

MODELISATION MATHEMATIQUE DES AQUIFERES

par les

Prof. A.DASSARGUES et A. MONJOIE (U.Lg Liège)

Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur,
d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique

=====

Les modèles mathématiques sont de nos jours de plus en plus utilisés pour simuler le comportement des nappes aquifères. Néanmoins, on remarque souvent que la fiabilité de ces modèles est très variable lorsque, à la réalité, l'on confronte les hypothèses prises et les résultats calculés.

Les étapes principales que constituent la représentation optimale du domaine à étudier, la paramétrisation, la prise en compte éventuelle des variations de ces paramètres, le choix d'un programme, la calibration sont des opérations où des moyens nouveaux apparaissent pour améliorer la précision des résultats. Ce domaine de recherche est au moins aussi important que la mise au point des méthodes numériques servant à ramener le problème à un système d'équations et à résoudre celui-ci avec précision.

La prise en compte, de la façon la plus précise possible, des conditions complexes de l'écoulement en milieu souterrain améliorera "la description physique convertie en données du modèle" permettant de réduire les incertitudes dans les prévisions.

I. INTRODUCTION.

Le mouvement de l'eau dans le sous-sol est très lent par rapport aux vitesses de ruissellement en surface, ce qui implique un long temps de séjour dans le sous-sol et de faibles flux. Si le coût d'extraction de l'eau hors des nappes aquifères est souvent plus élevé que le simple prélèvement des eaux de surface, par contre elles bénéficient généralement d'une meilleure protection contre les pollutions, d'une température relativement constante, d'une capacité de réponse à la demande qui varie peu dans le temps.

L'exploitation optimum des ressources souterraines implique une connaissance préalable des conditions hydrologiques permettant le calcul du bilan et de la courbe de tarissement.

Les paramètres hydrogéologiques sont fournis par des essais de pompages et des piézomètres, leur nombre est forcément limité.

Dans le cas d'une étude quantitative, le rôle d'un modèle mathématique est d'intégrer toutes les données disponibles, d'approximer de façon logique et fiable les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant toutes les tendances de la nappe en régime permanent ou transitoire.

De nos jours, la gestion des nappes aquifères comprend également des aspects qualitatifs : les problèmes de pollution. Les décharges de déchets industriels et ménagers, officielles ou sauvages, situées au gré de la topographie ou d'anciennes exploitations, sont autant de sources potentielles de pollution, si certaines précautions ne sont pas prises.

L'épandage des fertilisants, les puits perdus et les accidents routiers impliquant des camions contenant des produits toxiques, sont autant de sources de polluants pouvant également déboucher sur une contamination grave des aquifères.

Ces types de pollutions comportent de très longs effets dans le temps et leur élimination reste le plus souvent partielle.

Toute mesure de sauvetage ou de prévention doit être précédée d'une excellente compréhension des conditions existantes. Les modèles mathématiques fournissent un moyen d'intégrer tous les paramètres d'un tel problème. Ils peuvent donc constituer un outil précieux pour guider l'interprétation et la ligne de conduite à appliquer dans les problèmes de pollution.

II. MODELES ET TECHNIQUES DE RESOLUTION.

Un modèle est par définition une représentation simplifiée de la réalité. Cette représentation doit cependant être la plus conforme possible du point de vue des mécanismes et processus simulés.

Des modèles physiques ou électriques ont existé autrefois mais, actuellement, les modèles mathématiques sont les plus utilisés de par leur applicabilité plus générale.

Ils sont constitués d'un ensemble d'équations qui, moyennant certaines hypothèses et certaines approximations, décrivent le phénomène étudié.

- Deux types de modèles mathématiques sont possibles :
- les modèles déterministes,
 - les modèles stochastiques (probabilistes).

L'approche déterministe d'un problème physique se base sur le principe de causalité liant par une relation unique la cause et les résultats. En appliquant ce principe aux écoulements souterrains (Dassargues, 1991a), on obtient (figure 1) :

une nappe aquifère, représentée par ses paramètres (perméabilité K , transmissivité T , emmagasinement S , dispersivité α , coefficient de diffusion D_m , ...) est soumise à une "sollicitation" quantitative (débit de pompage Q , infiltration I , ...) ou qualitative (arrivée d'un polluant en quantité q de concentration C , ...) et réagit d'une et une seule manière que l'on calcule de façon déterministe (figure 4) et la solution s'exprime en hauteurs piézométriques (h), en pression (p), en concentrations (C),

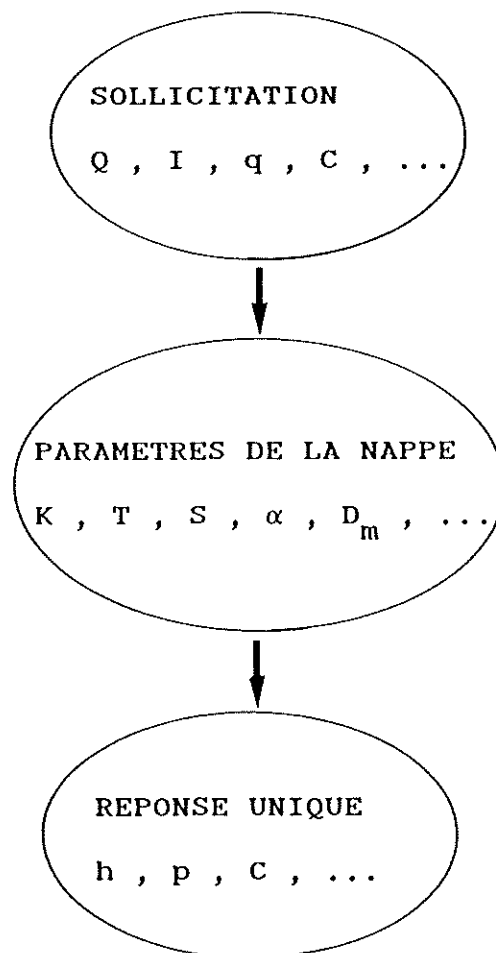


Fig. 1 : Schéma physique lors de la sollicitation d'une nappe aquifère

La réponse obtenue par un modèle, peut sembler extrêmement précise mais il faut toujours la confronter à la précision des données utilisées.

En fait, on peut commettre des erreurs importantes dues aux incertitudes dans la paramétrisation et la définition exacte de la nappe aquifère, et dans une moindre mesure, aux erreurs de mesure, aux erreurs numériques et à l'approximation faite lors de l'intégration.

L'approche probabiliste (ou stochastique) postule que l'incertitude sur les paramètres de l'aquifère étudié, puisse être estimée. Dès lors, ceux-ci sont introduits comme des variables aléatoires possédant des fonctions de probabilité déterminées (de Marsily, 1986). Les sollicitations imposées à la nappe peuvent également, dans certaines circonstances, être considérées comme des variables aléatoires.

