

MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA MEUSE EN  
AVAL DE LIEGE (BELGIQUE)

A. DASSARGUES et A. LOX

RESUME

L'étude a été entreprise dans le but de simuler et d'estimer avec précision les débits non mesurés dans les jaugeages de surface, parce que s'écoulant en sous-sol dans les graviers de la plaine alluviale, transitant depuis le Canal Albert vers le fleuve, ou contournant les barrages-écluses. Des études hydrogéologiques très précises, assorties de puits de pompage, de nombreux piézomètres et de très nombreux essais électriques, ont permis une détermination fort précise des principaux paramètres hydrogéologiques. De plus, ces études ont également permis de faire la synthèse de l'ensemble des données disponibles dans la vallée de la Meuse à l'aval de Liège: géométrie des couches, sollicitations extérieures, conditions aux frontières, niveaux piézométriques ... Le modèle utilisant la méthode des éléments finis est discrétisé en fonction de toutes ces données. Il comporte 4 couches (non-horizontales) d'éléments, pour un total de 2356 éléments. L'hétérogénéité de la nappe est introduite par l'affectation de plus de 15 valeurs différentes de perméabilité et toutes les sollicitations et influences ont été prises en compte. Après calibration du modèle, les flux sont trouvés en tous les points du domaine étudié, permettant de quantifier et localiser très précisément les différentes infiltrations, venues d'eau, contournements d'ouvrages d'art, etc...

## 1 CADRE GEOLOGIQUE

En aval de Liège (figure 1), le substratum de la vallée de la Meuse et de ses versants est constitué par des formations du Primaire.

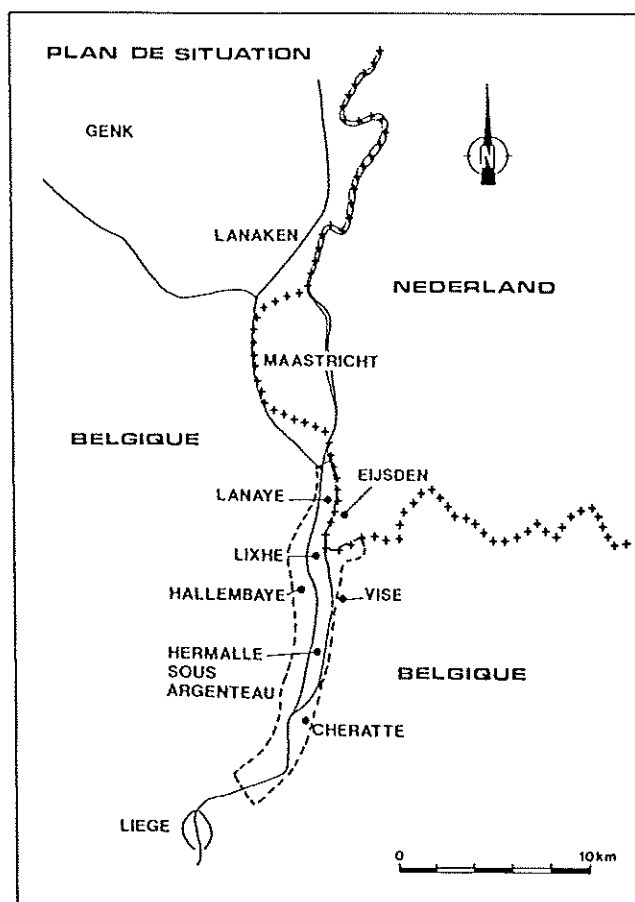


Figure 1 Plan de situation

Dans la région de Visé, une structure anticlinale en dôme fait affleurer les formations du Frasnien et du Tournaisien-Viséen composés de calcaires et dolomies. Des zones très karstiques de plusieurs hectares de superficie et de plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur, ont été localisées. Elles sont comblées par des schistes et psammites namuriens altérés, relativement aquifères. Ce paléokarst est l'objet de réactivations actuelles lorsqu'il apparaît en surface du fait de l'érosion. De part et d'autre de la structure anticlinale, les terrains houillers sus-jacents, composés de schistes, psammites et grès du Namurien,

