

VERS UNE MEILLEURE FIABILITE DANS LE CALCUL DES TASSEMENTS DUS AUX POMPAGES D'EAU SOUTERRAINE DEUXIEME PARTIE :

MODELISATION NON LINEAIRE DE LA SUBSIDENCE DE LA VILLE DE SHANGHAI

Alain DASSARGUES¹

(16 figures & 4 tableaux)

*1. Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique (L.G.I.H.),
Université de Liège, B-19, Sart-Tilman, B-4000 Liège, Belgique.*

RESUME. Le calcul précis de la subsidence de Shanghai a été réalisé par simulation numérique. Cette subsidence, due au pompage d'eau souterraine depuis 1920, a atteint en moyenne 2,5 mètres. Depuis 1962, la réinjection dans l'aquifère principal durant les hivers a contribué à freiner le processus. La zone d'étude est limitée à la partie centrale de Shanghai et aux 70 mètres supérieurs des sédiments meubles. La géologie du Quaternaire, la géologie de l'ingénieur et l'hydrogéologie ont été synthétisées avec soin. Un code utilisant la Méthode des Eléments Finis (F.E.M.) a été choisi pour le calcul. Permettant une discrétisation spatiale très précise, il peut de la sorte prendre en compte les hétérogénéités et les variations de faciès des différentes couches. La simulation a comporté un modèle d'écoulement à 3 dimensions fournissant les valeurs et la répartition des pressions d'eau à chaque pas de temps. Ensuite, un modèle écoulement-tassement non linéaire a permis de calculer la subsidence en fonction du temps, en prenant les variations de pressions des aquifères comme sollicitations. L'influence du couplage et de la variation des paramètres sur les résultats du modèle est illustrée. Des conclusions sont tirées et une procédure idéale pour le calcul des subsidences est proposée.

MOTS-CLES: subsidence, modélisation, Shanghai.

ABSTRACT. Improvement of reliability in computations of the compaction due to groundwater withdrawal: non linear modelling of the subsidence of Shanghai. An accurate simulation of the subsidence of Shanghai has been performed. The subsidence, caused by groundwater pumping since 1920, reached approximately 2.5 meters. Since 1962, the recharge of the aquifer during winters has contributed to decelerate the process. The study area is limited to the central zone of Shanghai and to the upper 70 meters of loose sediments. The Quaternary geology, engineering geology and hydrogeology aspects have been examined in detail. A Finite Element Method (F.E.M.) code has been chosen for the subsidence computations. Allowing a very accurate spatial differentiation, it can take into account heterogeneities and facies variations of the layers. The simulation comprised a 3D flow model giving, as results, the values and spatial distributions of the water pressures at each time step. Secondly, a coupled non linear flow-compaction model computed subsidence as a function of time, taking the pressure variations in the aquifers as stress data. The influence on the results of the coupling and of the variation parameters is shown. Conclusions are deduced from the discussion and a standard procedure of computation is proposed to calculate the subsidences with accuracy.

KEYWORDS: subsidence, modelling, Shanghai.

1. INTRODUCTION

La ville de Shanghai est située à 70 km environ de la côte, dans la vaste plaine côtière limitée par la Mer de Chine orientale et le Yangtsé. Elle est traversée du Sud au Nord-Est, par le fleuve Huang-Pu de 300 à 500 mètres de large, et de l'Ouest jusqu'à celui-ci par son affluent le Suzhou Creek de 40 à 60 mètres de large. Le Huang-Pu se jette dans le Yangtsé, 15 km plus au Nord (figure 1).

Le sous-sol de la région est constitué de dépôts sédimentaires récents, montrant différentes caractéristiques dépendantes du système estuarien qui précède à l'embouchure du Yangtsé en Mer de Chine. Il est composé de terrains meubles sablo-silto-argileux, peu consolidés sur des épaisseurs d'environ 300 m, reposant sur un bed-rock induré.

Depuis 1920, les couches sableuses peu profondes sont exploitées par des pompes d'eau souterraine. Le principal aquifère sollicité est une formation de sables fins dont le toit est situé à environ 70 m de profondeur, sous des terrains semi-perméables argileux, peu consolidés et au contenu important en matières organiques (figure 2). Ces derniers sont donc compressibles et les baisses de pression interstitielle ont provoqué, depuis 1920, des tassements totaux mesurés en surface de l'ordre de 1.5 à 3.0 m. Le taux annuel maximum de subsidence a été atteint entre 1956 et 1959 avec environ 98 mm/an. Depuis 1962, des réinjections d'eau en hiver, utilisant les mêmes puits que pour le pompage de l'été, ont contribué à freiner l'évolution des tassements mais une subsidence annuelle d'environ 3 mm/an est encore enregistrée actuellement (Monjoie, 1991).

Une étude scientifique menée conjointement par le Bureau de Géologie de Shanghai, le Service Géologique de Belgique et les L.G.I.H. de l'Université de Liège, financée par le S.P.P.S. (Service de Programmation et de la Politique Scientifique) en Belgique et le Ministère de la Géologie en Chine, a permis d'aborder les aspects sédimentologiques, hydrogéologiques et géotechniques. A la suite de quoi, un modèle écoulement-tassement couplé et non linéaire, de la subsidence de Shanghai a été réalisé à l'Université de Liège par les L.G.I.H., associés au département M.S.M..

2. CONDITIONS GEOLOGIQUES, HYDROGEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES

2.1. GEOLOGIE, SEDIMENTOLOGIE

(d'après Baeteman, 1989)

La plaine côtière du Yangtsé est une zone où les processus de sédimentation, dominés par l'influence des courants marins côtiers, ont prévalu durant tout le Quaternaire. Le déplacement, au cours du temps,

de l'emplacement de l'estuaire du fleuve a contribué au dépôt de séquences de diverses couches argilo-sableuses intercalées (Baeteman et Dassargues, 1992).

Le même type de conditions estuariennes de sédimentation est rencontré au même endroit durant diverses transgressions marines, déposant par conséquent le même type de sédiments.

Toutes les corrélations et interprétations géologiques qui suivent, sont basées sur des observations provenant de forages carottés, de diagraphies (γ -ray, γ - γ et neutron-neutron) ou de C.P.T (Cone Penetration Test). Des coupes lithologiques du type de celles reprises à la figure 2 ont été tracées. Il y apparaît que les dépôts du Pléistocène supérieur sont caractéristiques d'une transition d'un environnement estuarien à un environnement sédimentologique fluvial.

Le sommet de la couche sableuse qui est le principal aquifère exploité, appelé *2ème aquifère (2A)*, est situé à environ 70 m de profondeur; cette couche a été déposée en conditions estuariennes. Elle est surmontée par une couche argileuse compressible, montrant des caractéristiques de conditions sédimentologiques subtidales ou intertidales; elle est appelée *3ème couche compressible (3C)*. La dernière entité déposée en environnement estuarien est à nouveau composée de sables graduellement remplacés par des silts et des sables fluviaux; cette couche est appelée *1er aquifère (1A)*.

Dans la partie Sud de la zone étudiée, les *1er et 2ème aquifères* sont en connexion vu l'absence de la *3ème couche compressible* à cet endroit. La fin de la séquence fluviale est marquée par l'apparition d'un bassin d'inondation argileux conjugué à un niveau marin bas. Ce niveau argileux, connu sous le nom de "*Dark Green Stiff Clay*" (*D.G.S.C.*) se différencie des autres couches par de bonnes caractéristiques géotechniques associées à la surconsolidation qu'il a subi notamment par désaturation complète. A certains endroits, ce niveau est absent; deux raisons peuvent l'expliquer (toujours d'après Baeteman, 1989): (a) lors du dernier déplacement latéral du Yangtsé, un dernier bassin d'inondation n'a pas eu le temps d'être formé à l'endroit occupé précédemment par le fleuve; (b) au début de l'Holocène, les nouvelles conditions climatiques ont provoqué l'érosion par le fleuve de sa plaine inondable.