Les mêmes équations que dans les approches strictement déterministes, sont utilisées pour décrire les processus physiques (écoulement, dispersion,...).

L'approche probabiliste permet donc, en principe, de quantifier l'erreur, mais cette précision est illusoire car elle suppose le système parfaitement représenté par les fonctions de probabilité des paramètres et des sollicitations. Il est difficile ou même impossible de vérifier si cette dernière condition est satisfaite.

Dans la suite de cette synthèse, seuls les modèles déterministes seront abordés. Deux catégories peuvent être distinguées :

- les modèles de type "boîte noire" qui fournissent des résultats calculés par une relation totalement empirique
- les modèles physiquement significatifs qui se servent de l'expression mathématique des lois physiques qu'ils simulent.

Il est évident que les modèles du premier groupe sont peu recommandables car pour qu'une simulation par ordinateur soit fiable, il est non seulement nécessaire que les méthodes numériques utilisées soient précises et fiables, mais également que la description physique, convertie en données mathématiques du processus devant être simulé, soit correcte. Ils ne peuvent donc en aucun cas être utilisés pour des prédictions.

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, éventuellement, les coefficients d'infiltration. Si des phénomènes de transport de polluants sont à simuler, il faut prendre en compte les équations représentant la dispersion et la diffusion du polluant dans l'eau et éventuellement les effets d'eau immobile et d'adsorption dans le milieu poreux saturé (Biver et al., 1989).

Le calcul est réalisé en intégrant les équations différentielles sur le domaine, avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites. Les paramètres sont attribués à des zones restreintes appelées cellules, pour la méthode des différences finies (figure 2) ou éléments pour la méthode des éléments finis (figure 3), permettant de tenir compte d'une hétérogénéité aussi importante que le permet le maillage (la discrétisation) du domaine.

En fait, le calcul consiste à intégrer les équations dans chacune de ces zones, prise séparément, tout en tenant compte des conditions de compatibilité aux bordures communes de ces zones. Ces dernières conditions assurent la continuité du milieu poreux représenté et du champ recherché (hauteurs piézométriques, pressions d'eau, concentrations, ...). La complexité de la géologie et de la géométrie des nappes aquifères peut donc être prise totalement en compte. A la limite, dans chaque zone (cellule ou élément), des paramètres différents pourraient être choisis (Dassargues et al., 1987). Cette prise en compte des conditions réelles d'un aquifère n'était pas permise par les solutions analytiques les plus complexes, même superposées de façon judicieuse.

La solution trouvée consiste en champs de valeurs de hauteurs piézométriques (h) ou de pressions d'eau (p) (figure 4), additionnés de valeurs de concentrations dans le cas du calcul du transport de polluant.

Ce n'est que moyennant des hypothèses très restrictives quant aux propriétés de l'aquifère, aux conditions aux frontières et aux directions d'écoulement que des solutions analytiques peuvent être trouvées. L'exemple le plus connu et le plus utilisé est la solution de Theis (1935), 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.

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 & Verruijt (1987), Neuman et al. (1977), Strack (1987), Pinder & Gray (1977), ...).

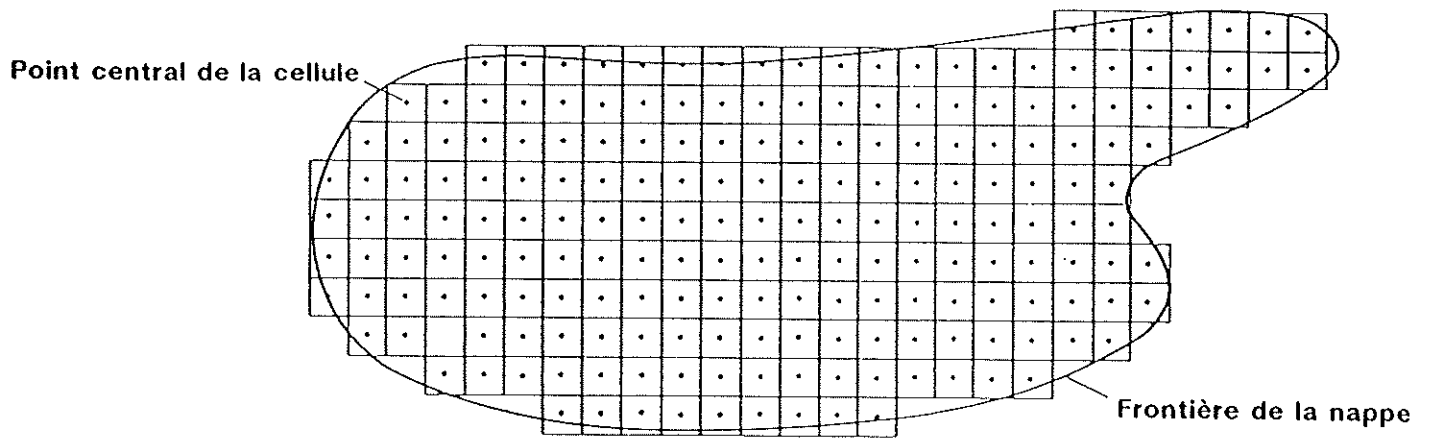


Fig. 2 : Maillage de cellules centrées de différences finies pour un aquifère (vue 2D plan).

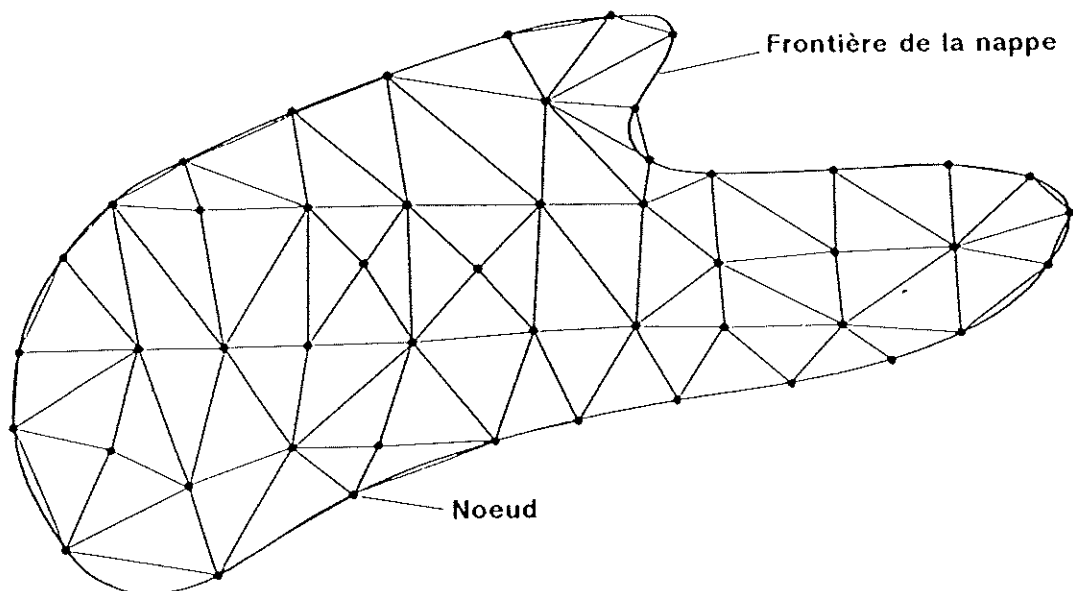


Fig. 3 : Maillage d'éléments finis triangulaires pour un aquifère (vue 2D plan).