incliné de quelques degrés vers le Nord et vers le Sud. Après le plissement hercynien, l'ensemble fut pénéplané et recouvert au Crétacé supérieur par la Smectite de Herve (marne imperméable), épaisse généralement de 10 à 20 mètres, puis par des craies et tuffeaux du Campanien et du Maastrichtien. Ces formations affleurent au Nord de Visé, en rive gauche de la Meuse, et se prolongent au-delà de la tranchée de Caster jusqu'à Maastricht. De la vaste transgression tertiaire qui suivit ne subsistent que des lambeaux de sables oligocènes (Tongrien) conservés dans les aires de dissolution des craies et des tuffeaux. Au Quaternaire, la Meuse a entaillé son substratum, laissant subsister une dizaine de niveaux de terrasses. Son cours actuel, orienté sensiblement Sud-Nord dans cette région, comprend une importante plaine alluviale, large de plusieurs centaines de mètres et comportant 10 à 15 mètres de dépôts meubles, composés de limons fluviaux et de graviers à matrice sableuse ou silteuse plus ou moins abondante.

## 2 SYNTHÈSE ET COLLECTE DES DONNÉES

Ces dernières années, de nombreuses études relatives à la plaine alluviale de la Meuse à l'aval de Liège ont été réalisées pour l'exploitation des eaux souterraines, la réalisation de grands ouvrages de génie civil (élargissement du canal Albert, barrages, écluses, ...) et la mise en valeur des gisements de craies et de graviers. Toutes les données ont été collectées et synthétisées durant les années 1986 et 1987 par les L.G.I.H. de l'Université de Liège (Lox et al., 1987). Depuis 1987, des données complémentaires ont été acquises. Ces données proviennent des travaux effectués ou suivis par les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique. Il s'agit de 97 points de données répartis en 47 sondages électriques, 37 sondages sismiques, 7 essais de pénétration, 4 forages et 2 puits. La Meuse Liégeoise a mis à notre disposition les données concernant la profondeur et le débit des drains en Meuse dans la région d'Hermalle, les résultats de 38 essais de pénétration et de 8 forages. La Société Wallonne de Distribution d'Eau a fourni les résultats de 6 puits testés et exploités entre 100 et 150 m<sup>3</sup>/h à Vivegnis. La Société Anonyme Brock a fourni les résultats relatifs à 62 forages de prospection dont une vingtaine n'ont pas été suivis par un géologue. Sur base de la collecte ainsi réalisée, le Ministère des Travaux Publics a décidé d'acquérir encore quelques données supplémentaires dans certaines zones. Dans ce cadre, 108 sondages électriques, 13 sondages sismiques, 20 piézomètres et 2 puits ont été réalisés. Au total, les résultats d'environ 1500 forages, puits, piézomètres,

essais de pénétration, sondages sismiques et électriques sont disponibles, permettant de préciser la structure géologique des différentes formations et d'étudier les écoulements des nappes aquifères. 186 de ces points ont permis des mesures directes du niveau d'eau de la nappe alluviale.

## 2.1 Présentation des données

Sur base des données recueillies, ont été établies:

- une carte reprenant les zones des différentes résistivités apparentes des alluvions graveleuses de la Meuse (Figure 2);
- deux cartes piézométriques, la Figure 3 présente la situation du 10 Juillet 1989;
- 53 coupes géologiques transversales de la plaine alluviale, réparties entre Monsin et Lanaye.