Durant l'Holocène, un environnement à nouveau estuarien a provoqué le dépôt d'argiles silteuses:

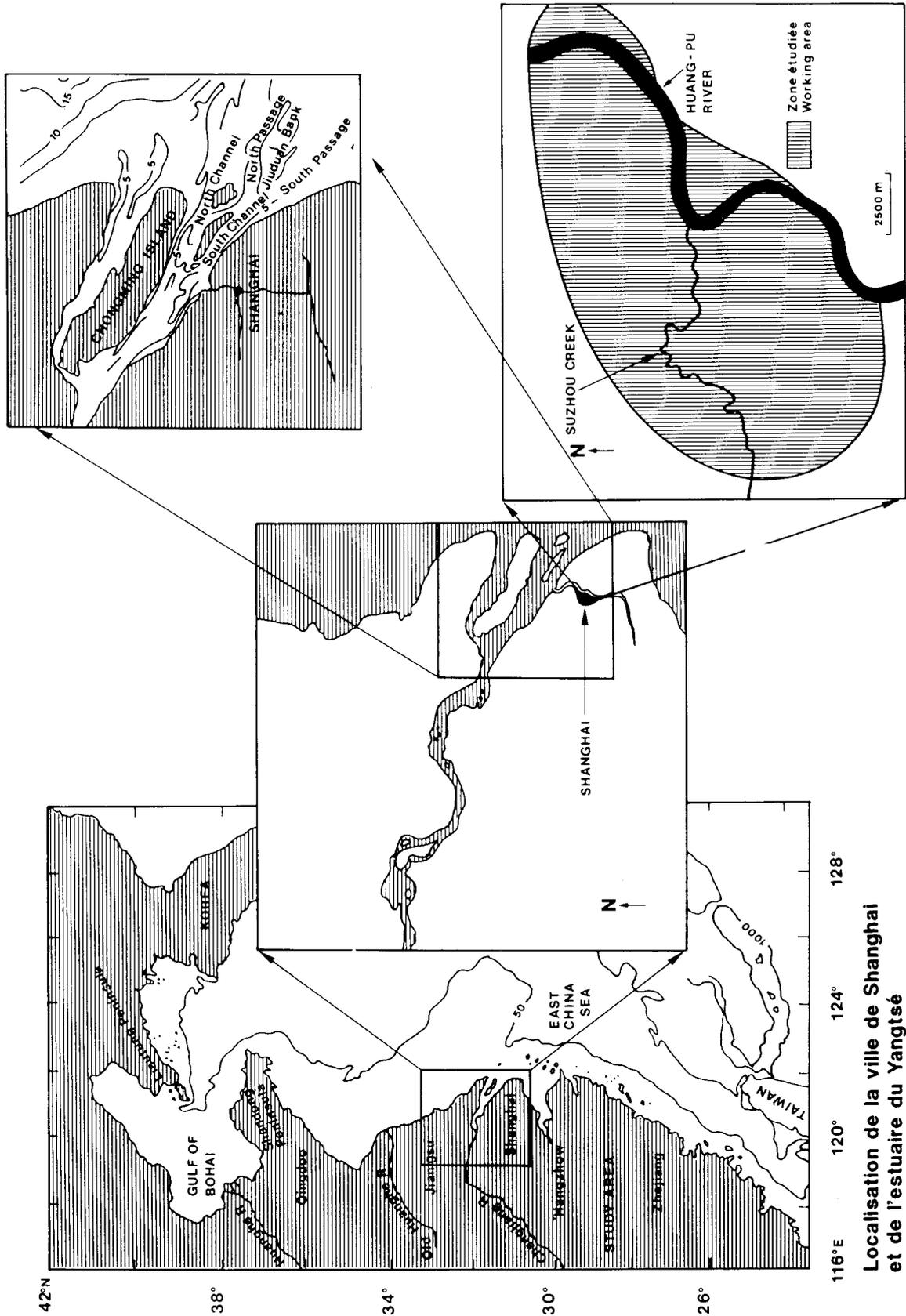


Figure 1 : Localisation de la ville de Shanghai et de l'estuaire du Yangtsé

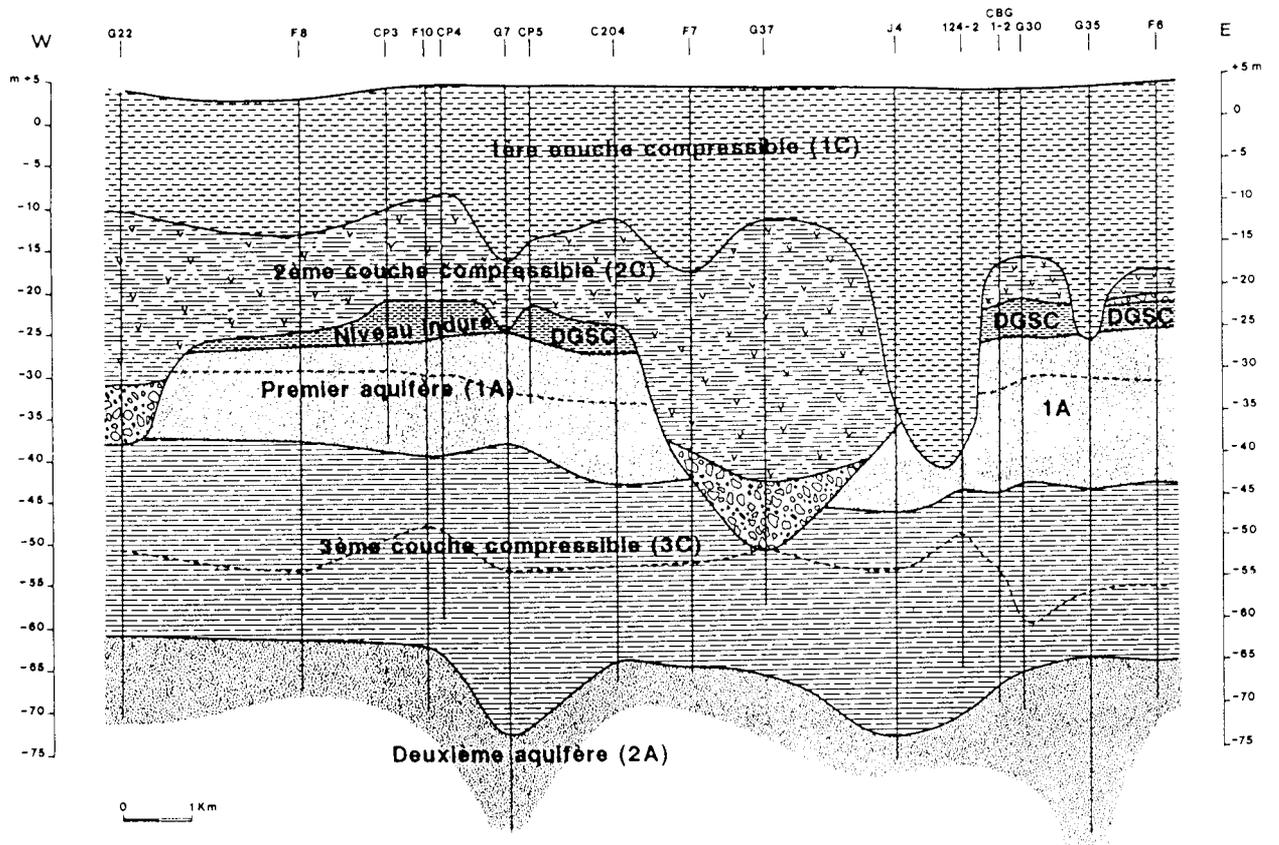


Figure 2a.: Coupe verticale Ouest-Est à Shanghai (d'après Baeteman, 1989)