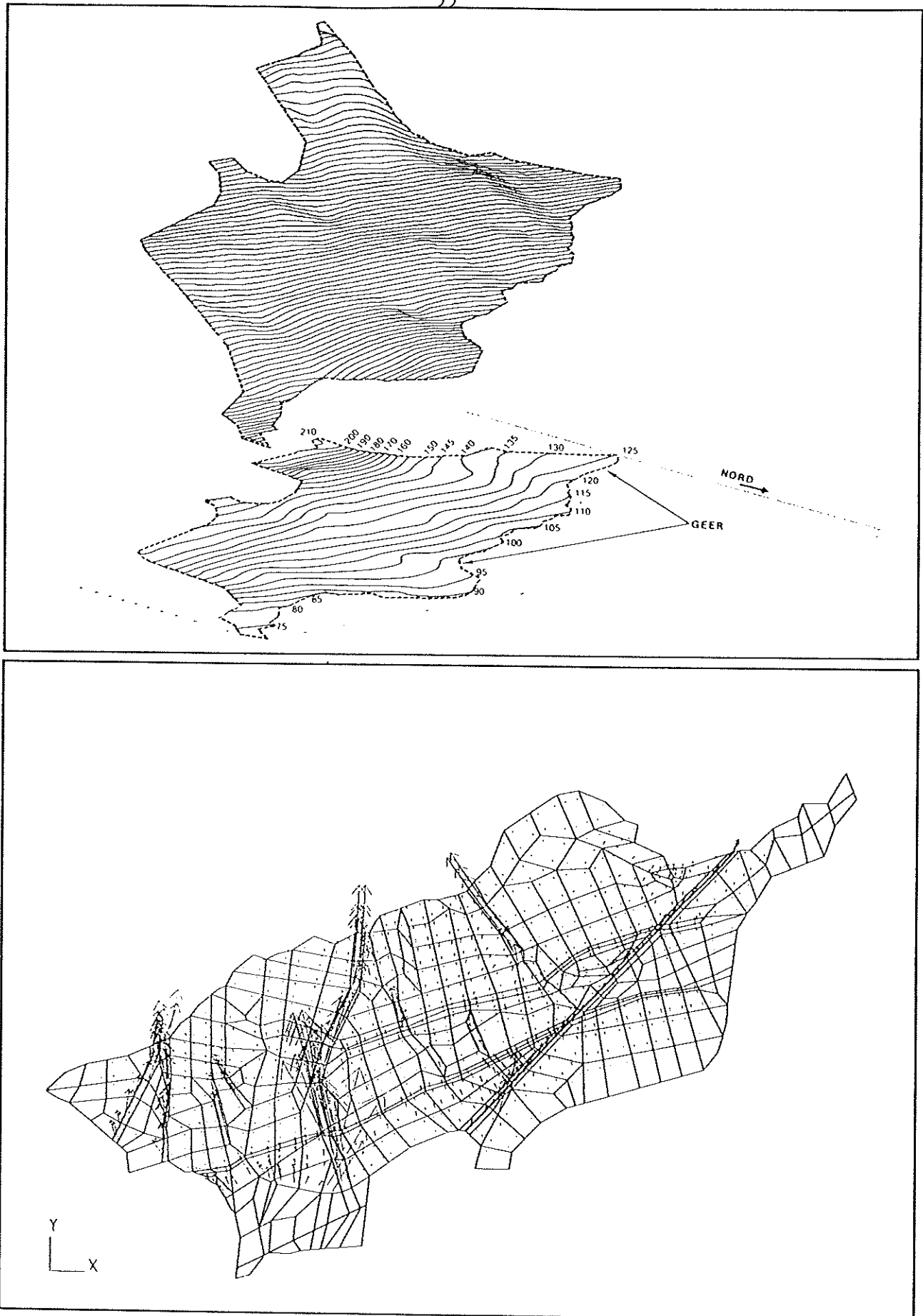


Fig. 4 : Piézométrie calculée pour la Hesbaye en 1966 (dessus) et vue en plan des flux calculés dans la couche de craie compacte (d'après Dassargues et al., 1988).

Outre la discrétisation spatiale, ces méthodes demandent également une discrétisation temporelle.

Le système est résolu à chaque pas de temps, après une éventuelle actualisation des équations algébriques qui le composent.

C'est à ce niveau qu'intervient éventuellement la prise en compte de variations des paramètres au cours du processus physique simulé; nous parlerons alors de la "non linéarité" des paramètres (cfr. IV).

III. DONNEES NECESSAIRES

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 1). Ces dernières seront utilisées dans la phase de calibration du modèle (cfr. V).

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 (de moins en moins) des contingences informatiques (taille du système, temps CPU). Dans tous les cas, il s'agit donc d'un compromis entre ces différents impératifs.

Les données nécessaires aux différents types de modèles sont mentionnées de façon générale au tableau 1. Le modèle de transport d'un polluant miscible requiert, au préalable, toutes les données nécessaires au modèle d'écoulement; en ce sens, il peut être considéré comme une super-structure de celui-ci.

L'hydrogéologue doit réaliser l'assemblage de toutes ces données, transformant le système réel en un modèle mathématique préservant les éléments essentiels du système.