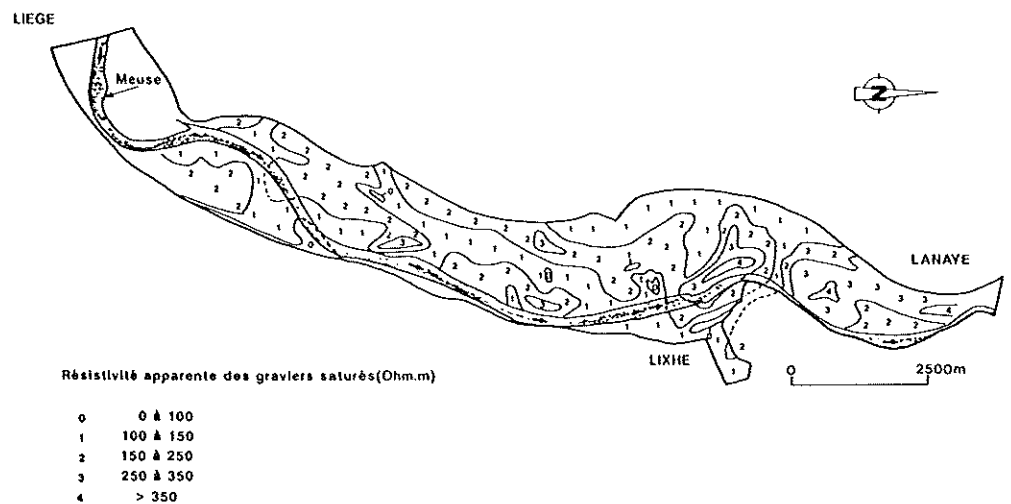


Figure 2 Carte des différentes zones de résistivités apparentes

Sur base de l'ensemble de ces documents, on a pu définir avec précision la géologie de la plaine alluviale. De l'aval vers l'amont ou du Nord au Sud, on remarque les faits suivants:

- En aval de Lanaye, la craie du Maastrichtien inférieur (Crétacé) constitue le substratum

## \* MEUSE10 \* PIEZOMETRIE INITIALE \*

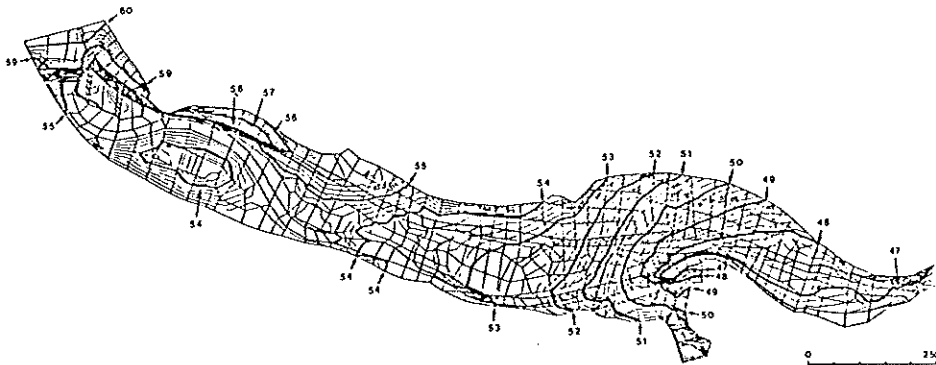


Figure 3 Carte piézométrique: situation du 10 Juillet 1989

sous les dépôts alluviaux et affleure sur le versant Ouest de la vallée (Figure 4: coupe CT3). Les craies du Maastrichtien et du Campanien, à pendage de quelques % vers le Nord-Est, constituent un aquifère puissant (Dassargues et al., 1989) surmontant la Smectite de Herve.

Les alluvions de la Meuse, d'une puissance moyenne de 10 mètres, comprennent à la base des graviers roulés à matrice silto-sableuse surmontés de limons fluviaux. L'ensemble est souvent recouvert de remblais divers pouvant atteindre plus de 7 m. L'épaisseur des graviers varie entre 5 et 10 mètres, la teneur en matrice limono-sableuse varie fortement suivant les endroits, avec de fréquents lits sableux et lentilles d'argile. Les limons fluviaux, plus ou moins argileux ou sableux suivant les endroits, ont une épaisseur comprise entre 2 et 6 m. Ils se chargent de petits cailloux roulés vers le bas.

- En remontant vers l'amont, le substratum crayeux est progressivement remplacé d'abord par la Smectite de Herve, ensuite par les phanites et schistes du Houiller (Figure 5 : coupe CT15 et Figure 6 : CT18). Ces phanites sont fortement bréchifiées par endroit, par effondrement dans des poches karstiques affectant les calcaires viséens sous-jacents (Figure 7 : CT20). Leur perméabilité est alors de  $10^{-6}$  à  $10^{-5}$  m/sec et la nappe est parfois artésienne de plusieurs mètres, par rapport à la nappe alluviale. A hauteur du barrage de Lixhe, des sondages ont révélé la présence d'une poche de plus de 200 m de profondeur. Les schistes et grès du Houiller peuvent contenir localement une faible quantité d'eau dans les fissures mais, en général, ils jouent plutôt le rôle d'écran à la circulation des eaux souterraines. Le sommet du Houiller est altéré sur quelques mètres et a un pendage Nord. Sa surface présente de nombreuses irrégularités locales dues à des surcreusements par le fleuve.

