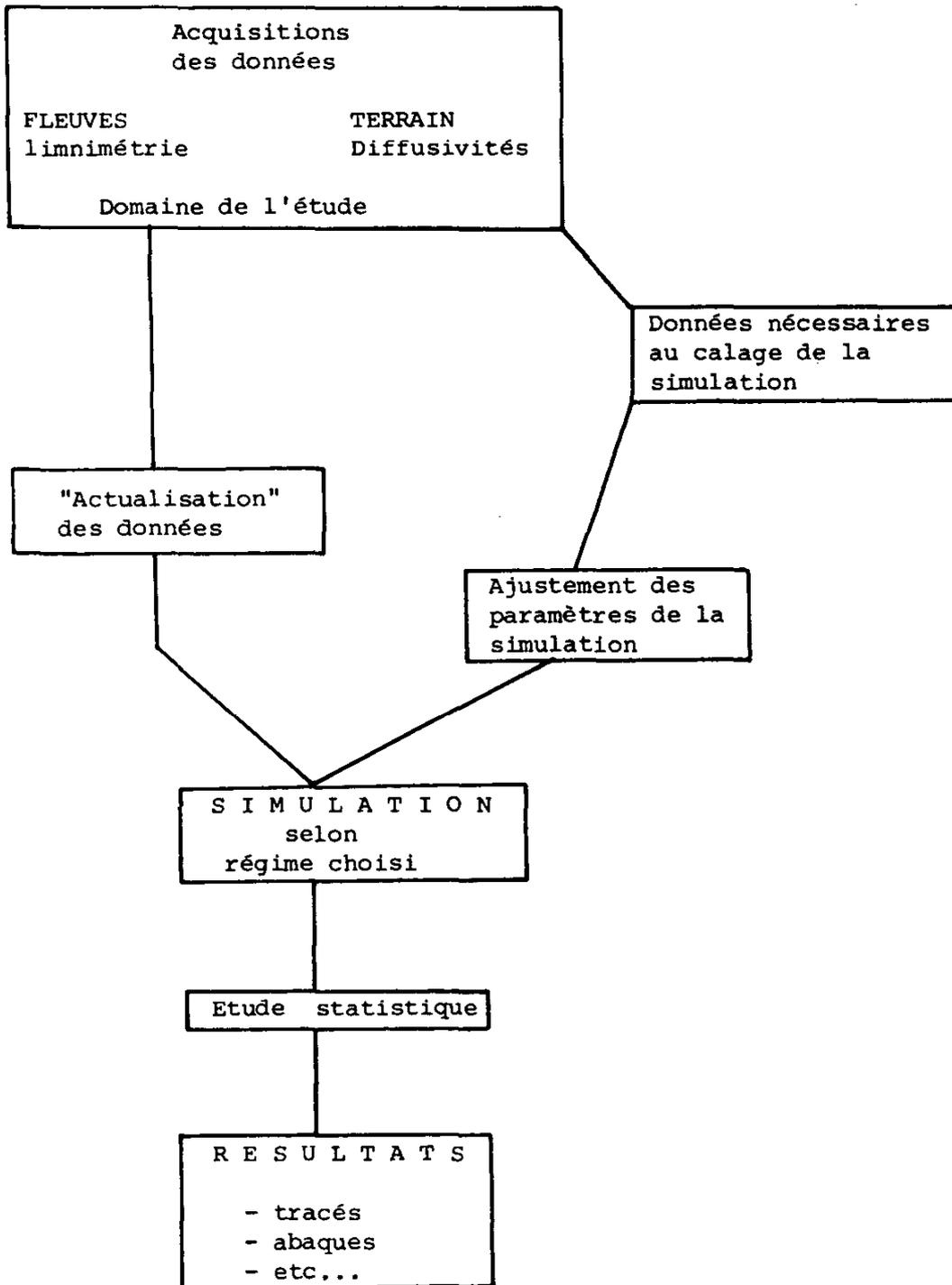
ACTUALISATION DES DONNÉES SUR LE RHÔNE

Pour la simulation des fluctuations passées de la nappe phréatique alimentée par le Rhône seul, l'actualisation des données a été particulièrement simple.