Modèle Ecoulement	Modèle Transport de polluant miscible
<p><u>Données géométriques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Représentation du domaine étudié par un maillage; choix des dimensions des cellules ou des éléments du modèle 	<p><u>Données géométriques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Représentation du domaine étudié par un maillage; choix des dimensions des cellules ou des éléments du modèle
<p><u>Paramètres</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Perméabilité ou transmissivité - Coefficient d'emménagement (spécifique) <p>(spécifiés dans chaque élément ou cellule du maillage)</p>	<p><u>Paramètres</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Dispersivités longitudinale et transversale - Porosité du milieu poreux - Perméabilités relatives des fluides
<p><u>Sollicitations extérieures</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pompages et réinjections - Infiltrations, flux latéraux <p>(spécifié là où c'est nécessaire)</p>	<p><u>Sollicitations extérieures</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentrations volumiques dans les eaux pompées et injectées (ou infiltrées) <p>(spécifiées là où c'est nécessaire)</p>
<p><u>Conditions aux frontières</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Imperméables - Flux imposés - Potentiels imposés <p>(choix d'une des options pour chaque frontière)</p>	<p><u>Conditions aux frontières</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentrations volumiques imposées dans les flux de frontière <p>(spécifiées aux frontières là où c'est nécessaire)</p>
<p><u>Conditions initiales</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Hauteurs piezométriques dans toute la zone au début de la simulation <p>(spécifiées à chaque élément du maillage)</p>	<p><u>Conditions initiales</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentrations en polluant dans toute la zone au début de la simulation <p>(spécifiée dans chaque élément du maillage)</p>
<p><u>Variables calculées à comparer aux mesures</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Hauteurs piezométriques dans tous les éléments du maillage, à tout moment - Flux - Bilan 	<p><u>Variables calculées à comparer aux mesures</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentrations en polluant dans tous les éléments du maillage et à tout moment

Tableau 1

IV. VARIATION DES PARAMETRES

La recherche de nouvelles lois à introduire dans les modèles, afin de représenter au mieux les processus réels que l'on veut simuler, ne peut s'envisager sans tenir compte des interactions existant entre les différents phénomènes physiques et physico-chimiques s'opérant dans le milieu poreux. Ces derniers peuvent être classés en 4 grandes catégories de processus (Dassargues & al., 1989) :

- les écoulements en milieu poreux,
- la géomécanique des terrains meubles et rocheux,
- les phénomènes physico-chimiques dans l'ensemble matrice-fluide,
- le transport en milieu poreux.

Les interactions entre ces 4 types de processus vont s'exprimer en termes de couplages et de non linéarités des paramètres. Selon les circonstances et le degré de précision désiré, certains couplages sont considérés comme indispensables et d'autres peuvent être négligés sans affecter, de manière significative, la précision du modèle.

En résumé, les différentes interactions possibles sont illustrées par le schéma de la figure 5.

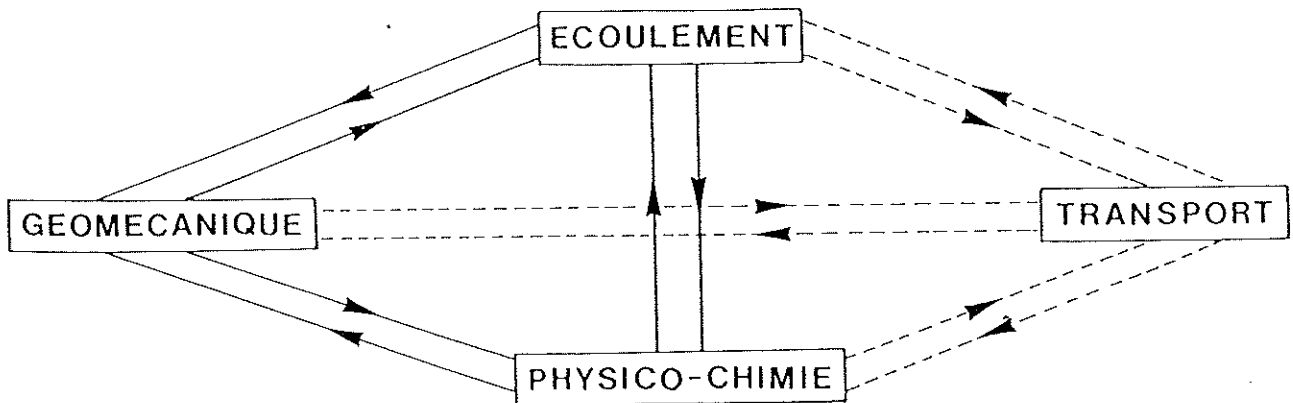


Fig. 5 : Interactions doubles entre les différents processus physiques dans le milieu poreux, sans tenir compte des effets thermiques (d'après Dassargues et al., 1989)

- Interactions géomécanique ↔ écoulements : les déformations d'un milieu poreux, par diminution du volume des pores ou par fermeture/ouverture des fissures, vont provoquer des variations des paramètres de l'écoulement; ce dernier, modifié, va à son tour influencer l'état de contrainte régnant dans le milieu.

- Interactions physico-chimie ↔ écoulements : les phénomènes de coalescence, de recristallisation, de dissolutions, d'adsorption/désorption, ... provoqués par les conditions physico-chimiques de l'ensemble fluide saturant plus matrice, vont changer les valeurs de la porosité et de la perméabilité du milieu poreux, ce faisant les écoulements sont modifiés, provoquant d'autres conditions physico-chimiques (i.e. réduction ou augmentation du flux de fluide saturant).

- Interactions physico-chimie ↔ géomécanique : les phénomènes physico-chimiques (décrits ci-avant) sont responsables du fluage de réservoirs souterrains en terrains meubles et de modifications de résistances aux contraintes dans les terrains rocheux. Après déformation, les conditions physico-chimiques sont modifiées (i.e. par augmentation de la pression dans les pores).

- Interactions transport ↔ écoulements : les conditions de transport d'une substance polluante au sein de la phase fluide sont directement influencées par l'écoulement de cette phase fluide dans le milieu poreux et, à l'inverse, le transport d'une substance peut affecter les conditions d'écoulement (i.e. modification de l'écoulement en nappe salée par l'influence de la masse volumique du fluide).

- Interactions transport ↔ physico-chimie : les paramètres intervenant dans les différents processus du transport (dispersion, diffusion, adsorption/désorption, ...) sont étroitement liés aux conditions physico-chimiques régnant dans le milieu poreux. D'autre part, l'apport d'une substance transportée par la phase fluide peut modifier considérablement les conditions physico-chimiques prévalant dans le milieu.

Ce bref aperçu des multiples interactions pouvant entrer en ligne de compte montre que, pour rendre possible la réalisation de modèles mathématiques intégrant plusieurs processus et quelques-unes des interactions entre ceux-ci, d'importantes recherches expérimentales et numériques sont et seront encore nécessaires, touchant à des domaines très interdisciplinaires.

Les L.G.I.H. de l'Université de Liège, en collaboration pour les aspects numériques, avec le Département M.S.M. poursuivent actuellement un programme de recherche dans ce domaine.

Plus modestement, dans le cadre de cet exposé, nous limiterons à aborder les interactions et couplages concernant les écoulements en milieu poreux et la géomécanique des terrains meubles d'une part et les interactions écoulement-transport d'autre part.

Dans les sédiments meubles, les dépressions provoquées par l'exploitation des nappes engendrent dans les terrains compressibles avoisinants, des phénomènes de subsidence, dus à l'accroissement de la contrainte effective entre les grains de la matrice.