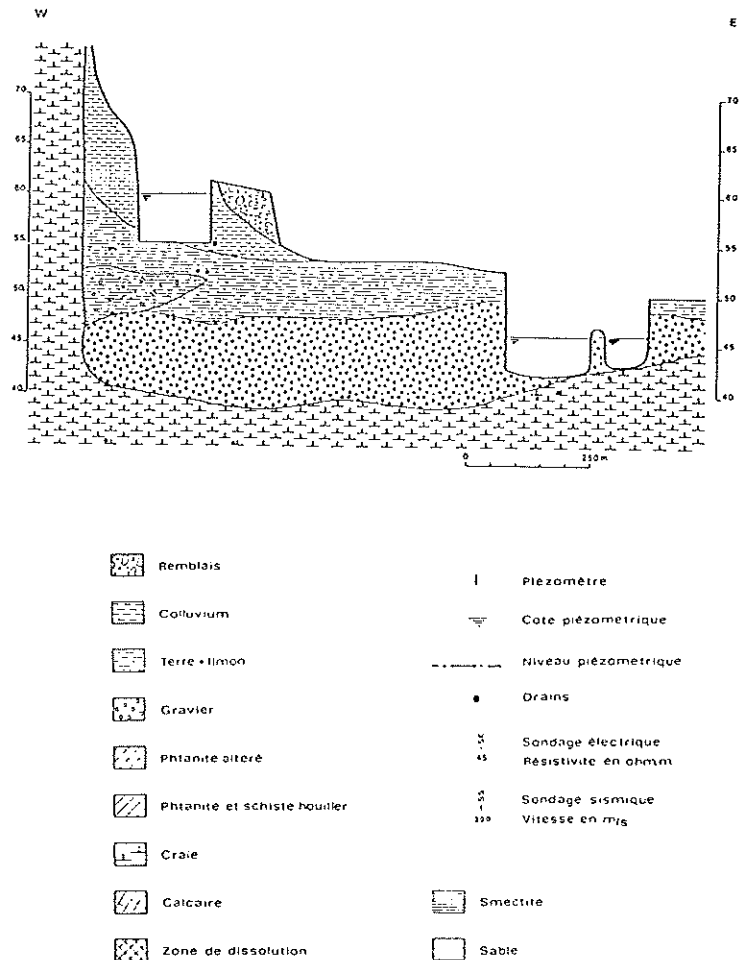


Figure 4 Coupe transversale CT3, Lanaye

- Plus au Sud, les calcaires viséens affleurent sur le versant Est de la vallée entre Visé et Hermalle, (Figure 8: CT28). Après Hermalle, les schistes houillers constituent à nouveau l'entièreté du substratum de la plaine alluviale (Figure 9: CT40). La couche de graviers, comprise entre le bed rock houiller pratiquement imperméable et les limons fluviatiles peu perméables, renferme une nappe aquifère s'étendant sur l'ensemble de la plaine alluviale. Elle est alimentée par l'impluvium direct, par l'eau de ruissellement des coteaux, par les nappes des versants et enfin par le canal Albert et la Meuse.

## 2.2 Etude de la nappe alluviale

L'épaisseur des dépôts graveleux varie entre 10 et 5 mètres, suivant que l'on se trouve sur d'anciens filots de graviers ou au droit de chenaux anastomosés. Les variations de faciès sont

nombreuses et engendrent des zones de circulation préférentielle. La perméabilité des graviers varie entre  $5.10^{-3}$  et  $1.10^{-1}$  m/sec suivant leur granulométrie et leur teneur en matrice sablo-silteuse. Une série de sondages électriques a permis d'étudier les résistivités de la formation graveleuse, résistivités fonction de la teneur en éléments sablo-silteux influençant la perméabilité. La corrélation résistivité apparente - perméabilité obtenue est reprise au Tableau 1.

