

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES HYDROGEOLOGUES

ROMANIAN ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS

ASSOCIATION ROUMAINE DES HYDROGEOLOGUES

UNIVERSITY OF BUCHAREST

UNIVERSITE DE BUCAREST

**IMPACT OF INDUSTRIAL  
ACTIVITIES  
ON  
GROUNDWATER**

**L'IMPACT DES ACTIVITES  
INDUSTRIELLES  
SUR LES  
EAUX SOUTERRAINES**

◇

◇

Proceedings  
of the  
International Hydrogeological  
Symposium

*Compte-rendu  
du  
Symposium hydrogéologique  
International*

◇

◇

23rd - 28th May 1994, Constantza,  
Romania

*23e - 28e mai 1994, Constantza,  
Roumanie*

Bucharest University Press

1994

MODELISATION COUPLEE ET NON LINEAIRE DE LA SUBSIDENCE  
INDUITE PAR DES POMPAGES D'EAU SOUTERRAINE  
EN ZONES D'ESTUAIRES ET DE DELTAS

A. Dassargues

Résumé

Dans les plaines côtières et deltaïques situées à l'embouchure des grands fleuves, de nombreuses cités importantes ont subi des subsidences provoquées par le pompage d'eau souterraine. Cette eau est le plus souvent nécessaire à l'essor industriel de ces cités.

En baissant les pressions d'eau dans les aquifères, les contraintes effectives sont augmentées dans les terrains récents peu consolidés, provoquant la compaction.

De nombreuses études sont relatées dans la littérature, mais se limitent habituellement à des exposés généraux basés sur des modèles analytiques, empiriques ou numériques, prenant des hypothèses très simplificatrices comme l'homogénéité et l'isotropie des terrains. Le plus souvent, aucune calibration n'est montrée et les paramètres d'écoulement et de tassement sont choisis constants.

Une méthodologie est proposée pour des simulations rigoureuses de ces subsidences.

Dans un premier temps, une étude géologique complète et détaillée doit fournir la répartition en trois dimensions des différentes entités géologiques, chacune de celles-ci ayant ses propriétés hydrogéologiques et géotechniques spécifiques déterminées. Ces données constituent la base fondamentale du modèle mathématique.

Dans un deuxième temps, le modèle numérique simulant les écoulements en milieu poreux couplés aux tassements, doit inclure la variation et l'interdépendance des paramètres hydrogéologiques et géotechniques au cours du processus de consolidation qui est simulé.

Ce n'est que dans ces conditions, jointes à une calibration adéquate, que le modèle numérique simulant les subsidences peut être utilisé pour des calculs prédictifs.

Mots clés: cités industrielles, pompages, subsidence, modélisation, modèles couplés.

### Abstract

In the coastal and delta plains situated at the major river mouths, land subsidence phenomena induced by groundwater pumping have been recorded in many important cities. This water is most often necessary for the industrial prosperity of these cities.

Lowering the water pore pressures in the aquifers, the effective stresses are increased in recent low consolidated sediments inducing the compaction process.

Many studies are related in the literature but they are usually limited to general overview based on computations using analytical, empirical or numerical methods, assuming very simplifying hypothesis as homogeneity and/or isotropy of the geological formations. Most often no calibration on historical data is provided and additionally the parameters of flow and consolidation are assumed constant.

A methodology is proposed for more rigorous simulations of these subsidences.

In a first step, a detailed and complete geological study must provide the three-dimensional spatial distribution of the different deposits, each bearing their particular hydrogeological and geotechnical properties. These data form the basic information for the design of the mathematical model.

In a second step, the computer code designed for modelling the coupled problem of groundwater flow and land subsidence, have to include the fact that the flow and the geotechnical parameters are variable and highly interdependent during the simulated consolidation process.

It is only in these conditions, joined to an adequate calibration procedure, that a numerical model simulating the land subsidence processes could be considered for prediction computations.

Key-words: industrial cities, pumping, land subsidence, modelling, coupled model.