Les modèles simulant ce type de comportement doivent être "couplés" avec le modèle d'écoulement de la zone étudiée. Les tassements provoquent une diminution de la porosité des terrains, entraînant des diminutions de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu. Ces non-linéarités doivent être prises en compte dans des modèles écoulement-tassement, simulant de façon fiable, les phénomènes de subsidence.

Ces concepts ont été pris en compte lors des études réalisées par nos Laboratoires (L.G.I.H.- M.S.M.) sur les problèmes de la subsidence du gisement pétrolier d'Ekofisk (Schroeder & al, 1988) et de la subsidence de la ville de Shanghai (Dassargues, 1991b, Monjoie, 1991). Dans certains cas, si ces variations de paramètres ne sont pas prises en compte dans le calcul, des erreurs colossales peuvent résider dans les résultats des calculs d'écoulement comme de tassement (figure 6).

Le choix de la loi de variation des paramètres (perméabilité K et coefficient d'emmagasinement spécifique S) est également très important. A notre sens, ce choix doit être essentiellement guidé par les données dont on dispose afin d'adapter au mieux les coefficients de la loi choisie, pour que celle-ci représente le mieux possible les propriétés des couches et sous-couches rencontrées.

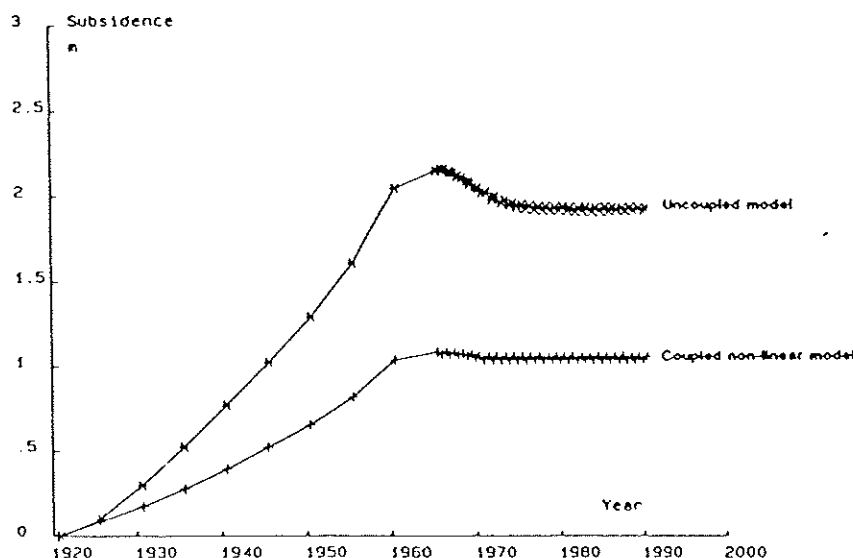


Fig. 6 : Subsidence totale en 1 point à Shanghai, de 1920 à 1990, calculée par un modèle non couplé à paramètres constants et par un modèle couplé à paramètres variables (d'après Dassargues, 1991b).

Les paramètres d'écoulement en milieu poreux interfèrent sur les problèmes de transport.

Une modélisation des phénomènes de transport ne se conçoit qu'en associant l'advection et la diffusion, c'est-à-dire le déplacement du fluide transporteur et le déplacement du polluant au sein de celui-ci. Cette interaction est la cause de grandes difficultés numériques.

Pour un polluant miscible, le problème réside en un couplage de l'équation de propagation du polluant avec l'équation d'écoulement de l'eau. Ce couplage est généralement unilatéral en ce sens que l'écoulement peut être supposé indépendant de la propagation du polluant mais pas l'inverse.

L'exception majeure à cette règle est constituée par le problème particulier de l'étude des aquifères salés en contact avec des aquifères d'eau douce. La concentration en sel dans la nappe salée est telle que la masse volumique du fluide et donc les conditions d'écoulement sont modifiées. Les interactions sont alors bidirectionnelles entre l'écoulement et le transport.

Lors de la résolution des équations différentielles représentant le transport de polluants en milieu poreux, les solutions numériques sont parfois extrêmement complexes et difficiles à trouver car elles doivent s'appliquer à des équations en même temps à caractère elliptique et parabolique. Lorsqu'on essaye de résoudre ces équations par des méthodes numériques classiques, des instabilités numériques apparaissent sous forme d'oscillations. De nouveaux schémas sont alors à utiliser : méthodes de décentrage, volumes finis, méthodes "upstream", méthodes spectrales, etc ... (Biver, 1990 et 1991).

De plus, par rapport au cas "classique" du transport de polluant, mentionons que pour un polluant immiscible, il existe une non linéarité due à la présence de coefficients intrinsèquement variables. Cette particularité amène des comportements numériques assez différents.

Ces quelques considérations mettent en exergue les difficultés rencontrées lors de certaines simulations mathématiques relatives aux milieux poreux saturés. De nombreux modèles mathématiques, de plus en plus sophistiqués, ont vu le jour ces dernières années afin d'essayer de résoudre certains problèmes en choisissant différentes hypothèses de travail.

Les perspectives de recherches appliquées dans ce domaine ne manquent pas. Elles comportent essentiellement deux aspects :

1. l'acquisition de données et de paramètres, en laboratoire et in situ par de nombreux (et coûteux) essais;

2. la recherche numérique afin d'implanter, dans des programmes informatiques, ces couplages, non linéarités et nouvelles lois.

Pour l'hydrogéologue, utilisateur de ces modèles, il est essentiel de distinguer et de discerner les hypothèses et les approximations effectivement appliquées dans les modèles utilisés et d'autre part de juger si ces hypothèses ne sont pas trop restrictives et si ces approximations n'entraînent pas trop d'imprécisions dans les résultats par rapport aux phénomènes observés.

V. CALIBRATION DU MODELE

Ce n'est que lorsqu'un modèle mathématique représente de façon précise les phénomènes simulés que son application pourra être envisagée pour d'éventuelles prédictions.

Les lois fondamentales et les hypothèses choisies doivent tout d'abord représenter de façon acceptable les conditions réelles de la nappe. Par exemple, si le modèle écoulement suppose un écoulement bidimensionnel plan, il faut que l'on ait constaté que ce type de conditions est réellement prédominant dans l'aquifère étudié. De même, l'étude d'une coupe verticale 2D suppose qu'aucun flux important n'est constaté perpendiculairement à la coupe modélisée. Tous les écoulements naturels et les phénomènes de transports sont dans la réalité des processus transitoires et à 3 dimensions. Une réduction, par hypothèse, à un régime permanent et à 2 dimensions engendre des risques qui doivent bien être évalués dans chaque application.

Dans la plupart des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés de l'aquifère est le problème majeur lors de l'élaboration d'un modèle, à cause de l'insuffisante connaissance quantitative de la géologie. Les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones. Ces constatations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité.