Tableau 1 Corrélation résistivité-perméabilité obtenue pour les graviers de la plaine alluviale de la Meuse dans la région liégeoise

| Zone                            | 0             | 1                | 2                | 3                 | 4              |
|---------------------------------|---------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Résistivité apparente en ohm. m | < 100         | 100 - 150        | 150 - 250        | 250 à 350         | > 350          |
| Perméabilité en m/sec           | $0.6.10^{-3}$ | $6. - 7.10^{-3}$ | $7. - 8.10^{-3}$ | $8. - 10.10^{-3}$ | $> 10.10^{-3}$ |

Sur base de cette corrélation, la perméabilité des graviers est établie dans toute la plaine alluviale à partir de la carte d'isorésistivité (Figure 2). Les valeurs de transmissivités, trouvées dans les derniers puits de pompage situés à Lanaye et à Hermalle, sont très élevées, de  $12.10^{-2}$  à  $54.10^{-2}$  m/s, elles sont supérieures aux estimations réalisées à partir de la corrélation. Il faudra donc s'attendre à devoir augmenter les perméabilités lors de la calibration du modèle. Deux campagnes de mesures piézométriques ont été réalisées le 31-05-1989 et le 10-07-1989, les cartes piézométriques obtenues serviront de référence pour la calibration du modèle. La composition chimique de l'eau de la nappe et notamment sa minéralisation plus forte que celle de la Meuse et du Canal semble indiquer un apport important d'eau de versant. L'ensemble des études hydrogéologiques relatives à la nappe alluviale de la Meuse à l'aval de Liège permet donc l'élaboration d'un modèle mathématique d'écoulement régional tout en restant très précis. Il reste à préciser les aménagements de la plaine alluviale qui sont susceptibles d'avoir modifié l'écoulement naturel dans la nappe.