### 1. Introduction

A leur embouchure, les fleuves importants forment un delta ou un estuaire. Dans la zone comportant la plaine côtière, le cours inférieur et l'embouchure de grands fleuves, le système de sédimentation est caractérisé par un comportement très dynamique et variable dans le temps et dans l'espace étant influencé par une série de paramètres. Le résultat, du point de vue géologique, consiste en une grande variété de systèmes complexes de sédimentation qu'il est parfois difficile d'investiguer. La charge sédimentaire des fleuves consiste principalement en silt, argiles, et sables fins (Einsie, 1992). Les sédiments sont déposés dans la plupart des cas dans des bassins sédimentaires tous plus ou moins en cours de compaction (Rieke et Chiligarian, 1974).

Près des embouchures, les configurations et dépôts sédimentaires côtiers ont une caractéristique commune: ils sont déposés à proximité ou en dessous du niveau de la mer. Par conséquent, ces sédiments sont initialement peu compactés et à très haut contenu en eau. La compaction intervient ensuite répondant à tout changement de contrainte dû par exemple au poids des sédiments surcombants, à des déformations structurales ou en réponse à la soustraction d'un fluide. La subsidence du sol (l'abaissement de la cote topographique) est le résultat quasi-instantané de ces tassements. Il apparaît cependant que ces processus de subsidence sont largement aggravés par des facteurs anthropiques notamment dans les zones côtières. Le pompage d'eaux souterraines dans le sous-sol peu consolidé des plaines côtières récentes conduit presque inévitablement à la subsidence de la zone. Venise (Italie) est juste un cas particulièrement célèbre. Il existe bien d'autres cas impliquant des zones très peuplées et des métropoles industrielles, comptant des millions d'habitants, situées à une cote égale ou même inférieure au niveau moyen des mers. Citons par exemple, Tianjin (R.P.Chine) avec une subsidence maximum d'environ 2.50 m, Shanghai (R.P.Chine) avec 2.70 m, Bangkok (Thaïlande) avec 1.60 m, Taipei (Taiwan) avec 1.90 m, le sud-ouest de Taiwan avec 2.43 m, certaines zones des polders des Pays-Bas avec 1.5 à 2.0 m, Londres (U.K.) avec 0.35 m, le delta du Pô (Italie) avec 3.2 m, Ravenna (Italie) avec 1.2 m, Tokyo (Japon) avec 4.59 m, New Orleans (U.S.A.) avec 0.8 m, La zone de Houston-Galveston (U.S.A.) avec 2.75 m. ...

A un environnement particulier de dépôt correspond ensuite une formation sédimentaire caractérisée par des propriétés hydrogéologiques et géotechniques bien définies. De plus, les conditions de consolidation normale ou de sur-consolidation peuvent être discutées sur base de l'interprétation du paléo-environnement Quaternaire. Les paramètres hydrogéologiques et géotechniques doivent être déterminés de façon adéquate dans ces formations hétérogènes, en respectant la description géologique en trois dimensions qui en aura été faite au préalable. Une attention particulière est portée aux variations de ces paramètres durant le processus de consolidation et sur la question de savoir comment en tenir compte dans les algorithmes de calcul afin de réaliser des simulations précises sur les cas où suffisamment de données sont disponibles.

## 2. Géologie du Quaternaire aux embouchures des fleuves importants

Un des facteurs importants dans la formation d'accumulations sédimentaires côtières est la variation des niveaux marins. Les rivières peuvent inciser les berges de leur cours inférieur et déposer des grandes quantités de sédiments plus loin sur le 'shelf'. Des deltas peuvent être édifiés et des chenaux fluviaux coupés, subdivisés re-érosés etc... Chaque fleuve répond différemment à un changement de niveau de la mer et possède sa propre évolution influencée par beaucoup de facteurs. L'un d'entre-eux (et pas le moindre) est certainement la charge du fleuve en sédiments et la variation temporelle de cette charge. Si le niveau de la mer monte rapidement en regard de l'apport en sédiment, l'embouchure du fleuve devient un estuaire. Les estuaires piègent non seulement les sédiments fluviaux mais également des sédiments en provenance du système littoral. De plus, les processus hydrodynamiques côtiers et littoraux (vagues, marées, courants côtiers,...) peuvent provoquer des modifications importantes aux embouchures. Les processus côtiers sont les principaux facteurs de redistribution des sédiments (provenant du fleuve, érodés en provenance de la partie sous-marine du delta,...) et créent de cette façon les dépôts sédimentaires côtiers dont on connaît les multiples faciès (Baeteman, 1989).