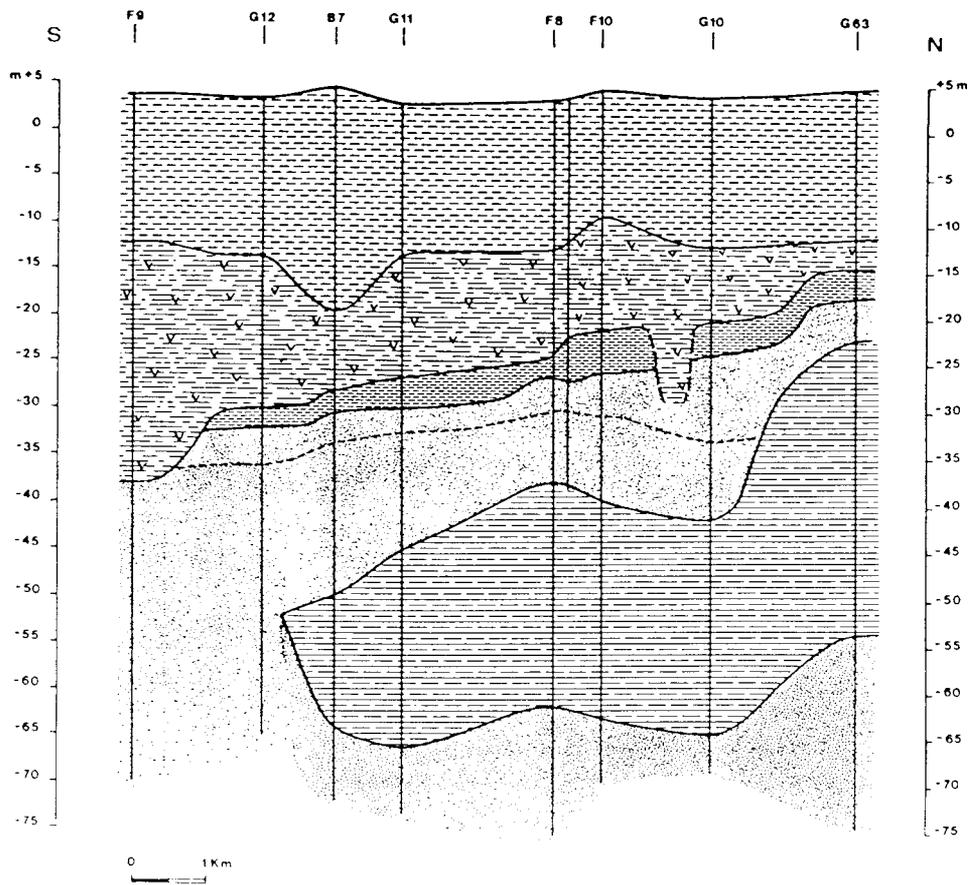


Figure 2b : Coupe verticale Sud-Nord à Shanghai, montrant la connexion entre les premier et deuxième aquifères dans la zone Sud (d'après Baeteman, 1989)

- dépôts supratidaux correspondant à la 2ème couche compressible (2C);

- dépôts de sliikke correspondant à la 1ère couche compressible (1C). Ces dépôts sont très compressibles et boueux;

- à certains endroits, des lentilles silto-sableuses complètement incluses dans la 1ère couche compressible correspondant à ce que l'on appelle l'aquifère phréatique, en liaison directe avec le Huang-Pu.

2.2. HYDROGEOLOGIE

Depuis 1920 jusqu'en 1962, la quantité d'eau pompée dans les aquifères captifs n'a cessé d'augmenter. Les débits totaux annuels, répartis entre les différents puits de pompage, constituent la principale sollicitation du modèle de simulation. A partir de 1962, de fortes restrictions ont été imposées aux consommateurs d'eau et des réinjections sont effectuées en hiver. Les quantités réinjectées et pompées sont connues sur une base semestrielle de 1962 à 1975 et mensuelle après 1975. A partir de 1971, la réalimentation est supérieure à la quantité pompée.

La situation initiale peut être supposée en équilibre (Su, 1984) avec des niveaux piézométriques correspondant à la surface du sol (l'ensemble des terrains sont saturés et la répartition des pressions interstitielles est hydrostatique). L'aquifère phréatique n'est pas exploité; il est en connexion avec le Huang Pu mais pas avec les 1er et 2èmes aquifères. On peut donc en déduire que le pompage intensif dans le 2ème aquifère, provoque les effets suivants:

(1) des baisses de pressions interstitielles quasi immédiates dans le 1er aquifère puisque celui-ci est à certains endroits en connexion avec le 2ème aquifère (ceci a été confirmé par les mesures piézométriques);

(2) des baisses de pressions différées dans les 1ère, 2ème et 3ème couches compressibles et le D.G.S.C.;

(3) une infiltration, relativement faible, en provenance de l'aquifère phréatique et du Huang Pu, maintenant de ce fait la saturation de l'ensemble des terrains.

Les deux premiers effets peuvent être déduits de l'application de la solution analytique de Fourier à la propagation d'une variation de pression en milieu poreux saturé (cfr. précédemment).

De plus, la situation initiale et la saturation permanente des terrains par l'infiltration permettent de travailler en utilisant l'hypothèse d'une contrainte totale constante (cfr. précédemment) et en appliquant le principe de Terzaghi, on a :

$$dp = -d\sigma'$$

dp = variation temporelle de la pression d'eau

$d\sigma'$ = variation temporelle de la contrainte effective (grain-à-grain)

Des cartes piézométriques relatives au 2ème aquifère donnent l'ampleur des variations de pression. Elles seront utilisées comme base de comparaison pour la calibration du modèle d'écoulement.

Les paramètres hydrodynamiques du 2ème aquifère ont été déterminés par des essais de pompage :

$$* 1.0 \cdot 10^{-4} < K < 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s pour la perméabilité}$$

$$* 1.0 \cdot 10^{-6} < S_s < 2.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ pour le coefficient d'emmagasinement spécifique}$$

Les paramètres K et S_s des couches compressibles et du D.G.S.C. ont été déterminées essentiellement à partir d'essais géotechniques.

2.3. CONDITIONS GEOTECHNIQUES

Les résultats des essais géotechniques in situ tels que les C.P.T. ont été intégrés aux autres données (diagraphies, carottes etc ...) afin de repérer au mieux la géométrie 3D des différentes couches (figures 5 et 6).

De très nombreux essais de laboratoire, comprenant environ 450 essais d'identification standards, ont fourni: teneurs en eau naturelle, limites d'Atterberg, poids spécifiques, granulométries, porosités, indices des vides. Les diagrammes de plasticité repris à la figure 3 montrent que la 1ère couche compressible est l'horizon le plus "plastique".

Des essais triaxiaux de compression (consolidés, non-drainés) et des essais de cisaillement ont été réalisés sur des échantillons non remaniés provenant des différents horizons semi-perméables. Des diagrammes reprenant les courbes enveloppes des points de rupture de Mohr-Coulomb et de résistance au cisaillement en ont été déduits.