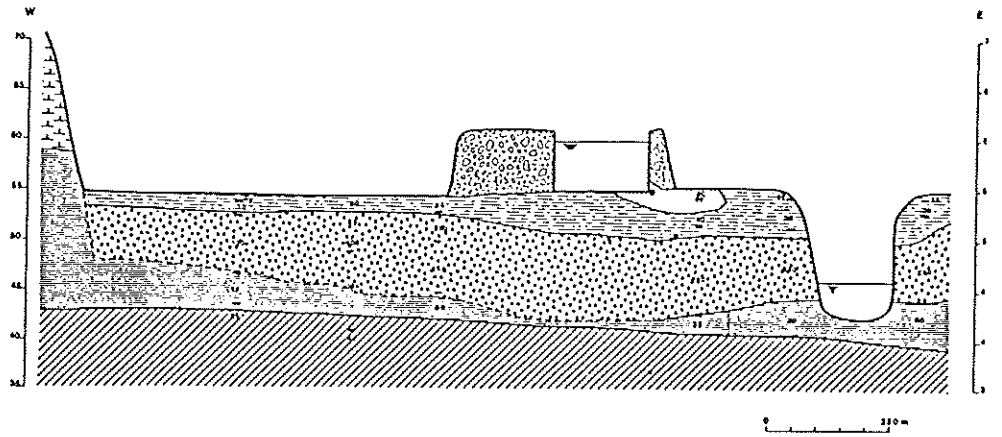


Figure 5 Coupe transversale CT 15

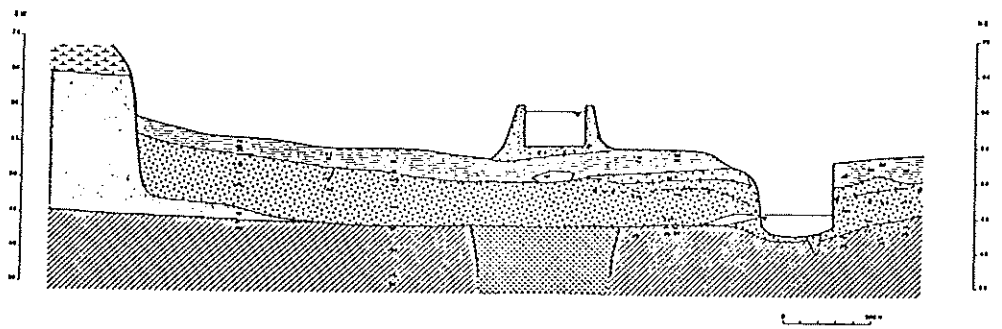


Figure 6 Coupe transversale CT 18, aval du barrage de Lixhe

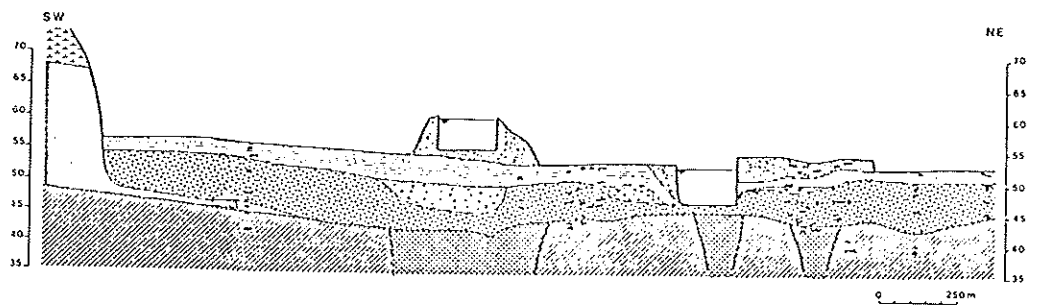


Figure 7 Coupe transversale CT20, barrage de Lixhe



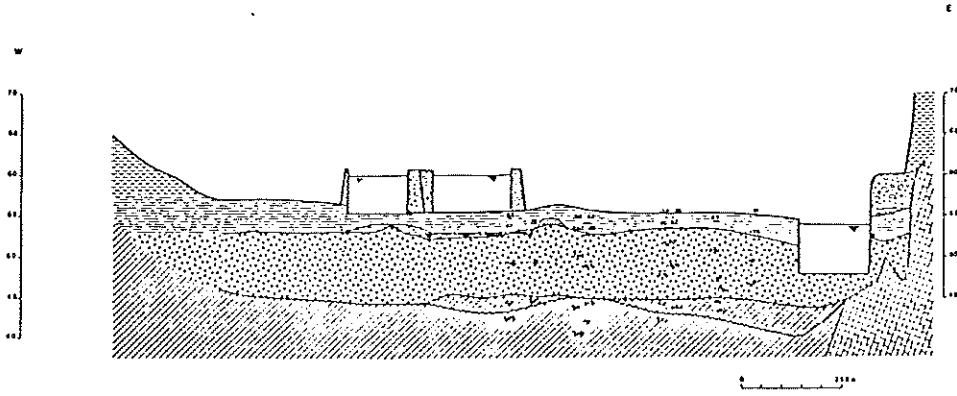


Figure 8 Coupe transversale CT 28, Basse-Hermalle

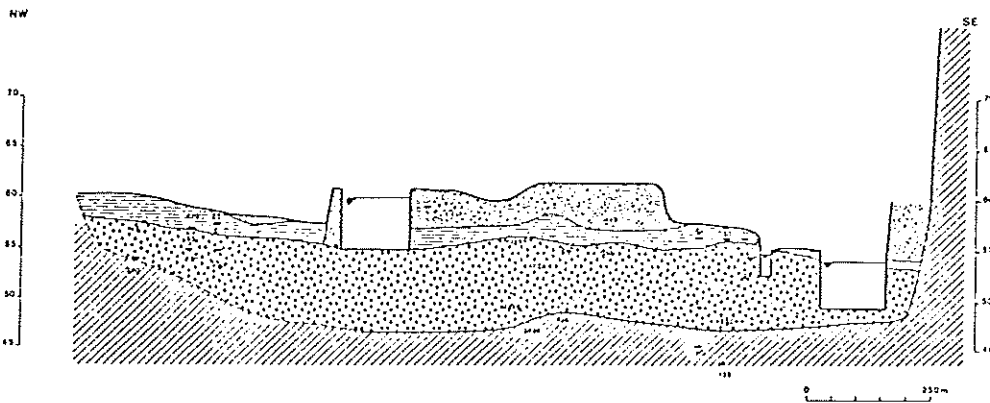


Figure 9 Coupe transversale CT 40, Vivegnis

Les principaux ouvrages sont:

- Le Canal Albert, dont le niveau de flottaison est calé à la cote 60 par le barrage de Monsin. Le fond du canal, à la cote 55 m, repose dans les alluvions tantôt limoneuses, tantôt sablo-graveleuses. Le niveau de la nappe alluviale atteint le fond du canal entre Monsin et Cheratte, puis décroche progressivement pour se situer 7,50 m plus bas à Lanaye. De ce fait, entre Monsin et la tranchée de Caster, le Canal subit des pertes à travers le dispositif d'étanchement du fond, pertes parfois accrues par les récents

travaux de mise au gabarit 9000 tonnes.

- Les murs de quai et les drains le long de la Meuse. A l'aval de Liège, la Meuse est canalisée jusqu'au barrage de Lixhe, à l'aval du quel sa section redevient naturelle. En rive gauche, un drain existe depuis Hermalle (sous-Argenteau (cote + 51,92) jusqu'en aval du barrage de Lixhe (cote + 46,20).