Dans des sédiments normalement consolidés, l'état de compaction est en équilibre avec la pression des terrains surincombants à chaque profondeur sous l'interface sédiment-eau. Cependant, si un nouvel incrément de sédiment est ajouté au sommet, un nouvel équilibre doit être établi entre la contrainte verticale qui est augmentée et l'état de compaction. Une certaine quantité d'eau doit être expulsée.

Dans un sédiment très perméable, cette expulsion d'eau de pore se réalise simultanément avec l'accroissement de la colonne de sédiment si bien que le sédiment se maintient à un état normal de consolidation. Cette consolidation normale peut être maintenue dans des sédiments à grains fins si le taux de sédimentation est lent et si l'eau de pore a le temps suffisant pour s'échapper. Si par contraste le taux de sédimentation est rapide et que la colonne sédimentaire croît rapidement tout en ayant une faible perméabilité, alors l'eau de pore ne peut être expulsée durant la compaction et donc cette compaction est retardée. Dans ce cas, le sédiment est dans un état de sous-consolidation selon Einsele (1992).

La compaction affecte tous les sédiments mais est plus prononcée dans les sédiments fins comme les silts et les argiles. Les facteurs qui influencent la compaction dans les sables sont essentiellement les formes et classement des particules, ainsi que la profondeur d'enfouissement. Durant la compaction, les grains de sable 'shifflent', tendant à former des arrangements qui font en sorte que le sédiment devient plus dense et que la porosité décroît.

Les sables mal triés sont plus compressibles que ceux qui sont bien triés. La tourbe est le plus compressible de tous les sédiments naturels à cause de sa très grande porosité et de la faiblesse de son squelette formé de fibres végétales. Dans certaines conditions, la tourbe peut même se compacter

sous son propre poids; ce processus est appelé auto-compaction. La tourbe présente une rapide réduction de la perméabilité avec le changement de volume tout comme les argiles.

## 3. Les caractéristiques des sédiments et la séquence stratigraphique

Concernant les propriétés géotechniques conditionnant la compaction, une distinction fondamentale doit être faite en ce qui concerne la genèse des dépôts envisagés. Les sédiments dont l'origine est "sub-aérienne" sont plus consolidés que ceux déposés dans des conditions submergées ou sous-marines. Dans le système fluvial, une distinction est à faire entre d'une part, les plaines d'inondation et les dépôts de berge qui ont une origine sub-aérienne et d'autre part, les chenaux et les traces de surfaces deltaïques qui ont été formés en conditions submergées (Russett, 1967). Ces derniers corps sédimentaires sont très compressibles. A cause de leur dépôt au-dessus du niveau d'eau, les sédiments des plaines d'inondation sont d'habitude surconsolidés et, dans la séquence sédimentaire, ils forment des niveaux plus cohérents.

Au vu des nombreux facteurs interagissant et contribuant à la séquence finale de dépôts sédimentologiques, il est évident que la succession verticale qui résulte de ces dépôts est caractérisée par des changements fréquents de faciès latéraux et verticaux. Il est clair que les investigations ayant pour but la recherche des caractéristiques de ces dépôts conditionnant la compaction, doivent être réalisées en prenant en compte l'aspect tridimensionnel de cette géométrie des différents faciès. A chaque faciès particulier correspondent des propriétés géotechniques et hydrogéologiques à définir avec précision, même si ces dernières sont également dépendantes des conditions (contraintes, état de saturation, ...) qui peuvent avoir changé ultérieurement. Cependant, pour établir la géométrie de ces différents faciès dans le corps sédimentaire d'une plaine côtière, cela demande une quantité énorme de données. Il est évident qu'au plus de données nous disposons, au plus précise peut être la description de la géométrie de ces formations sédimentaires.

En vue d'obtenir une image en trois dimensions de la répartition spatiale complexe des dépôts sédimentaires, chaque résultat de forage et chaque prélèvement doivent être interprétés dans le contexte géologique et sédimentologique. Les différentes unités distinguées à partir des résultats de ces forages doivent être corrélées; remplir les blancs entre les points de données est évidemment la partie la plus difficile de l'interprétation! La corrélation de ces données de forage demande évidemment la parfaite compréhension de tous les facteurs et processus relevant de la formation de ces corps sédimentaires.