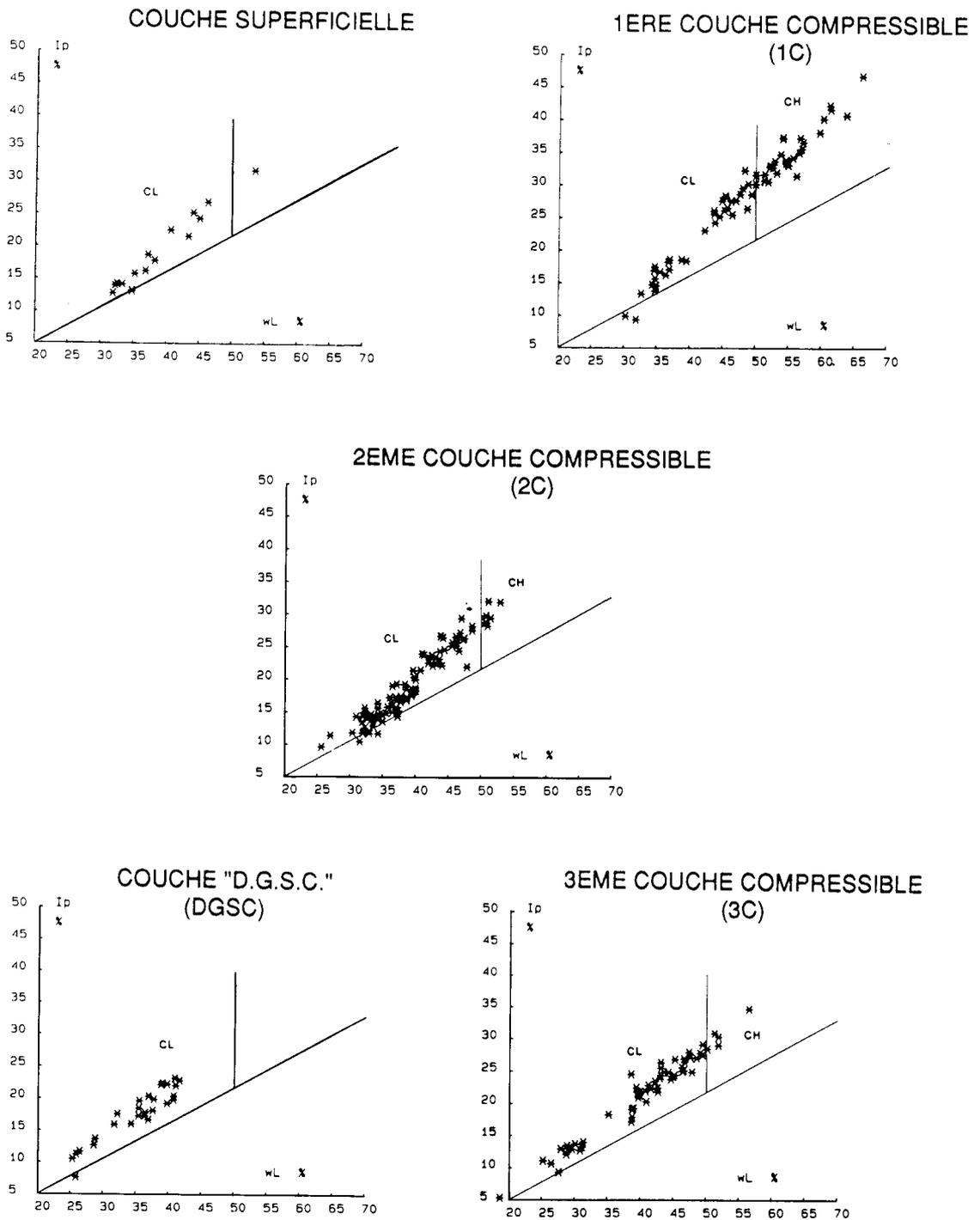


Figure 3. Diagrammes de plasticité: CL=argile peu plastique (Clay of Low plasticity), CH=argile très plastique (Clay of High plasticity).

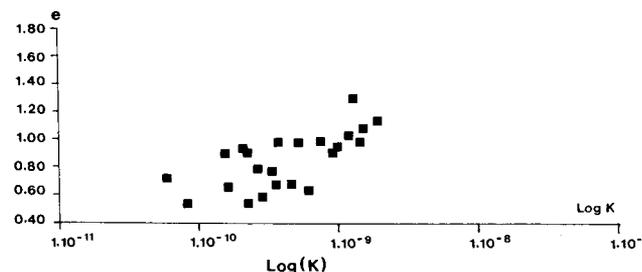
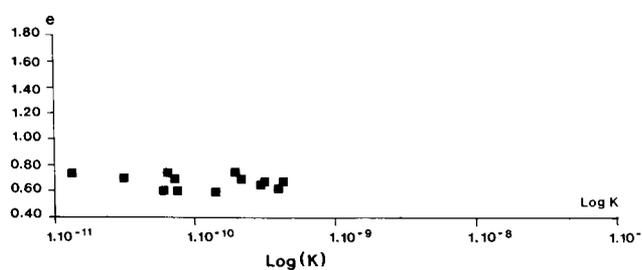
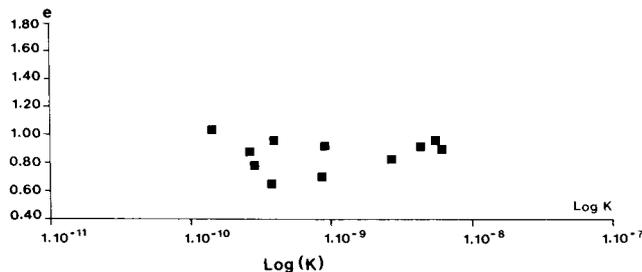
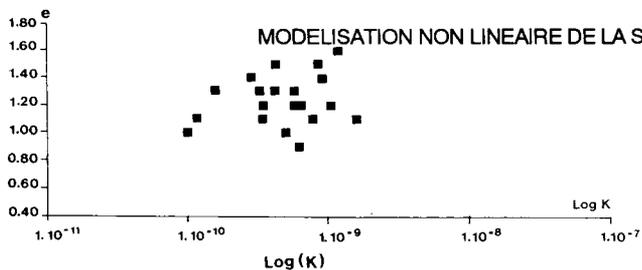


Figure 4 : Diagrammes ($\log K_z, e$) pour chaque couche argileuse.

De nombreux essais oedométriques, à basse et haute pression, ont permis la détermination des valeurs de l'indice de compression (C_c) pour les différents horizons:

| | (Pa^{-1}) |
|--------------------------|---------------------|
| aquifère phréatique | $0.04 < C_c < 0.09$ |
| 1ère couche compressible | $0.4 < C_c < 1.2$ |
| 2ème couche compressible | $0.3 < C_c < 1.2$ |
| D.G.S.C. | $2 < C_c < 0.4$ |
| 1er aquifère | $0.2 < C_c < 0.3$ |
| 3ème couche compressible | $0.3 < C_c < 0.5$ |
| 2ème aquifère | $0.15 < C_c < 0.2$ |

Les contraintes effectives de préconsolidation (σ'_{prec}) ont été déterminées, montrant que les 1ère et 2ème couches compressibles sont normalement

consolidées, la 3ème couche compressible est légèrement surconsolidée et le D.G.S.C. est surconsolidé avec une contrainte effective de préconsolidation de 40 % supérieure à celle des terrains normalement consolidés.

Les essais oedométriques, associés aux déterminations de l'indice des vides à certains paliers de chargement, permettent de tracer des diagrammes (K_z, e) à partir desquels on s'oriente dans le choix de la loi de non linéarité de K_z (figure 4 et cfr. précédemment).

3. MODELE D'ECOULEMENT 3D

Le modèle de la subsidence de Shanghai comprend un modèle d'écoulement tridimensionnel et un modèle non linéaire et couplé écoulement-tassement unidimensionnel vertical. Les résultats calculés du modèle écoulement constituent les conditions aux frontières, variant avec le temps, pour le modèle écoulement-tassement. Les raisons de ce choix ont été exposées précédemment. Rappelons les hypothèses de travail et les buts poursuivis:

- le modèle d'écoulement 3D doit décrire le champ des pressions interstitielles de façon très précise dans les aquifères;
- après chaque pas de temps, les pressions interstitielles calculées aux limites des aquitards (compressibles) sont transmises comme conditions aux limites pour le modèle écoulement-tassement 1D, assurant ainsi un couplage;
- le modèle d'écoulement 3D considère des K et constants et isotropes;
- les principales sollicitations sont les pompages et réinjections;
- le modèle est implémenté dans un code utilisant la méthode des éléments finis et permettant l'utilisation de paramètres non linéaires. Le code utilisé est le LAGAMINE développé par le M.S.M. en collaboration avec les LGIH pour cette étude.
- le modèle fournit des pressions d'eau; le problème est linéaire pour l'écoulement 3D car les K et e sont constants et les nappes sont captives.