En rive droite, il s'étend de Richelle (cote + 53) jusqu'à l'aval du barrage de Lixhe (cote 48,00). Les murs de quai et les drains influencent probablement les relations nappe alluviale-fleuve, modifiant les gradients piézométriques et les débits de transfert.

- Les barrages sur la Meuse, avec les niveaux de flottaison théorique suivants:

- . barrage-écluse de Monsin:

- niveau de flottaison amont: 60,00

- niveau de flottaison aval : 54,70

- . barrage-écluse d'Hermalle-sous-Argenteau (en cours de démolition):

- niveau de flottaison amont : 54,70

- niveau de flottaison aval : 54,00

- . barrage de Lixhe:

- niveau de flottaison amont : 54,00

- niveau de flottaison aval : 46,00

Les dénivellées ainsi créées entre bief amont et bief aval engendrent des écoulements importants via la nappe alluviale.

### 3 MODELES HYDROGEOLOGIQUES (DASSARGUES, 1990)

Les modèles hydrogéologiques, physiquement significatifs, sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres la transmissivité (ou la perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et des coefficients d'infiltration. Le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées. La solution proposée par le modèle consiste en une description de la piézométrie (ou du champ de pression).

Cette solution peut être obtenue analytiquement ou par des méthodes numériques. Les solutions analytiques sont exactes dans leurs développements mathématiques mais supposent

des conditions géologiques homogènes et des sollicitations uniformes. Les simulations les plus réalistes sont obtenues à l'aide de méthodes numériques telles que les méthodes des différences finies, éléments finis et éléments frontières.

### 3.1 Equations et hypothèses

La loi de Darcy, établissant que le flux est inversement proportionnel au gradient hydraulique s'écrit:

$$q_i = - K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

avec  $K_{ij}$  = tenseur des perméabilités du milieu  $[LT^{-1}]$   
 $q_i$  = vecteur flux  $[LT^{-1}]$   
 $x_j$  = coordonnée  $[L]$   
 $h$  = hauteur piézométrique  $[L]$

Cette loi, écrite sous forme scalaire, consiste en fait en 3 équations avec 4 inconnues: les  $q_i$  et la hauteur piézométrique  $h$ . La 4<sup>ième</sup> équation scalaire est fournie par l'expression du principe de conservation de la masse. En combinant la loi de Darcy et l'équation de continuité, on obtient l'expression de l'"équation de diffusivité":

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

avec  $S_s$  = coefficient d'emmagasinement spécifique  $[L^{-1}]$   
 $t$  = temps  $[T]$   
 $Q$  = terme de flux externes (pompages, réinjections, infiltrations)  $[T^{-1}]$

La transmissivité est définie lorsque l'on considère que le flux s'effectue sur l'épaisseur saturée totale de l'aquifère et on a

$$T = K.e$$

Bien que l'épaisseur saturée ( $e$ ) n'est pas nécessairement constante, ce concept est sans signification en écoulement 3D. Pour le coefficient d'emmagasinement, dans le cas des nappes libres, il faut considérer l'emmagasinement de fluide lors du passage de l'état non-saturé à l'état saturé. Cet emmagasinement correspond alors à la porosité efficace du milieu poreux ( $n_e$ ).

### 3.2 Conditions aux frontières

Une nappe aquifère a une extension limitée dans l'espace et, sur ces limites les échanges d'eau avec l'extérieur sont régis par les conditions aux frontières.

Ces conditions sont de trois types:

#### 1 Condition de Dirichlet ou de potentiel imposé:

$$h = \underline{h} \quad (3)$$

La valeur du potentiel  $h$  est alors spécifiée sur la frontière considérée, cette condition est typiquement celle d'un contact nappe-rivière, le potentiel constant imposé étant égal à la cote de la surface libre.

#### 2 Condition de Neuman ou de flux imposé:

$$\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{\partial h}{\partial x} l_x + \frac{\partial h}{\partial y} l_y = \phi \quad (4)$$

avec  $n$  = la normale extérieure à la frontière considérée

$l_x$  et  $l_y$  = les cosinus directeurs de cette normale

$\phi$  = flux imposé à la frontière

La valeur du gradient de potentiel normal à la frontière est alors imposée. Dans le cas particulier où  $\phi = 0$ , cette condition exprime, par application de la loi de Darcy, que la composante d'écoulement normale à la frontière est nulle. Les équipotentiels sont donc perpendiculaires à cette frontière et les lignes de flux, parallèles.