Des coupes verticales détaillées doivent être tracées et impliquer que toutes les données disponibles soient utilisées. En faisant de la sorte, la synthèse des données nous apporte des informations sur les événements géologiques. Une fois ceux-ci identifiés, les processus de développement des plaines côtières dans l'espace et dans le temps peuvent être considérés avec précision et il nous est possible de juger si nous disposons d'un bon enregistrement des données géologiques dans la zone étudiée.

#### 4. Processus de subsidence régionale due aux pompages souterrains

Les sédiments jeunes, peu ou semi-consolidés, déposés dans des environnements alluviaux ou marins de faible profondeur, forment souvent une succession de couches qui peut être caractérisée (d'un point de vue hydrogéologique) comme un "système à aquifères captifs ou semi-captifs" (Poland, 1984). Ces systèmes d'aquifères consistent lithologiquement en une alternance de couches de sables silteux, de sables très perméables et de couches argileuses nommées aquitards caractérisés par leurs faibles perméabilités et leurs importantes compressibilités.

Selon le principe de Terzaghi (1942), la pression géostatique ou contrainte totale ( $G$ ) qui règne dans le sol est habituellement considérée comme le résultat de deux composantes: la pression de pore du fluide ( $p$ ) et la contrainte effective ( $\sigma'$ ). Ce principe est suffisamment précis pour les calculs de tassements totaux; en effet les compressibilités des sols sont un facteur 20 à un facteur 1000 plus importantes que la compressibilité des grains pris seuls, si bien qu'il serait particulièrement difficile et sans intérêt de choisir un autre principe basé, par exemple, sur les théories de Biot (1956).

On peut exprimer de façon très simple le nouvel état de contrainte créé par l'abaissement des niveaux piézométriques dans un aquifère captif. Pour une pression de pore initiale considérée en parfait équilibre, la pression est rapidement diminuée dans l'aquifère et particulièrement diminuée dans les aquitards sur-incombant et sous-incombant. A ce moment, la contrainte totale peut aisément être supposée constante car les terrains sont maintenus saturés par le fait de la recharge par le dessus ou par la très lente propagation des dépressions à travers les aquitards. Par conséquent, la propagation lente des variations de pression d'eau dans les terrains semi-perméables induit automatiquement une augmentation équivalente de la contrainte effective dans ces mêmes couches compressibles et une consolidation drainée est démarrée. La seconde étape est distinguée dans le long terme quand la diminution de pression de pore a atteint le sommet de la couche confinante (aquitard) et peut donc provoquer, comme pour les situations de nappe libre, une diminution de l'épaisseur de la colonne de terrains saturés. La contrainte totale ne peut alors plus être considérée comme constante, excepté si une importante infiltration ou recharge est réalisée. Le caractère transitoire de ce phénomène est très important à cause du fait que la consolidation est activée par la diminution de la pression d'eau tant que l'équilibre hydrostatique n'est pas restauré (consolidation primaire).

Les propriétés géomécaniques des sols peuvent être idéalisées en terme de modèles rhéologiques. La déformation du squelette du sol sous des contraintes effectives qui augmentent est supposée suivre des lois élastiques, plastiques et/ou viscoélastiques ou rimplote quelle combinaison bien étudiée de celles-ci. Les sols argileux et les sédiments meubles ont des caractéristiques géomécaniques qualifiées le plus souvent d'élastiques non linéaires avec mises en

plasticité et en viscosité progressives. Ces propriétés particulières amènent, en pratique, à choisir des modèles basés sur des lois expérimentales plutôt que sur des combinaisons de modèles rhéologiques théoriques. Des lois élasto-visco-plastiques à une ou trois dimensions peuvent être établies et paramétrées sur base de résultats expérimentaux (essais 1D oedométriques, essais 3D triaxiaux...). Les différents paliers de charge, plus ou moins élaborés, peuvent être appliqués à des échantillons en vue de paramétriser cette loi expérimentale. Souvent, les lois constitutives ainsi établies, permettent une introduction plus facile des effets non linéaires et des interactions entre paramètres.