Le Service de la Navigation de LYON procédant à des relevés limnimétriques quotidiens depuis le début du XXème siècle, ainsi que les courbes de tarage Hauteurs-Débits correspondants aux aménagements successifs du lit du Rhône depuis 1913, l'actualisation des données limnimétriques s'est faite par la simple correspondance :



ORGANIGRAMME GENERAL DES SIMULATIONS



SIAMOS-78. Granada (España)

Outre l'hypothèse faite sur la véracité des côtes indiquées sur les relevés, cette solution est parfaitement fondée si l'on admet que les régimes hydrauliques des bassins versants du Rhône amont n'ont pas sensiblement changé depuis 1913,

En d'autres termes, cela signifie que les aménagements successifs qui ont régulé le cours du Rhône n'en ont pas modifié le débit pluriannuel moyen. Ce qui paraît soutenable pour n'importe quel fleuve pour l'échelle humaine de temps.

ACTUALISATION DES DONNÉES SUR LA SAÔNE

Nous disposons là aussi de relevés limnimétriques journaliers du cours de la Saône depuis 1913 pour un point du domaine étudié. Toutefois nous ne disposons d'aucune courbe de tarage correspondante.

L'actualisation n'a donc pas pu se faire de façon aussi simple et aussi rigoureuse que pour le Rhône.

Après avoir tracé l'évolution journalière brute des côtes limnimétriques en notre possession, nous avons pu mettre en évidence (visuellement) des périodes apparemment homogènes, quant au régime d'étiage notamment, correspondant vraisemblablement à des conditions d'écoulement constantes (relation hauteurs-débits inconnue mais constante au cours de ces périodes).

Une étude statistique comparative basée sur la loi de GNEDENKO qui exprime l'écart absolu entre une fonction de répartition théorique et son approche empirique issue d'un échantillon de taille réduite pour une probabilité d'erreur définie, nous a permis d'établir les corrélations

Hauteurs
anciennes  Hauteurs
actuelles

en faisant les mêmes hypothèses que pour le Rhône.

SIAMOS-78. Granada (España)

2 - VALIDITÉ DES DONNÉES ACTUALISÉES - ASPECTS CONVENTIONNELS -

Une fois ce travail d'actualisation terminé, on peut se demander si les hauteurs trouvées sont véritablement les données à prendre définitivement en considération, ou si une deuxième intervention doit être opérée sur leurs valeurs.

Mise à part l'incertitude qui règne sur les résultats du calcul de leur actualisation, on est tenté de retoucher les valeurs ainsi trouvées sous prétexte d'aménagements du fleuve, en particulier pour les crues.

En effet, nombre d'ingénieurs estiment que les aménagements successifs des fleuves réduisent les fluctuations de leur niveau et "laminent" les crues. A notre avis, à moins de disposer de données techniques irréfutables, c'est une erreur d'accréditer cette idée ; surtout pour les crues les plus importantes. Certes, le réservoir d'un barrage peut, en se remplissant, atténuer les effets d'une crue dans la plaine en aval du barrage. Mais à de rares exceptions près, les consignes d'exploitation des barrages hydroélectriques visent à maintenir la hauteur de chute la plus forte, donc, à conserver un remplissage aussi élevé que possible pour prévenir une éventuelle sécheresse plutôt que de réserver, à tout instant, la possibilité d'"éponger" une crue. Il est en effet constaté, que des crues importantes, du moins sur le Rhône et sur la Saône, ont eu lieu de façon aléatoire à tous les mois de l'année. Cette réserve est donc généralement faible, et il suffirait qu'une deuxième crue suive rapidement la première pour que le barrage n'ait, de ce point de vue, aucune efficacité.