### 3 Condition de Fourier ou mixte:

$$h + \lambda \frac{\partial h}{\partial n} \text{ imposé} \quad (5)$$

Ce troisième type de condition permet d'imposer une relation entre le potentiel et le flux, comme cela est le cas lors:

- de la drainance par une frontière séparant la nappe aquifère d'un plan d'eau;
- du suintement à la frontière d'un milieu poreux, au contact de l'atmosphère.

La définition ad hoc de ces conditions aux frontières est indispensable à la résolution correcte du problème de champ posé.

### 3.3 Techniques de résolution

Les équations aux dérivées partielles, présentées ci-avant, représentent des phénomènes physiques bien précis. En y incluant les paramètres représentant les propriétés physiques, les conditions aux frontières et les sollicitations du système, les solutions de ces équations fournissent la simulation mathématique du système et de son état. Moyennant des hypothèses très restrictives quant aux propriétés de l'aquifère, aux conditions aux frontières et aux directions d'écoulement, des solutions analytiques peuvent être trouvées. L'exemple le plus connu et le plus utilisé est la solution de Theis appliquée au cas d'un essai de pompage. Ce type de solution est acceptable lors d'estimations relativement grossières mais inapplicable dans les cas où la géométrie complexe, le caractère transitoire des écoulements et l'hétérogénéité des propriétés, conditions aux frontières et sollicitations de l'aquifère étudié doivent être prises en compte. Diverses solutions numériques permettent de résoudre les équations en s'affranchissant des hypothèses très contraignantes des solutions analytiques. Ces solutions numériques constituent des approximations de la solution, mais les erreurs numériques sont le plus souvent négligeables par rapport aux erreurs dues à l'estimation des paramètres, à la conceptualisation du système et surtout à l'imposition d'hypothèses trop restrictives. Les méthodes des différences finies, des éléments finis et des éléments frontières sont très utilisées dans ce domaine. Elles se sont développées très rapidement dans les 20 dernières années et elles sont améliorées quotidiennement par les numériciens. Pour la description et le détail de ces méthodes le lecteur intéressé consultera la littérature spécialisée (Bear (1987), Zienkiewicz (1974), Ledoux (1978), Pinder (1977)...). Ces méthodes demandent une discrétisation spatiale et temporelle du domaine. La discrétisation spatiale consiste en une division de la région étudiée en cellules, éléments ou sous-régions,

qui peuvent être rectangulaires (différences finies), polygonales quelconques (éléments finis) ou de formes quelconques (éléments frontières). La solution de l'équation différentielle est obtenue en résolvant un système d'équations algébriques valables sur le maillage réalisé et pour des paramètres et conditions aux frontières donnés. Le système est résolu à chaque pas de temps, après actualisation des équations algébriques qui le composent.

### 3.4 Données nécessaires

L'application de modèles numériques en hydrogéologie requiert la détermination d'un certain nombre de paramètres à entrer dans le modèle. D'autre part, de nombreuses mesures doivent fournir les données géométriques, les sollicitations extérieures, les conditions aux frontières, les conditions initiales et enfin les valeurs à différentes époques de la variable de champ recherchée (Tableau 2). Ces dernières seront utilisées dans la phase de calibration du modèle.

La taille des éléments du maillage sera choisie en fonction des circonstances, de la densité des mesures disponibles, de la précision désirée pour les résultats, mais aussi des contingences informatiques (taille du système, temps CPU). Dans tous les cas, il s'agit donc d'un compromis entre ces différents impératifs. L'hydrogéologue doit alors réaliser l'assemblage de toutes ces données, transformant le système réel en un modèle mathématique préservant les éléments essentiels du système.

Tableau 2 Données nécessaires à un modèle écoulement

#### Données géométriques

- Représentation du domaine étudié par un maillage; choix des dimensions des cellules ou des éléments du modèle

#### Paramètres

- Perméabilité ou transmissivité
- Coefficient d'emmagasinement (spécifique) (spécifiés dans chaque élément du maillage)

#### Sollicitations extérieures

- Pompages et réinjections
- Infiltrations, flux latéraux (spécifié là où c'est nécessaire)