Les éléments finis utilisés sont des éléments briques à 8 noeuds dont les arêtes sont des segments de droite. Les fonctions d'interpolation étant linéaires, le champ de pression dans une couche peu perméable sera mal représenté si la couche est discrétisée par un ou quelques éléments. En effet, on trouvera une évolution linéaire de la pression du noeud inférieur au noeud supérieur, ne tenant pas compte des effets transitoires induits par la perméabilité faible.

Pour la zone de Shanghai, le contraste de perméabilité entre les couches aquifères ($K = 5$ à 9.10^{-4} m/s) et les couches semi-perméables ($K = 1.10^{-8}$ à 1.10^{-9} m/s) est tel que le modèle d'écoulement se résume essentiellement à calculer l'évolution des pressions dans les couches aquifères en fonction des sollicitations (pompages-réinjections). Le modèle fournit l'évolution spatio-temporelle des pressions dans la zone modélisée. Mais les valeurs trouvées dans les horizons semi-perméables seront d'autant moins réalistes que la perméabilité est faible et que le pas de temps est petit. Pour un pas de temps de 5 ans (cfr. précédemment), presque la totalité de la dépression s'est déjà propagée surtout si la perméabilité est supérieure à 1.10^{-9} m/s (avec par exemple $S_s < 4.10^{-3}$ m-1) et que la demi-épaisseur de la couche semi-perméable est inférieure à 5 mètres.

3.1. DISCRETISATION SPATIALE ET TEMPORELLE

Le maillage tient compte des données disponibles pour le modèle. Autant que possible, des noeuds ont été placés à l'endroit de forages donnant des informations sur la lithologie, l'hydrogéologie, les conditions géotechniques ou encore, à l'endroit où on dispose de mesures de tassements, compactations ou piézométrie en fonction du temps.

Les limites géologiques se situent à différents niveaux de profondeur dans la structure tridimensionnelle alors que la représentation plan du maillage reste constante pour toutes les couches. Ceci implique que ce maillage tienne compte de toutes les discontinuités géologiques présentes dans le volume discrétisé.

Par exemple, la figure 5 illustre la présence ou l'absence de la couche *Dark Green Stiff Clay* et la figure 6 met en évidence la limite au Sud de laquelle il y a connexion entre le 1^{er} et le 2^{ème} aquifère.

Le maillage complet compte 10 couches de 205 éléments pour une zone étudiée de 129 km² sur 70 m de profondeur.

La répartition spatiale des valeurs de K et Ss est réalisée par la définition de matériaux. Quatorze matériaux différents sont utilisés (tab. 1).

La structure 3D est relativement complexe et les différents matériaux sont répartis dans les 10 couches d'éléments.

La figure 7 illustre la répartition de ces matériaux pour le profil vertical de la figure 2.

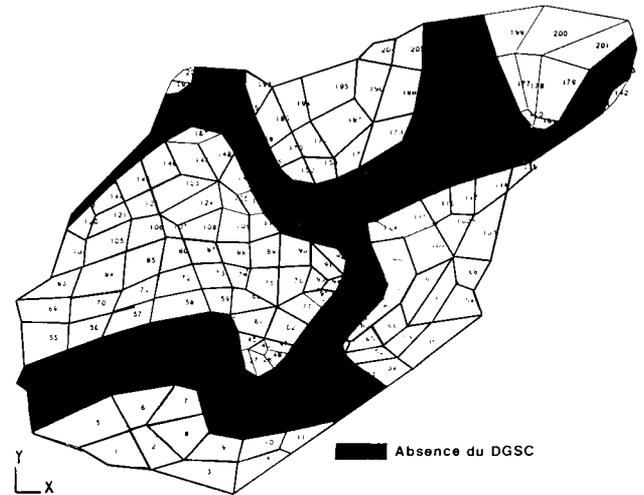


Figure 5 : Vue dans le plan horizontal montrant la présence ou l'absence de la couche D.G.S.C.: le maillage en éléments finis tient compte de ces limites de façon très précise.

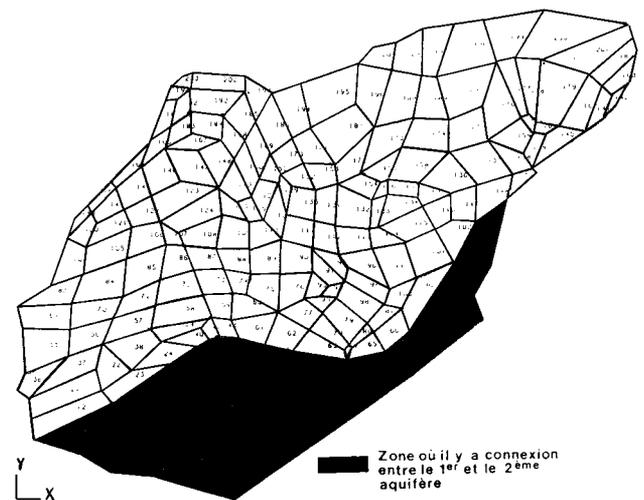


Figure 6 : Vue dans le plan horizontal montrant la zone où il y a connexion entre le 1^{er} et le 2^{ème} aquifère: le maillage en éléments finis rigoureusement compte de ces limites.

La discrétisation temporelle est la suivante:

- de 1870 à 1920.75: quelques pas de temps en progression géométrique afin d'initialiser le problème.
- de 1920.75 à 1965.75: 9 pas de 5 ans chacun.
- de 1965.75 à 1975.75: 20 pas de 6 mois chacun.
- de 1975.75 à 1988.75: 156 pas d'1 mois chacun.
- de 1988.75 à 2000.75: 144 pas d'1 mois chacun.

3.2. CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX FRONTIERES

Les hauteurs piézométriques des différents aquifères et notamment du 2^{ème} aquifère ne sont connues avec précision que depuis 1965. Avant cette date, il faut faire des hypothèses sur la situation existante.

Tableau 1 : Définition et valeurs des paramètres pour les différents matériaux.

| | K (m/s) | S _s (m ⁻¹) |
|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | (valeurs initiales avant calibration) | |
| mat. 1 : sol argiléux de surface | 1 10 ⁻⁹ | 1.7 10 ⁻³ |
| mat. 2 : partie supérieure : limons argileux | | |
| partie inférieure : argile mélangée à du sable silteux | 1 10 ⁻⁸ | 4 10 ⁻³ |
| mat. 3 : limons argileux mêlé à du sable silteux | 1 10 ⁻⁵ | 0.2 10 ⁻³ |
| mat. 4 : argile tourbeuse | 1 10 ⁻⁸ | 4.1 10 ⁻³ |
| mat. 5 : limons argileux et tourbeux | 1 10 ⁻⁸ | 4.0 10 ⁻³ |
| mat. 6 : argile | 1 10 ⁻⁸ | 4.0 10 ⁻³ |
| mat. 7 : limons argileux | 1 10 ⁻⁸ | 4.1 10 ⁻³ |
| mat. 8 : limons sableux | 1 10 ⁻⁷ | 3.2 10 ⁻³ |
| mat. 9 : limons argileux mêlés à des sables silteux | 1 10 ⁻⁷ | 3.2 10 ⁻³ |
| mat. 10 : sables silteux | 1 10 ⁻⁵ | 0.2 10 ⁻³ |
| mat. 11 : <i>Dark Green Stiff Clay</i> | 1 10 ⁻⁹ | 0.1 10 ⁻³ |
| mat. 12 : sables fins silteux | 1 10 ⁻⁵ | 0.2 10 ⁻³ |
| mat. 13 : limons argileux avec intercalations de sables silteux | 1 10 ⁻⁸ | 4.1 10 ⁻³ |
| mat. 14 : sables fins | 1 10 ⁻³ | 1 10 ⁻⁵ |

Il est postulé un état initial hydrostatique pur correspondant à la saturation de toutes les couches avec un niveau d'eau affleurant, égal à la cote absolue du sol (cfr 2.2).