#### 5. Variation des coefficients de perméabilité et d'emmagasinement spécifique au cours de la consolidation

Les géotechniciens ont depuis longtemps eu le soin de considérer que durant la consolidation d'argiles très compressibles, les changements de la porosité dus aux réarrangements du squelette du sol peuvent amener à des diminutions de la perméabilité et de la compressibilité du milieu poreux étudié. Lambe et Whitman (1969) ont présenté des données indiquant que la perméabilité peut changer de plusieurs ordres de grandeur et que la compressibilité peut diminuer de façon significative lorsque l'indice des vides diminue. Aucune de ces variations n'est linéaire.

##### (a) Coefficient d'emmagasinement spécifique

Il est bien connu qu'en négligeant la compressibilité du fluide et des grains solides, le coefficient d'emmagasinement spécifique ( $S_e$ ) d'un aquifère captif peut être écrit en fonction du coefficient de compressibilité volumétrique ( $\alpha$ ) du milieu poreux (Bear et Vernuijt, 1987):

$$S_e = p \cdot g \cdot \alpha \quad (1)$$

où ( $p \cdot g$ ) est la densité de l'eau (fluide). La compressibilité n'est pas une constante: elle dépend de  $\sigma'$  et de la contrainte effective de préconsolidation ( $\sigma'_{préc}$ ). A partir de résultats classiques de tests oedométriques sur des échantillons de terrains meubles, cette dernière relation peut être linéarisée (figure 1.a) en utilisant les constantes A (constante de gonflement) et B (constante de compression). La compressibilité volumétrique du milieu poreux et donc le coefficient d'emmagasinement spécifique peuvent donc être exprimés en fonction de  $1/\sigma'$  (figure 1.b):

$$\begin{cases} \alpha(\sigma') = 1/(A \cdot \sigma') & \text{if } \sigma' \leq \sigma'_{préc} \\ \alpha(\sigma') = 1/(C \cdot \sigma') & \text{if } \sigma' > \sigma'_{préc} \end{cases} \quad (2)$$

(b) Coefficient de perméabilité

Pour des formations siliceuses et argileuses, le coefficient de perméabilité est le plus souvent mesuré durant des essais de consolidation (des essais oedométriques ou triaxiaux). La perméabilité est obtenue à différents niveaux de charge et de contrainte effective, menant à une relation avec l'indice des vides ( $e$ ) :  $K = f(e)$ .

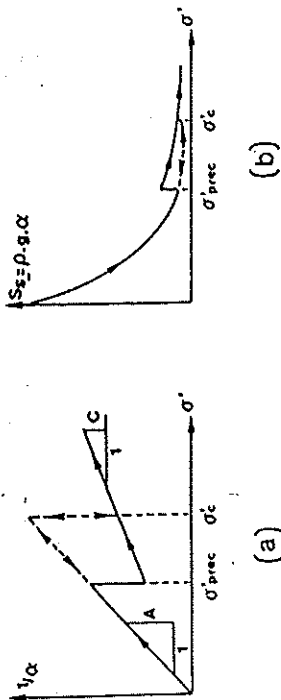


Figure 1 : l'inverse de la compressibilité volumétrique (a), et le coefficient d'emmagasinement spécifique (b), exprimés en fonction de la contrainte effective

De nombreuses relations liant le coefficient de perméabilité  $K$  à la porosité totale ou à l'indice des vides ont été proposées par des ingénieurs pétroliers, dans le but d'interpréter les logs de porosité en termes de perméabilité des réservoirs. Ces relations ne sont en général pas applicables en consolidation et en calcul de subsidence. Elles sont en effet le plus souvent relatives à des roches indurées plutôt qu'à des sédiments meubles et à des sols.

Dans le cas de sédiments récents d'estuaire, nous cherchons des relations prouvées expérimentalement, liant la perméabilité à l'indice des vides ou à la porosité, dans des milieux poreux saturés caractérisés généralement par un très haut contenu en argile et en tourbe et par de fortes compressibilités et de faibles perméabilités.