Pour autant qu'il n'y ait pas de risque d'inondation par débordement, il faut noter que si la présence d'un barrage peut abaisser, à son aval, le niveau de la nappe phréatique par abaissement du niveau du fleuve, la répercussion sur la nappe (c'est ce qui nous intéresse) des crues qui auront justement été "laminées" par le barrage, peut être supérieure à ce qu'elle aurait été en l'absence du barrage. En effet, par l'inertie des mouvements d'eau dans l'aquifère, une crue très haute mais de très courte durée peut n'avoir aucune répercussion sur le niveau de la nappe à une certaine distance du fleuve ; par contre, un réhaussement de moindre amplitude du fil d'eau pendant une longue durée peut y produire un réhaussement significatif de la nappe, ce qu'illustre la figure n° 7.

Ce point, nous amène à faire remarquer que la répercussion d'une crue décennale du fleuve sur le niveau de la nappe phréatique n'a absolument rien à voir avec le niveau que la nappe atteint ou dépasse une fois tous les dix ans.

Pour déterminer le niveau piézométrique DECENNAL DE LA NAPPE, il faut obligatoirement retracer l'évolution journalière de la nappe, pour en faire l'analyse statistique spécifique.

En ce qui concerne la traduction sur la nappe du concept des "plus hautes eaux connues" (PHEC sur le fleuve) il faut noter que l'on dispose rarement de données suffisantes sur le fleuve et sur la nappe sur une durée suffisante avant la crue. Nous sommes alors amenés à adopter une évolution arbitraire du fleuve avant le début