L'importance exacte des pompages n'est connue avec précision que depuis 1960. Néanmoins, une courbe d'évolution a pu être obtenue par extrapolation et déduction à partir de certaines informations orales. Le pompage en 1920 devait être de l'ordre de 300000 à 400000 m³ par an pour culminer à 56.5 10⁶ m³ par an en 1960. A partir de cette année, les données sont fournies en moyennes annuelles de pompage et de réinjection jusqu'en 1975. Après 1975, le lieu et la valeur de tout pompage ou réinjection sont connus en chiffres mensuels. Cette précision

croissante a permis le choix d'un pas de temps de plus en plus court.

Les conditions aux limites latérales du modèle sont des pressions imposées fluctuant avec le temps. Il a été décidé de les faire varier en fonction des piézométries effectivement mesurées dans les environs et également en fonction du taux global de pompage dans la zone modélisée. A partir de la piézométrie de fin septembre 1960, qui correspond à un coefficient 1 en rapport avec le pompage maximum, on a reconstruit l'évolution de la piézométrie imposée aux limites, en fonction du taux de pompage. Durant les oscillations saisonnières dues aux pompages (globalement de mars à septembre) et aux réinjections (globalement d'octobre à février), ce coefficient multiplicateur passe de +0.04 à -0.04.

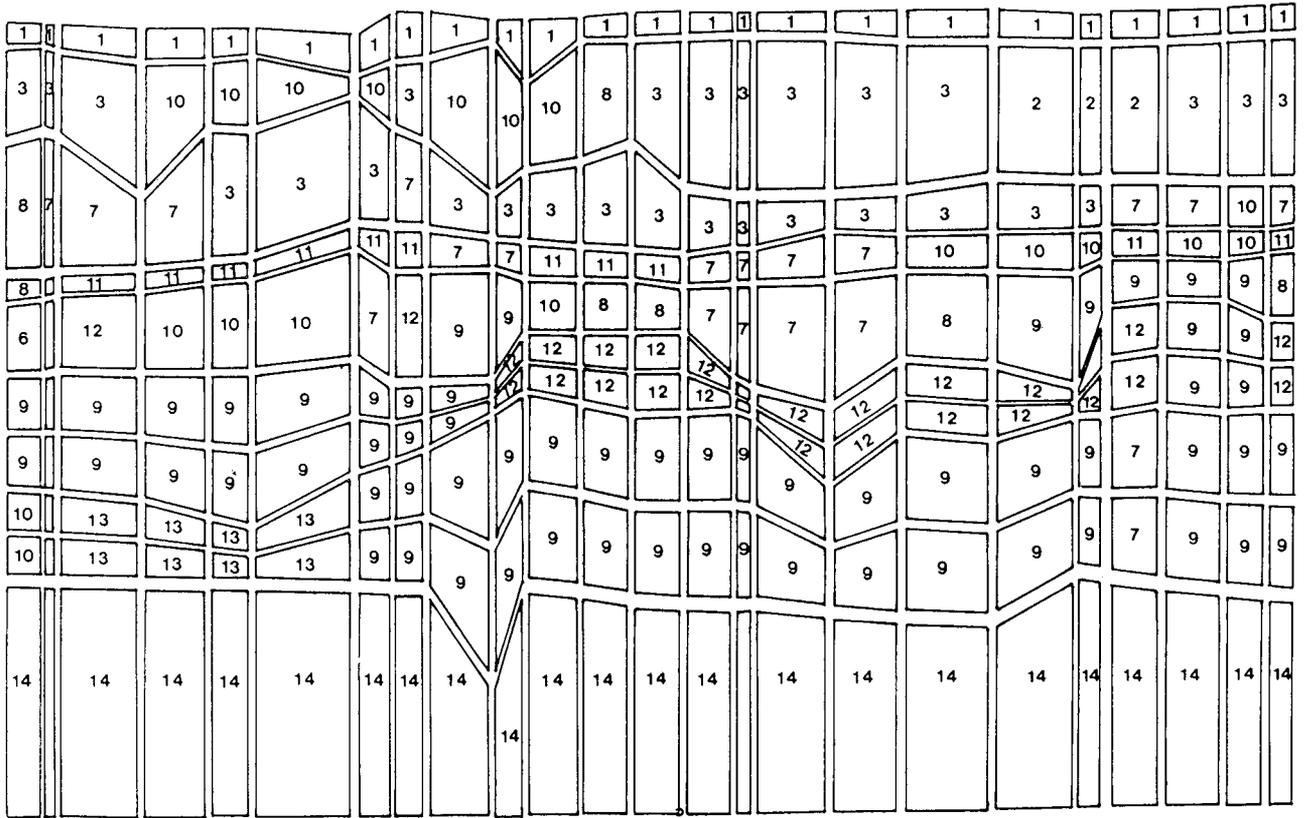


Figure 7 : Répartition des différents matériaux dans la structure maillée du modèle 3D: profil vertical Ouest-Est correspondant à la coupe de la figure 2.

En l'absence de toute donnée se rapportant à la zone située directement à proximité de la zone modélisée (où des pompages et peut-être des réinjections sont réalisés depuis 1965), il a été impossible, au stade actuel, de reporter plus loin les conditions de pressions imposées au pourtour du modèle.

Au sommet du modèle, on impose la hauteur piézométrique égale à la cote absolue du sol, ce qui revient à dire que le niveau de la nappe phréatique se trouve à la surface du sol, condition correspondant au cas d'un sol marécageux en surface et qui présente l'avantage de permettre un débit d'infiltration (cfr. 2.2).

La base du modèle est située au sein du 2ème aquifère.

3.3. CALIBRATION ET RESULTATS

Après de multiples adaptations des valeurs de K et S_s dans les 14 matériaux, la calibration est considérée comme terminée lorsque les pressions calculées sont très similaires aux pressions mesurées (figure 8). Les paramètres des 14 matériaux sont alors ceux repris au tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres des 14 matériaux correspondant à la calibration du modèle 3D d'écoulement.

| | K (m/s) | S_s (m^{-1}) |
|-----------|---------------------|---------------------|
| mat. 1 : | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1.7 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 2 : | $1 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 3 : | $2 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 4 : | $5 \cdot 10^{-9}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 5 : | $5 \cdot 10^{-9}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 6 : | $3 \cdot 10^{-9}$ | $4.1 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 7 : | $5 \cdot 10^{-9}$ | $4.1 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 8 : | $5 \cdot 10^{-6}$ | $0.2 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 9 : | $1 \cdot 10^{-8}$ | $3.2 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 10 : | $2 \cdot 10^{-5}$ | $0.2 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 11 : | $1 \cdot 10^{-9}$ | $0.1 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 12 : | $5 \cdot 10^{-5}$ | $0.2 \cdot 10^{-5}$ |
| mat. 13 : | $2 \cdot 10^{-8}$ | $3.2 \cdot 10^{-3}$ |
| mat. 14 : | $7.5 \cdot 10^{-4}$ | $0.2 \cdot 10^{-5}$ |

La calibration détaillée effectuée sur la période 1920-1965, pendant laquelle les variations de pressions étaient les plus importantes, reste valable quand le programme aborde les années suivantes.

En tant que vérification globale, les termes du bilan sont repris en volumes cumulés depuis 1920. Le bilan en valeurs cumulées est exprimé pour 1950,

Tableau 3 : Bilans en valeurs cumulées pour les années 1950, 1965 et 1985, d'où peut être estimée une valeur moyenne de la subsidence

| Valeurs cumulées depuis 1920 | | 1950 | 1965 | 1985 |
|--|--------------------------------------|---|--|--|
| Volume pompé = Quantité libérée par le tassement + Volume entré par infiltration + Volume entré latéralement | pompages-réinjections | $0.45 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $1.12 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $1.17 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ |
| | subsidence cumulée moyenne X surface | $\frac{1.05 \text{ m}}{129} \cdot 10^6 \text{ m}^2$ | $\frac{2.2 \text{ m}}{129} \cdot 10^6 \text{ m}^2$ | $\frac{1.1 \text{ m}}{129} \cdot 10^6 \text{ m}^2$ |
| | limite supérieure du modèle | $0.064 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $0.19 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $0.32 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ |
| | via les pressions imposées | $0.25 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $0.65 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ | $0.71 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ |

1965 et 1985 au tableau 3. On constate que les valeurs de subsidence moyenne sur toute la zone calculées à partir du volume d'eau libéré par diminution du volume des pores lors du tassement, sont logiques pour les années 1950 et 1965. En 1985, la subsidence moyenne calculée de la sorte est très nettement inférieure à la valeur réelle car il n'est pas tenu compte dans ce raisonnement de l'irréversibilité partielle des tassements du milieu poreux.