Les difficultés rencontrées en établissant ce type de relation sont principalement dues aux nombreux paramètres interagissant dans la valeur de la perméabilité des sédiments meubles: (1) la lithologie, (2) la taille des grains, (3) les formes des grains, (4) les orientations et les surfaces spécifiques des grains et (5) la distribution spatiale des pores. L'évolution micro-structurale des argiles durant la consolidation, orientant les feuillets argileux de façon plus orthogonale à la direction de la contrainte effective principale appliquée, développe une anisotropie structurale. Cette évolution tend à augmenter la tomuosité des

canaux d'écoulement si l'écoulement est parallèle à cette contrainte principale verticale.

De façon plus générale, on observe une diminution du coefficient de perméabilité avec la diminution de l'indice des vides. Il peut être intéressant de linéariser cette relation dans un diagramme  $(\log K, e)$  en utilisant deux constantes qui peuvent alors être déterminées expérimentalement (Haghighi, 1983 et Magnan, 1986) :  $C_{K_1}$  et  $C_{K_2}$ . On obtient alors une analogie intéressante (dans le formalisme utilisé) avec les diagrammes oedométriques.

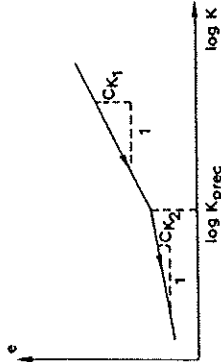


Figure 2 : Diagramme  $(\log K, e)$  très similaire au diagramme classique  $(\log \sigma', e)$  de l'essai oedométrique.

6.Exemple: calcul des subsidences régionales à Shanghai

Le lecteur tout particulièrement intéressé par ce cas d'étude peut trouver plus de détails dans les références suivantes : Baeteman (1989) pour l'analyse de la Géologie du Quaternaire, Dassargues et al. (1991) au sujet de la préparation des données hydrogéologiques et géotechniques, Dassargues et Li (1991) pour un résumé des aspects de la modélisation. De plus, le Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur (A.I.G.I.), a publié récemment un groupe de cinq publications décrivant entièrement le cas d'étude.

Lors de simulations écoulement-tassement couplées, Rudolph et Frind (1991) ont montré que pour une variation de la pression de pore imposée à l'aval d'une colonne argileuse, il faut plus de temps avant d'atteindre des conditions d'écoulement permanent lorsque on utilise des paramètres variables qu'avec des paramètres constants. Ces conclusions sont vérifiées dans tous les cas, si les valeurs des coefficients de perméabilité et d'emmagasinement spécifique sont identiques au départ des deux types de calcul.

7. Conclusions

Des considérations théoriques qui précèdent et du cas d'étude de Shanghai, nous pouvons tirer les enseignements suivants :

(1) Une densité suffisante de données est un préalable indispensable à une étude détaillée des conditions géologiques, qui est elle-même indispensable à la délimitation et à la caractérisation si possible en trois dimensions des différents horizons. De nombreux points de mesures répartis régulièrement sont nécessaires pour pouvoir définir au mieux la géométrie 3D du modèle écoulé dont la structure peut rarement être considérée comme un empilement de couches horizontales.

Comme exemple, à Shanghai, aux 35 forages carottés avec prélèvements d'échantillons remaniés, se sont ajoutés de nombreux points d'informations (puits loggés par diagraphies, C.P.T., piezomètres, etc...) pour totaliser une centaine de points, régulièrement répartis dans la zone d'étude d'environ 120 km<sup>2</sup>. Les échantillons non-remaniés prélevés dans tous les horizons géologiques et tout particulièrement dans les couches compressibles, doivent être très nombreux, afin de permettre les essais de consolidation en laboratoire qui permettront la détermination des paramètres du modèle écoulé-tassement 1D. A Shanghai, les colonnes retenues pour le calcul des tassements, l'ont été sur base d'un nombre minimum de 15 à 20 échantillons non-remaniés, pour lesquels les essais fournissaient les paramètres caractérisant les couches compressibles.