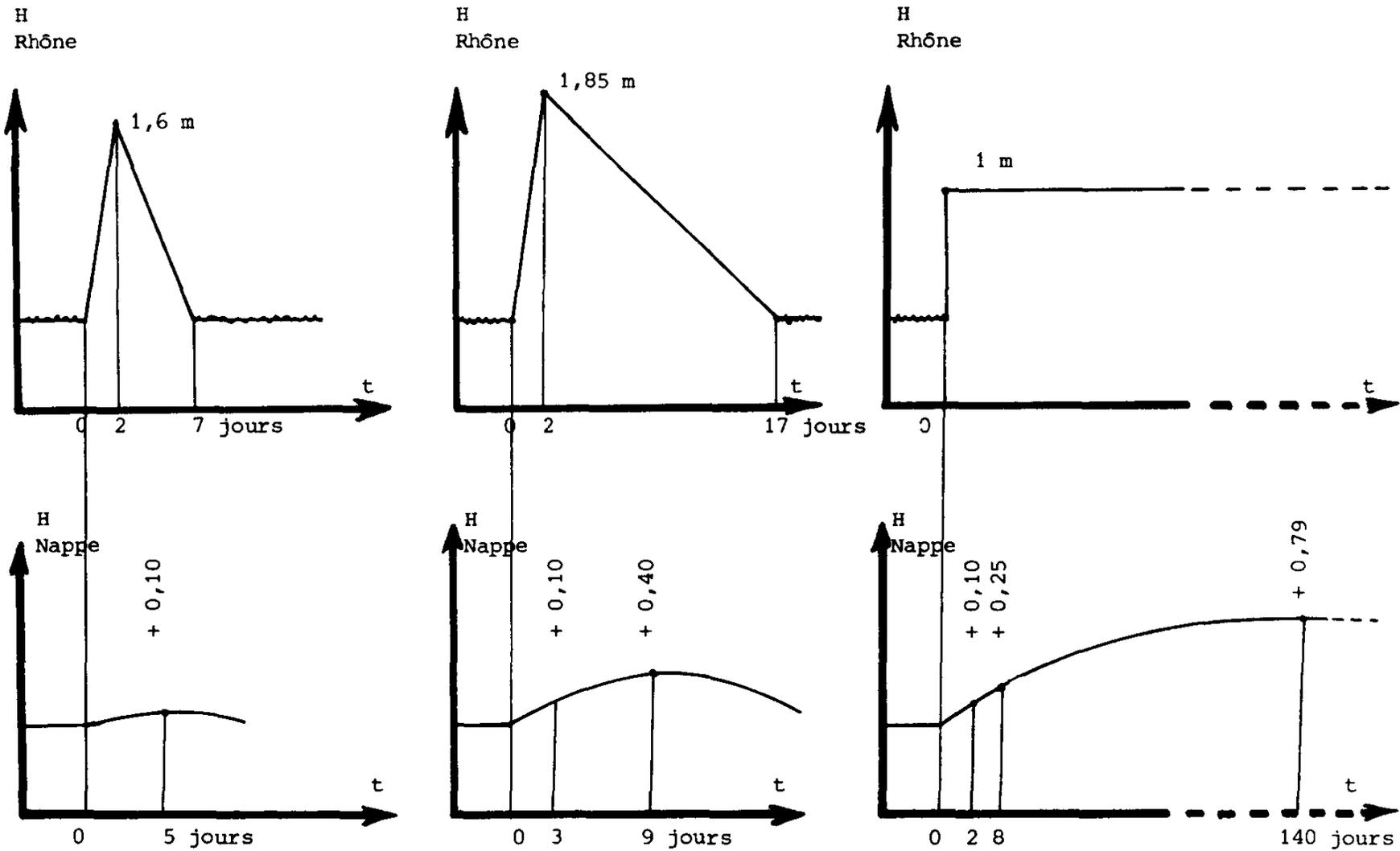


figure n° 7 - Comparaison des répercussions sur la nappe de trois évolutions types du Rhône, en un point situé à 0,8 km de distance du fleuve.

SIAMOS-78. Granada (España)

de la crue pour initialiser la simulation et déterminer un profil de nappe initial. Les résultats sont alors conventionnels (mais significatifs) et puisqu'ils ne correspondent pas forcément aux plus hautes eaux de la nappe qui auraient pu être constatées si des observations avaient été faites à l'époque (il s'agit bien du niveau piézométrique lié à l'infiltration et non au niveau d'eau provenant du débordement du fleuve), nous les désignons par : TRES HAUTES EAUX CONVENTIONNELLES.

V - QUELQUES POINTS PARTICULIERS

a) ARRET DES POMPAGES DU GRAND CAMP

Jusqu'au début de l'année 1977, la Compagnie des Eaux de la Ville de LYON exploitait la station de pompage du Grand Camp pour l'alimentation d'une grande partie de l'agglomération.

Bien que l'eau soit pompée à proximité immédiate du Rhône, quelques dizaines de mètres, le terrain graveleux sert essentiellement de filtre, le pompage qui s'élève à 180 000 m³/jour en moyenne l'hiver, et peut atteindre 220 000 m³/jour l'été, a une nette répercussion sur le niveau de la nappe phréatique, sans pouvoir dire quelle part de ces débits est prélevée dans la nappe proprement dite.

L'étude de l'arrêt des pompages devait donc permettre :

- de déterminer la zone d'influence des pompages
- de connaître les variations de l'aquifère consécutives à un arrêt de ces pompages.

La principale difficulté résidait dans le calage du modèle : en effet, il n'existe pas, dans la zone concernée, de relevés piézométriques comportant un véritable étia-ge (au moins un mois). De ce fait, les piézomètres relevés n'étaient pas suffisants.

Par ailleurs, certains paramètres ne pouvaient être estimés que de façon très approximative. En particulier, en ce qui concerne les apports du couloir glaciaire de CHASSIEU qui se déversent dans le domaine étudié, et les apports d'eau par le substratum dit "étanche".

Ne pouvant obtenir un calage correct de la simulation sur des piézomètres relevés - il était pratiquement impossible de faire varier les débits de pompage pour en étudier les répercussions - on a tourné la difficulté en opérant une injection d'eau correspondant aux débits prélevés et on en a étudié les répercussions, le réhaussement de la nappe donnant alors un ordre de grandeur de la dépression provenant des pompages.