Les variations saisonnières des pressions d'eau dans les 1er et 2ème aquifères sont bien rendues par le modèle bien que certaines valeurs calculées soient imprécises durant la période de forte réinjection entre 1964 et 1969 (figure 9).

Les diagrammes des pressions en fonction de la profondeur, pour différentes époques, sont tracés pour 32 colonnes situées dans la structure d'éléments finis du modèle 3D. Malgré la discrétisation sommaire des couches semi-perméables, ces diagrammes (figure 10) montrent bien les effets transitoires affectant la propagation des pressions à travers celles-ci.

Les hypothèses de calcul pour les simulations prévisionnelles ont été celles souhaitées par les ingénieurs du Bureau Géologique de Shanghai, à savoir:

- à partir de 1985.75 et jusqu'en 1990.75, un schéma de pompage "neutre" en se basant sur des données de 1978 où le volume réinjecté est supérieur au volume pompé;
- à partir de 1990.75 et jusqu'en 2000.75, un pompage supérieur à la réinjection de 30 %.

4. MODELE ECOULEMENT-TASSEMENT 1D

4.1. SCHEMA NUMERIQUE ET LOI CONSTITUTIVE

Le schéma numérique est similaire à celui exposé à la figure 20 de la partie théorique. Au vu des données dont on dispose et pour toutes les raisons

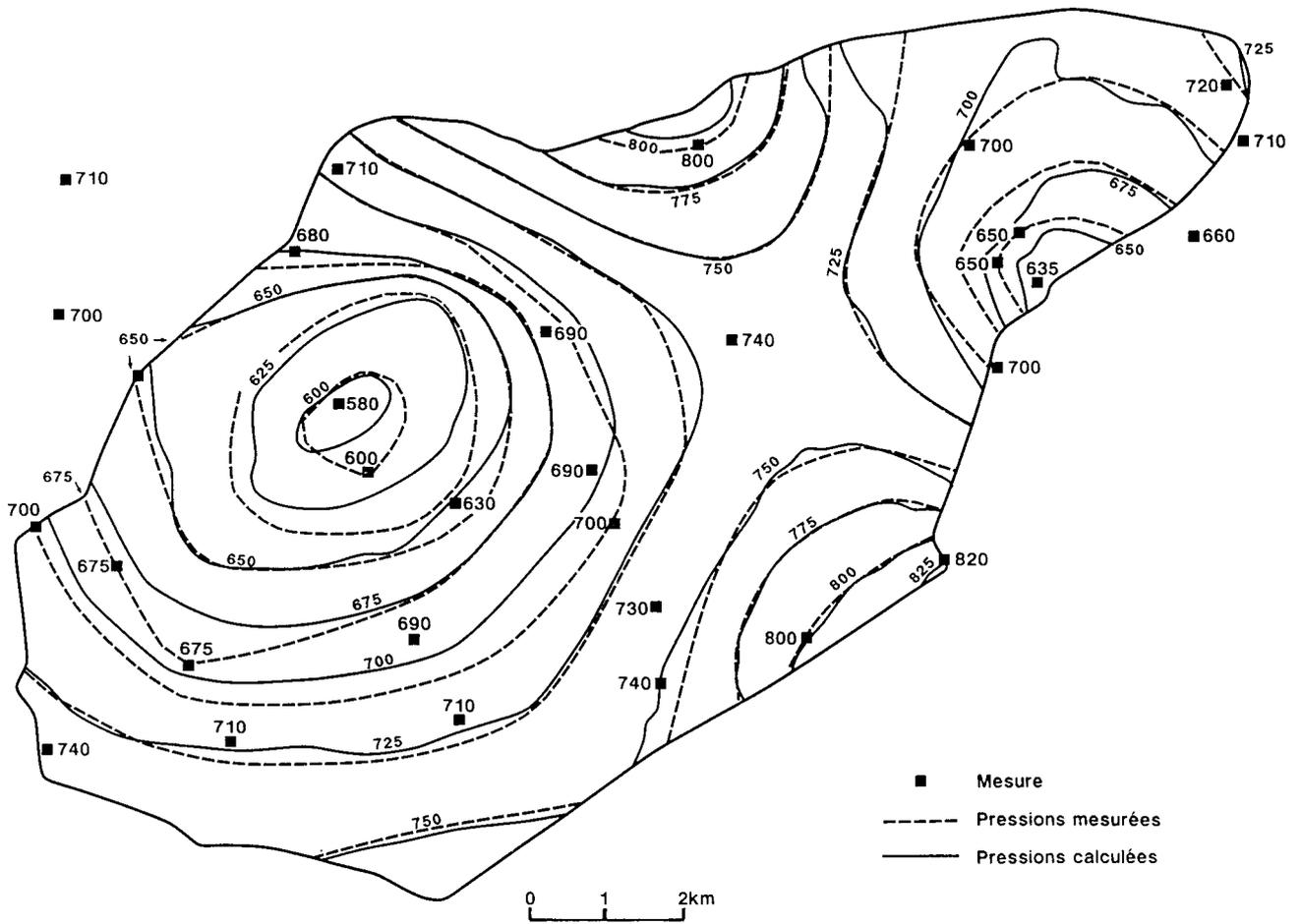


Figure 8. Pressions calculées comparées aux pressions mesurées dans le 2ème aquifère, situation du 30 septembre 1960 (Pressions en kPa).

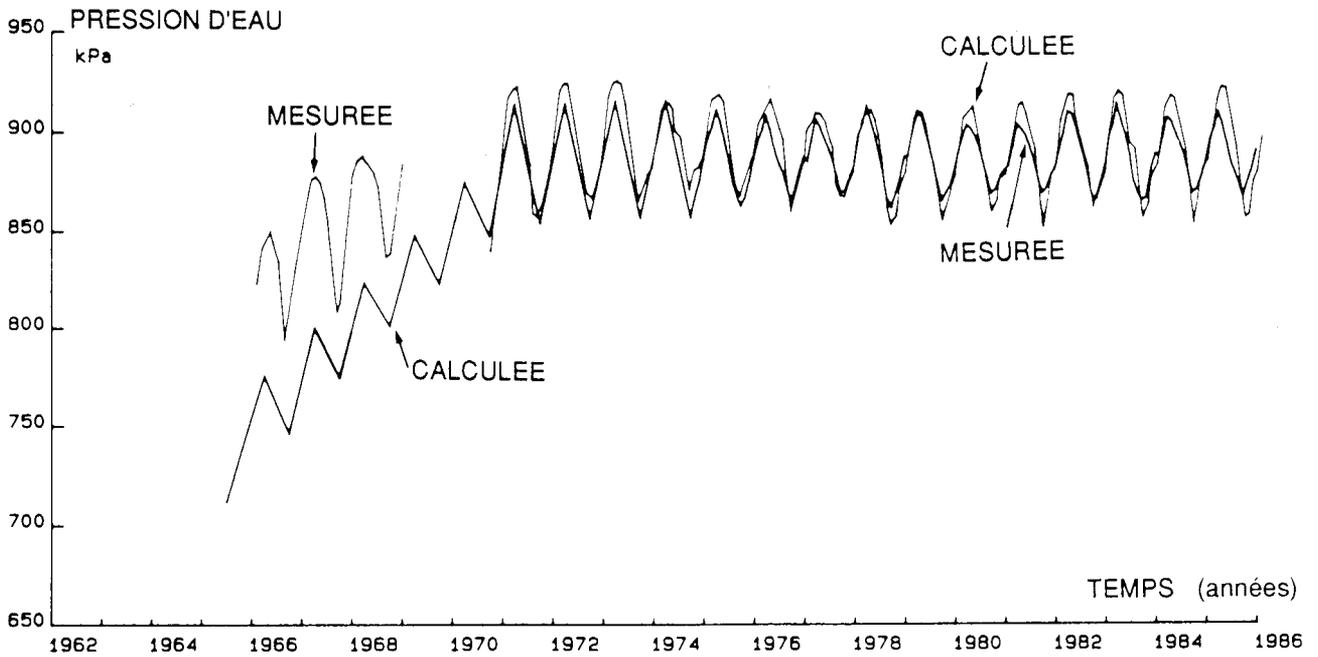


Figure 9. Pressions d'eau calculées et mesurées en fonction du temps dans le 2ème aquifère (noeud 97 de la structure FEM).