Des données historiques et actuelles, concernant les pompages/reinjections ainsi que les mesures des hauteurs piezométriques et des subsidences sont essentielles pour déterminer avec précision les sollicitations du système et d'autre part pour assurer une calibration suffisante du modèle en vue de permettre des simulations prévisionnelles. Souvent, à ce niveau, les données ne sont malheureusement que fragmentaires. A Shanghai, les nombreuses mesures piezométriques ont permis une calibration précise du modèle écoulé-tassement 3D, malgré quelques imprécisions subsistant sur les pompages réels effectués entre 1920 et 1950. Les mesures historiques de la subsidence depuis 1920 en nombre toujours trop restreint, n'ont pas permis une calibration très détaillée du modèle écoulé-tassement.

(2) La précision complémentaire que l'on obtiendrait par un modèle écoulé-tassement 3D serait sans doute dérisoire par rapport aux imprécisions (citées plus haut) venant de la paramétrisation et de la calibration.

De plus, le nombre très important d'éléments finis, nécessité par la discrétisation 3D des couches compressibles, ajouté à l'augmentation du nombre des degrés de libertés, joint au couplage et à la non linéarité des paramètres, constituerait un système énorme consommant un temps C.P.U. très important pour un gain de précision dérisoire.

Par conséquent, au vu des données dont on dispose habituellement, l'approche présentée ci-dessus (utilisée pour le cas de Shanghai) constitue à nos yeux le meilleur compromis :

12. Modélisation Couplée et Non Linéaire de la Subsidence

Par conséquent et en vertu du principe de Terzaghi, il est normal que les principales différences dans les tassements calculés soient induites par les différences dans les répartitions calculées des pressions de pores.

De plus, même avec des pressions de pores prises rigoureusement identiques, il a été démontré (Dassargues, 1991) que les subsidences calculées avec des simulations utilisant des lois de consolidation à paramètres constants, seront systématiquement surestimées par rapport à celles calculées en utilisant des lois à paramètres variables (si les paramètres initiaux sont pris identiques dans les deux cas).

Dans le cas d'étude de la subsidence de Shanghai, les résultats finaux (exemple à la figure 3), montrent clairement les imprécisions des résultats calculés avec des modèles qui négligent la variation des paramètres dans les calculs d'écoulements couplés aux compactions.

Dans le cas de l'étude de Shanghai, les calculs ont été réalisés en utilisant la méthode des éléments finis; les simulations sont basées sur un modèle d'écoulement en trois dimensions de toute la zone, couplé à 32 colonnes d'éléments unidimensionnels intégrant la variation non linéaire des paramètres. Ces colonnes sont situées aux endroits où des mesures précises des paramètres géomécaniques étaient disponibles. Des calibrations soigneuses des modèles hydrogéologiques et géotechniques ont pu être menées à bien et finalement des prédictions quant aux subsidences futures ont pu être réalisées jusqu'à l'an 2000 pour des conditions de pompage (pratiqué en été) égales à 1,3 x la reinjection (pratiquée en hiver) dans les aquifères.

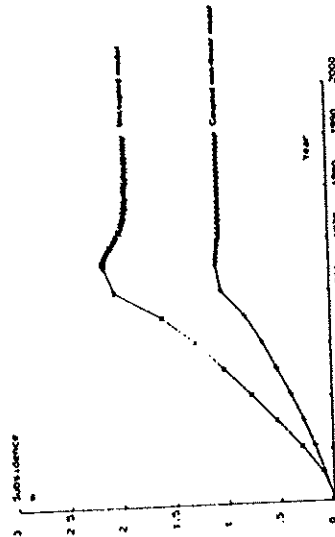


Figure 3 : Subsidence totale depuis 1920 calculée au droit d'une colonne du cas d'étude de Shanghai. La simulation négligeant les variations de la perméabilité et de l'emmagasinement spécifique durant le processus de consolidation amène à des surestimations de la subsidence de près de 100 % à cet endroit (d'après Dassargues, 1991).

11. Modélisation Couplée et Non Linéaire de la Subsidence

- un modèle écoulement 3D,  
 - un modèle écoulement-tassement 1D dont les conditions de pression aux frontières des couches compressibles sont fournies par le modèle écoulement 3D, après chaque pas de temps.