Cette procédure est appelée "calibration", elle consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. Le plus souvent les données modifiées sont essentiellement les valeurs et répartitions des paramètres car les autres données résultent de mesures plus fiables.

La manière de calibrer la plus souvent utilisée consiste à évaluer l'ajustement entre résultats et mesures sans autre outil mathématique (moyennes, moindres carrés etc...), car ceux-ci peuvent dans certains cas, apparemment favorables, masquer des situations inacceptables.

Cette approche peut être considérée comme relativement subjective et requiert de la part de l'hydrogéologue une bonne expérience en la matière, et un bon jugement afin d'obtenir finalement une calibration fiable. Les différents paramètres peuvent être dépendants les uns des autres et la réponse du modèle constitue l'intégration des influences respectives. En fait, un résultat du modèle peut correspondre à différents jeux de données, ce qui explique qu'une bonne calibration n'est pas à elle seule une garantie de résultats fiables pour les prédictions.

La fiabilité d'un modèle est surtout garantie par l'expérience et l'honnêteté de l'hydrogéologue qui l'a réalisé de façon à respecter les phénomènes réels dans la définition du problème et durant la phase de calibration (les paramètres doivent être ajustés en respectant des intervalles de valeurs acceptables au vu des mesures). Dans certains cas, la phase de calibration peut remettre en cause graduellement l'interprétation géologique du système.

Il est assez paradoxal de lire que les spécialistes des modélisations en hydrogéologie reconnaissent tous le caractère indispensable et primordial d'une bonne calibration des modèles et de constater qu'il existe bien souvent très peu de traces dans la littérature de cette phase essentielle et préalable à tout résultat de simulation.

Différents auteurs essayent de définir des standards de qualité de la calibration mais il est difficile d'établir des règles générales (Woessner, 1990).

Les figures 7 et 8 présentent des résultats de calibrations jugées satisfaisantes pour des simulations de différents types.

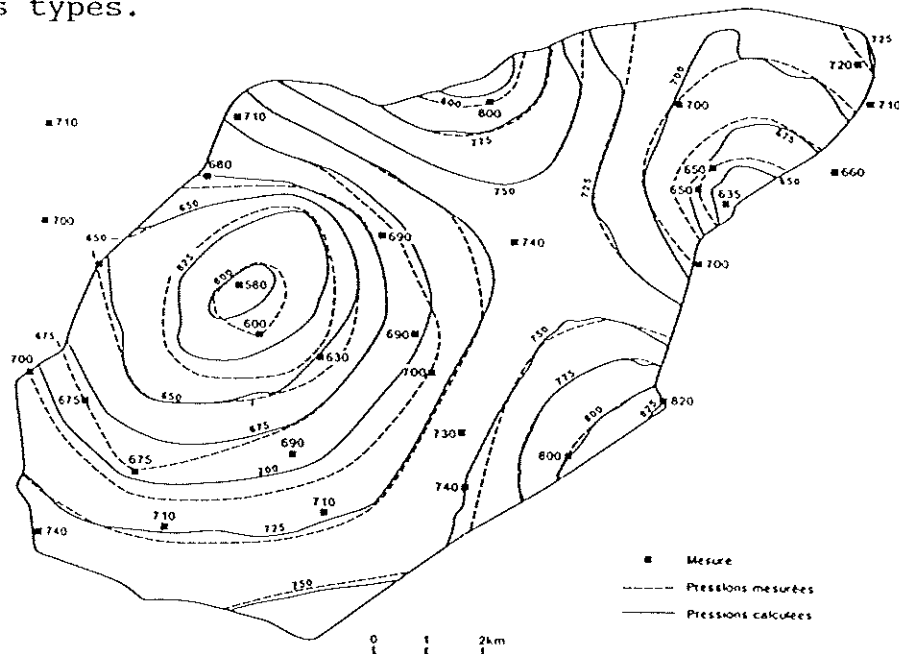


Fig. 7 : Pressions calculées, comparées aux pressions mesurées dans l'aquifère principal, au centre de Shanghai, situation du 30 septembre 1960 (pressions en kPa) (d'après Dassargues, 1991b).