Il faut dire que cette méthode de simulation s'est révélée particulièrement efficace puisque les observations faites lors de l'arrêt effectif des pompages ont démon-

SIAMOS-78. Granada (España)

tré la validité des prévisions faites par la S.E.M.A.LY.

Pour un réhaussement estimé à 50 cm pour le quartier de la Part-Dieu à LYON (au lieu de 1,50 m annoncé par une étude précédente) augmenté des 20 cm correspondant à l'effet des parois moulées barrant l'écoulement de la nappe dans ce secteur, le réhaussement effectif n'a pas dépassé 80 cm par rapport à des étiages comparables avant et après l'arrêt des pompes.

b) INFLUENCE DE LA PRESENCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les conséquences de la présence d'une ou de plusieurs lignes de Métro dans la nappe phréatique de la plaine de l'Est lyonnais sont peu importantes, particulièrement en ce qui concerne la première ligne (réhaussements de l'ordre de 60 cm au maximum).

Des relevés piézométriques récents, effectués de part et d'autre de l'ouvrage n'ont fait apparaître aucune perturbation notable (résultats égaux à plus ou moins 10 cm).

Traité de façon théorique, la propagation d'une onde de crue ne paraît pas gênée par la présence des ouvrages.

Les outils qui ont été mis au point par la S.E.M.A.LY, se sont révélés particulièrement sûrs dans leurs résultats, mais il convient d'attirer l'attention sur la taille des modèles de simulation de nappe et sur les erreurs qui peuvent en résulter. Etudiant le réhaussement prévisible de la nappe du fait de l'arrêt des pompages du Grand Camp à LYON, une première simulation montrait que l'isopièze + 1,5 m passait aux environs de la Part-Dieu. Déplaçant la frontière du modèle de calcul du cours Lafayette jusqu'au Sud de Gerland (3 km plus loin) le réhaussement n'est plus estimé qu'à + 0,5 m en ce même endroit, ce qu'ont confirmé les observations ultérieures. C'est dire l'importance des moyens de calcul à mettre en oeuvre pour ne pas commettre de graves erreurs.

Par ailleurs, du fait même de l'inertie de la nappe, les simulations faites en régime permanent, donnent des estimations souvent grossières (conditions aux limites absolument fixes par rapport aux simulations faites en régime transitoire (simulation pour un point géographique donné en prenant en compte la propagation de l'onde de crue à travers l'aquifère séparant le point étudié de la "source"). Les résultats peuvent être très différents et les plus-values pour l'étude la plus poussée, quand elle est possible (régime transitoire), seront souvent justifiées par les économies de construction (plusieurs millions de francs dans la construction du Métro de LYON).

En ce qui concerne l'expression des résultats, si les formes statistiques conviennent parfaitement aux préoccupations du Bureau d'Etude, les besoins des gens de chantier sont tout autres et l'expression des résultats selon la forme de la figure n° 7 leurs sont plus utiles. Ils leur permettent d'apprécier directement les effets auxquels ils doivent s'attendre d'une crue du Rhône pour tel ou tel chantier (géographique) : pour diverses évolutions types du Rhône, un tableau leur fournit le nombre de jour dont ils disposent après le début d'une crue pour voir la nappe monter de 10, 25 ou 50 cm, le nombre de jour pendant lequel la nappe continuera à monter après l'amorce de la décrue et quel sera le maximum atteint.

Avec de tels renseignements dont l'ajustement peut être fait rapidement dès qu'une crue ne ressemble pas à celles considérées dans les cas types, les gens de chantier peuvent être parfaitement maîtres des décisions à prendre et les délais dont ils disposent pour agir pour la meilleure conduite de leurs chantiers.



Vue d'ensemble de l'Agglomération Lyonnaise