Les conditions aux frontières du modèle écoulement 3D doivent être choisies telles qu'elles n'influencent pas ou peu les résultats de la simulation. Elles doivent donc être situées à distance suffisante par rapport à la zone où sont imposées les sollicitations. Ceci peut nécessiter la discrétisation d'éléments fins de grandes tailles en bordure de la zone étudiée afin de reporter les conditions aux frontières plus loin. L'emploi d'éléments frontiers (demi-infinis) pourrait être envisagé.

(3) Le couplage écoulement-tassement provoquant la non linéarité du coefficient d'emmagasinement spécifique et d'autre part la prise en compte de la non linéarité du coefficient de perméabilité sont indispensables pour la bonne représentation des processus en cours lors de la consolidation. Le choix d'un couplage basé sur une loi expérimentale de consolidation comme la loi oedométrique, paraît plus opportun que de se fier à une loi purement théorique.

La loi élasto-plastique de l'essai oedométrique, adoptée pour l'étude de Shanghai pourrait être complétée, par l'ajout d'une composante de déformation visqueuse (à paramétriser), de manière à constituer un modèle élasto-visco-plastique.

Le choix de la loi de non linéarité de la perméabilité peut être plus délicat. Les propositions sont multiples et l'idéal consiste à trouver une loi reproduisant, avec le plus de fidélité le comportement des terrains étudiés. A notre sens, ce choix doit être essentiellement guidé par les données dont on dispose, afin d'adapter au mieux les coefficients ou paramètres pour qu'ils soient réellement caractéristiques des propriétés des couches et sous-couches rencontrées.

#### Remerciements

Le code utilisant la méthode des Éléments Finis est le programme LAGAMINE développé au M.S.M. de l'Université de Liège. Tous nos remerciements vont à cette équipe pour les développements numériques qu'ils ont bien voulu intégrer au programme afin de réaliser les simulations dont certains résultats sont présentés ici.

Tous nos remerciements vont également à la société IBM Belgium pour le soutien qu'elle nous accorde actuellement au niveau des équipements informatiques.

#### Références

- Baeteman, C., 1989, *The Upper Quaternary Deposits of the Changjiang Coastal Plain-Shanghai area*, Belgian Geological Survey Report, 155 p.
- Bear, J. and Verruitt, A., 1987, *Modelling groundwater flow and pollution*, 415p., Keldel Publication Company.
- Biot, M.A., 1956, General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material, *J. Applied Mechanics*, Trans. ASME, 23, pp. 91-96.
- Dassargues, A., 1991, *Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains. Couplages et non linéarités*, PhD Thesis in Applied Sciences, University of Liège, unpublished.
- Dassargues, A., Biver, P. and Monjoie, A., 1991, Geotechnical properties of the Quaternary sediments in Shanghai, *Engineering Geology*, 31, pp. 71-90.
- Dassargues, A. and Li, X. L., 1991, Computing the land subsidence of Shanghai by finite element method, Proc. 4th Int. Symp. on Land Subsidence, LAHS Publ. No 200, pp.613-624.
- Einsels, G., 1992, *Sedimentary Basins*, Springer-Verlag, Berlin.
- Friedman, G. and Sanders, J., 1978, *Principles of Sedimentology*, John Wiley & Sons, New York.
- Haghighi, M., 1983, *Etude du comportement d'un remblai expérimental sur sols compressibles*, Thèse de docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 137p.
- Lambe, T.W., and Whitman, R.V., 1969, *Soil Mechanics*, John Wiley, New-York.
- Magnan, J.P., 1986, *Modélisation numérique du comportement des argiles molles naturelles*, rapport LPC n° 141, Paris.
- Poland, J.F., 1984, Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, Studies and report in Hydrology, No.40, Unesco.
- Rietke, H., H., and Chilingarian, G.V., 1974, *Compaction of argillaceous sediments*, Elsevier, Amsterdam.
- Rudolph, D.L., and Frind, E.O., 1991, Hydraulic response of highly compressible aquifers during consolidation, *Water Resources Research*, 27(1), pp. 17-30.
- Russell, R., 1967, Origins of Estuaries, in: G.H. Lauff (ed.), Estuaries, Amer. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, Washington DC, pp. 93-99.
- Terzaghi, K., 1943, *Theoretical soil mechanics*, Chapman and Hall, London.