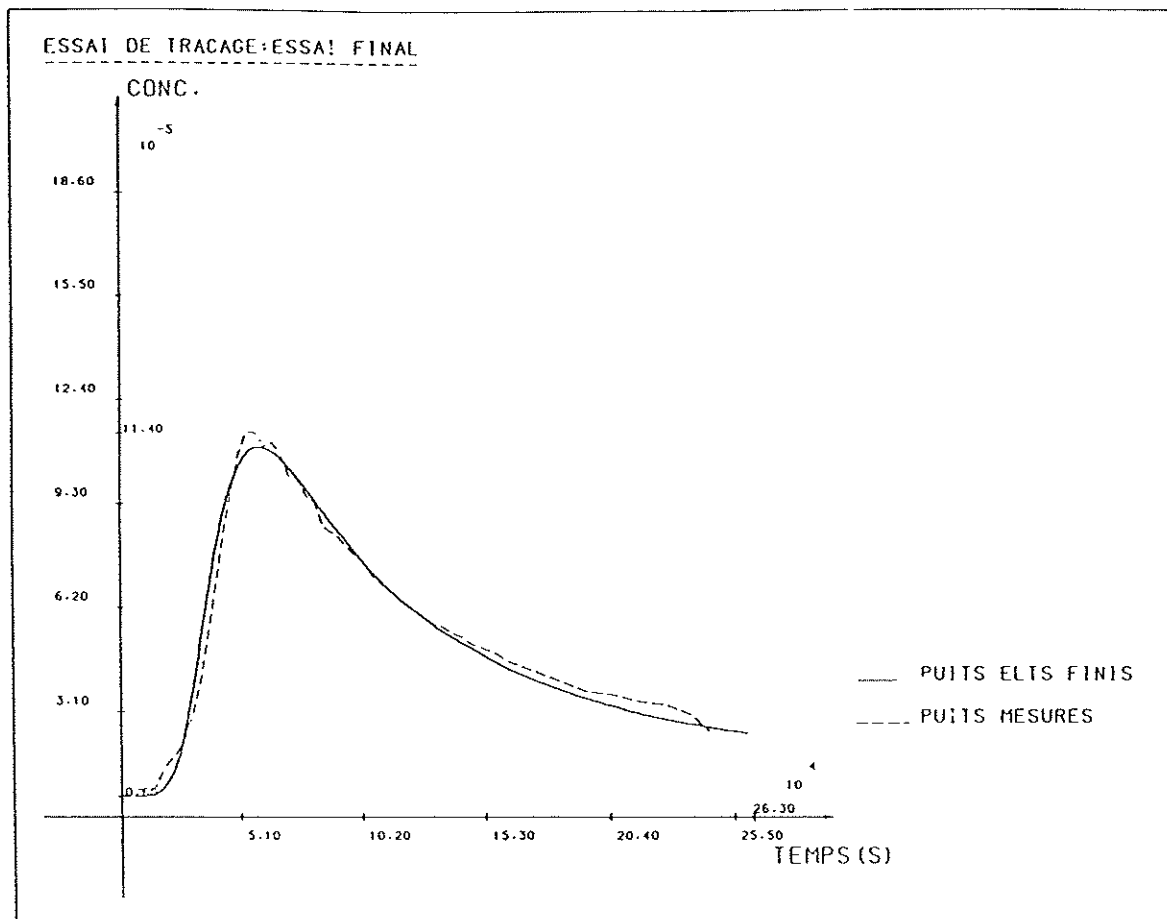


Fig. 8 : Calibration des paramètres de transport d'un traceur dans l'aquifère landenien à Bertrée (Hesbaye). Comparaison entre la courbe de restitution expérimentale (pointillé) et la courbe de restitution simulée (trait plein) pour le lithium (d'après Biver, 1991).

VI. SENSIBILITE D'UN MODELE

L'intérêt d'utiliser un modèle est lié à sa capacité d'intégrer et d'utiliser toutes les données et informations relatives à la zone étudiée, d'une façon logique. Il permet en outre, de déterminer les zones où des mesures supplémentaires sont nécessaires à la bonne compréhension des processus en cours.

Bien sûr, les résultats du modèle ne sont pas plus précis que les données disponibles; le modèle ne peut remplacer les mesures, mais il peut synthétiser les données. Les prédictions doivent toujours être interprétées et utilisées en ayant à l'esprit le degré de certitude avec lequel le système réel est représenté.

Une analyse de la sensibilité d'un modèle mathématique de simulation tente habituellement de couvrir les aspects suivants :

- (1)- étudier les interactions entre paramètres (relations éventuelles);

- (2)- déterminer la plage de variation optimum pour un paramètre et l'influence d'une variation (choisie dans cette plage) sur certains résultats;
- (3)- déterminer éventuellement les "importances" respectives des différents paramètres intervenant dans le modèle.

Ce type d'analyse est réalisé en principe au voisinage immédiat des valeurs optimum des paramètres pour lesquels la calibration a été jugée satisfaisante.

Une analyse de sensibilité peut être relative à un seul ou relative à plusieurs paramètres (figure 9). Sans entrer dans les détails, ce type d'analyse permet d'avoir une idée de la variation des résultats pour une fourchette de variation d'un ou plusieurs paramètres. Comme ceux-ci sont déterminés sur base de l'interprétation d'essais de pompage (K , T , S_s , S) ou de traçages (α , D_m , ...) (figure 8), la précision réelle de la valeur trouvée est telle qu'un degré d'erreur de 50 à 100 % est toujours possible. en fait, sur base des essais, on détermine le plus souvent des intervalles de variation de ces paramètres

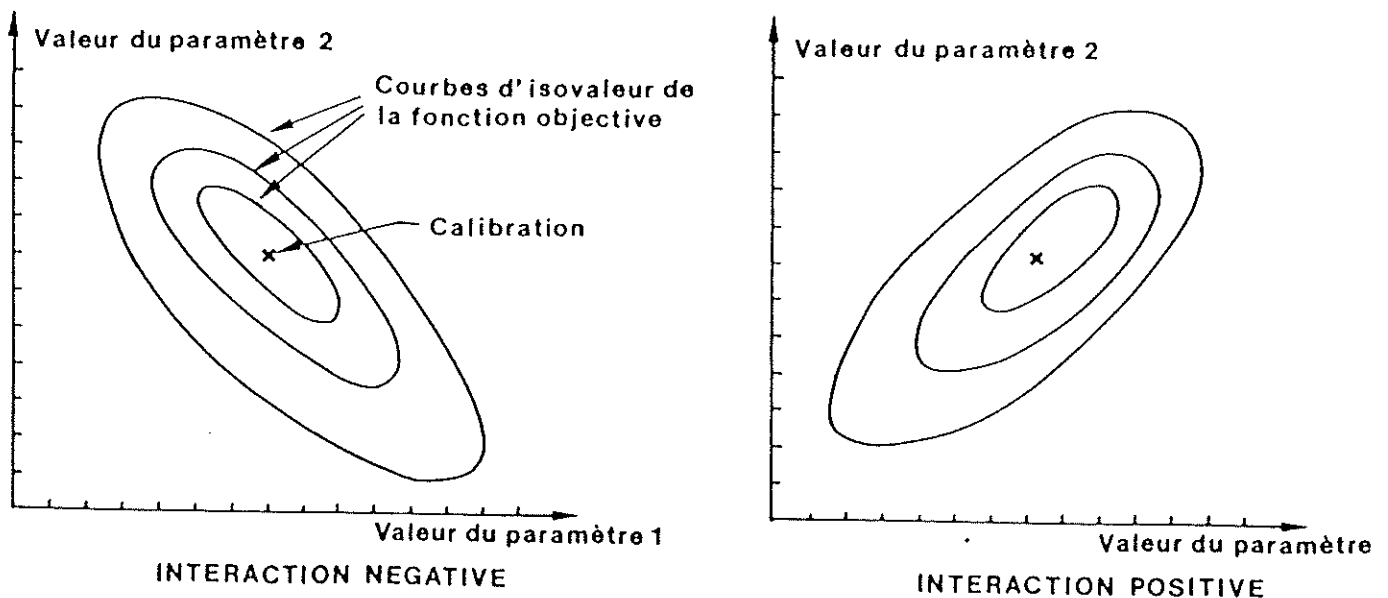


Fig. 9 : Diagrammes de sensibilité du modèle à deux paramètres
Surfaces de réponse avec "interaction négative" ou
"interaction positive" entre les paramètres
(d'après Dassargues et al., 1989).

VII. TYPES D'APPLICATION

Les modèles physiquement significatifs fournissent des des résultats constituant une aide précieuse lorsque des décisions concernant des modifications de sollicitation de l'aquifère sont à prendre. De nouvelles conditions peuvent être essayées dans le modèle par ajustement des données et les réponses permettent d'estimer les effets engendrés fournissant une base solide de décision. Parmi les applications possibles des modèles écoulement quantitatifs on peut citer (Jensen, 1987) :

- a) études de bilans :
 - détermination des tendances régionales des écoulements dans le réservoir et les interactions avec les autres réservoirs, les puits etc...
- b) puits de pompage
 - prédiction des effets du pompage sur la piézométrie et sur la suppression de certains flux;
 - détermination de périmètres de protection;
 - prédiction du mouvement de l'interface entre eau douce et eau salée;
 - prédiction de l'effet de l'épandage d'eau pompée lors de l'irrigation.
- c) changements dans la réalimentation de la nappe
 - prédiction des effets dus à l'urbanisation
 - prédiction des changements résultants de l'irrigation ou de l'infiltration en provenance d'un nouveau canal
 - analyse à long terme des influences des tendances climatiques sur les niveaux piézométriques et la distinction des effets dûs aux facteurs anthropiques.
- d) estimation des paramètres
 - dans certains cas, précision de la distribution régionale des paramètres hydrauliques (problème inverse)
- e) planning des mesures "in situ"
 - rationalisation dans la collecte ultérieure de données par la détermination des mesures les plus nécessaires
- f) gestion des eaux souterraines
 - planning idéal d'exploitation des ressources
 - stockage souterrain saisonnier d'eaux de surface

Parmi les applications possibles des modèles écoulement qualitatifs on peut citer (Jensen, 1987) :

- a) contamination à partir d'une source ponctuelle (par exemple une décharge de déchets)
 - détermination des conditions existantes de contamination
 - détermination des concentrations
 - prédiction des conditions futures de contamination
 - identification des actions réparatrices à mener et prédictions concernant l'amélioration de la qualité de l'eau
 - identification des mesures in situ à réaliser incluant la localisation et le monitoring
 - sélection des sites possibles pour une éventuelle décharge

- b) contamination à partir de sources uniformes (par exemple l'épandage de fertilisants dans les champs cultivés)
 - détermination de la qualité actuelle de l'eau des nappes
 - détermination de la concentration dans les eaux de recharge
 - prédiction de la qualité des eaux souterraines dans le futur
 - identification des options de gestion de l'aquifère
 - prédiction des conséquences possibles de ces choix
 - planning du réseau de mesure

- c) gestion de la qualité des eaux
 - dans certains cas, identification de la stratégie de pompage pour éviter l'intrusion d'eaux salées ou polluées.

VIII. CONCLUSIONS

La gestion quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine est devenue, de nos jours, d'une importance capitale. De par leur nature, les nappes aquifères étant le siège de phénomènes non observables directement et continûment, leur étude et la prévision d'évolutions futures comprennent certains éléments d'incertitude. Toutes les informations relatives au problème doivent être prises en compte.

Les modèles mathématiques déterministes et physiquement significatifs, fournissent une méthode intégrant toutes les informations d'une manière consistante avec les paramètres de la nappe, choisis en harmonie avec les lois régissant les phénomènes étudiés. Ces modèles assurent la

cohérence entre les données et les concepts utilisés, contrairement aux modèles de type "boîte noire" qui sont basés sur des relations empiriques.

Les paramètres estimés doivent être calibrés à l'aide de comparaisons entre les mesures et les résultats. Cette calibration doit être menée en gardant à l'esprit un solide bagage géologique et hydrogéologique, tout en étant familier avec les modèles utilisés et les approximations réalisées.

D'autre part, les moyens accrus du côté informatique permettent d'envisager la simulation de phénomènes de plus en plus complexes de manière à tendre vers une simulation de plus en plus fiable de la réalité. Encore faut-il disposer des données de laboratoire et de terrain, des outils numériques (programmes) et du potentiel humain et financier pour les acquérir et les perfectionner continuellement. Les sujets de recherche dans ce domaine ne manquent pas et leur liaison avec la problématique globale de l'environnement est évidente.

REFERENCES

- Bear, J., and Verruijt, A., 1987, Modeling groundwater flow and pollution, Reidel, 414 p.
- Biver, P., 1990, Recherche phénoménologique sur la propagation des polluants dans un milieu poreux et application à un cas concret, Rapport de synthèse IRSIA, 98 p.
- Biver, P., 1991, Recherche phénoménologique sur la propagation des polluants dans un milieu poreux et application à un cas concret, Rapport de synthèse IRSIA, 123 p.
- Biver, P., Dassargues, A., Charlier, R., Cescotto, S. et Monjoie, A., 1989, Contrat d'étude de la modélisation des phénomènes de pollution dans l'aquifère de "Crétacé de Hesbaye", Rapport L.G.I.H. pour la Région Wallonne, HESB/891, non-publié.
- Dassargues, A., 1989, Sensibilité des modèles aux variations de certains paramètres, rapport LGIH-MSM : SPPS 891, Etude de la géologie du Quaternaire, de l'hydrogéologie et de la géologie de l'ingénieur dans le delta du Yangtse. Modèle mathématique de la zone de Shanghai, pp. 607-613.
- Dassargues, A., 1991a, Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation, Annales de la Société Géologique de Belgique, T. 113, 2, pp. 217-229.
- Dassargues, A., 1991b, Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains: Discrétisation du domaine, préparation statistique des données, couplages et non linéarités des paramètres, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 313p.

Dassargues, A., Bolly, P.Y., et Monjoie, A., 1987, Modélisation de la nappe aquifère de Hesbaye, Rapport LGIH n° HESB/871, Université de Liège, 262 p., non publié

Dassargues, A., Radu, J.P. and Charlier, R., 1988, Finite element modelling of a large water table aquifer in transient conditions, Adv. in Water Resources, vol. 11, pp. 58-66.

Dassargues, A., Charlier, R., Monjoie, A. et Cescotto, S., 1989, Projet d'Action Concertée : Modélisation des interactions conditionnant la mise en valeur des réservoirs naturels souterrains, confidentiel, ULg.

de Marsily, G., 1986, Quantitative hydrogeology, Academic Press, 440 p.

Jensen, H., 1987, The value of groundwater models for planners and decision makers, Technical Documents in Hydrology, IHP III, Project 2.4.b, Unesco, Paris.

Monjoie, A., 1981, Notes du cours d'Hydrogéologie, Université de Liège (Belgique), Faculté des Sciences Appliquées, 130 p.

Monjoie, A., 1991, Subsidence dans la région de Shanghai (Rép. Pop. de Chine), Bull.Séanc. Acad. r Sci. Outre-Mer, 36(1990-4) :725-750.

Neuman, S.P., Pinder, G.F., and Gray, W.G., 1977, Finite element simulation in surface and subsurface hydrology, Academic Press, London.

Pinder, G.F. et Gray, W.G., 1977, Finite element, Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, 288 p.

Schroeder, Ch., Monjoie, A., Radu, J.P., Charlier, R. and Fonder, G., 1988, Ekofisk subsidence compaction, mathematical modelisation synthesis report, internal report L.G.I.H.-M.S.M. for Fina Exploration Norway, Fina 881, unpublished

Strack, O.D.L., 1987, Groundwater mechanics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Trans. Am. Geophys. Union, Ann. Meet., 16th, pp. 519-524.

Woessner, W.W., 1990, Setting calibration targets and assessing model calibration - room for improvement: an example from North-America, ModelCARE 90 : Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, The Hague, pp.279-288.