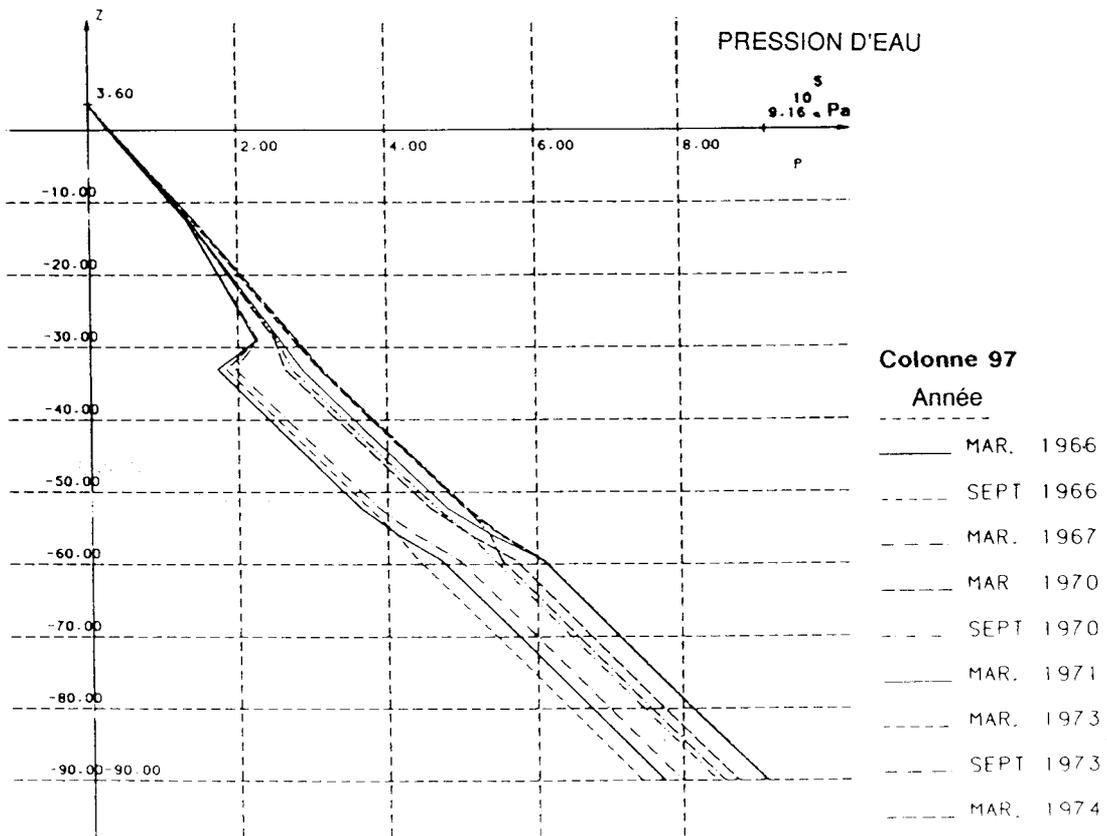
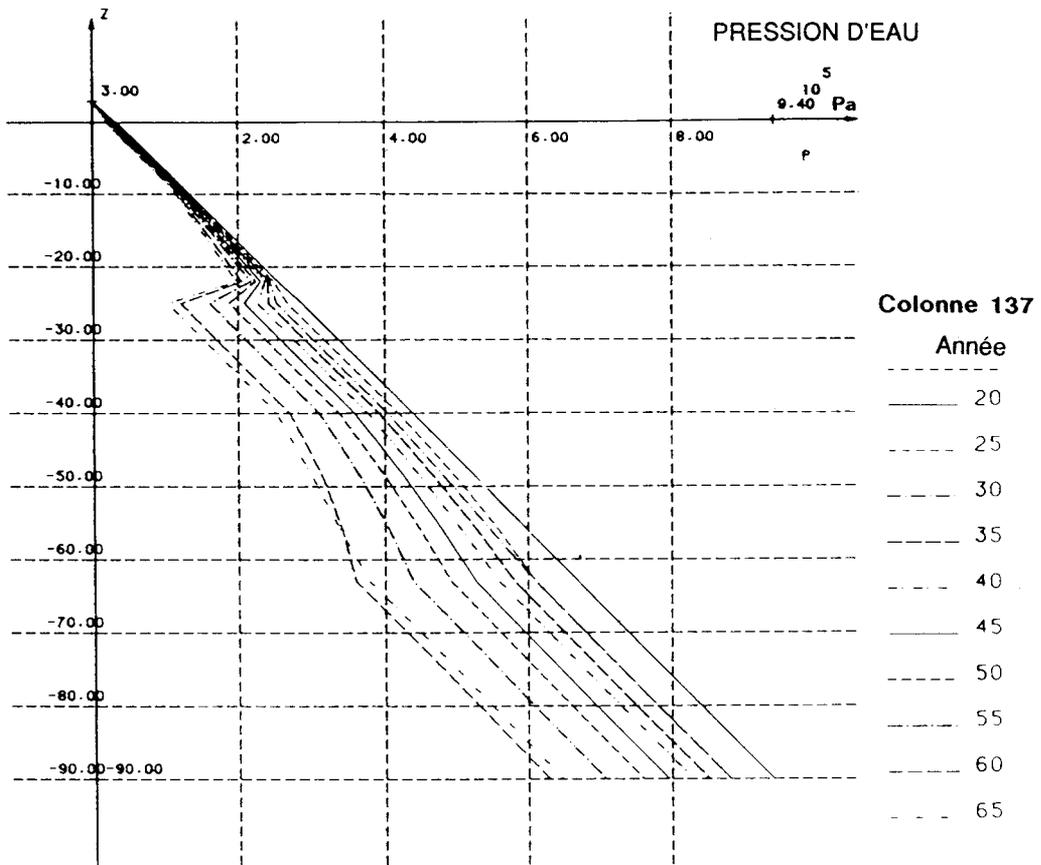


Figure 10. Pressions d'eau calculées en fonction de la profondeur, à différentes époques (colonnes au droit des noeuds 137 et 97 de la structure FEM).

exposées précédemment, la loi constitutive mécanique sera de type oedométrique, c'est-à-dire élasto-plastique logarithmique. Les paramètres de la loi sont les constantes A et C (de gonflement et de compression).

Le modèle est uniaxial vertical; les éléments finis sont droits (du type "barre de treillis") à deux noeuds dont les connecteurs sont les deux déplacements en plan selon x et y et la pression interstitielle (Charlier et Radu, 1989). La non linéarité géométrique n'est pas prise en compte à l'intérieur du pas de temps, mais au départ de chaque nouveau pas de temps, la nouvelle géométrie est considérée. La non linéarité de γ_{sat} est prise en compte implicitement.

Les lois constitutives sont donc les suivantes :

- la relation de Terzaghi

$$\sigma = \sigma' + p \quad (1)$$

- la loi oedométrique exprimée en $(\ln \sigma', \varepsilon)$ de façon incrémentale en $(d\sigma', d\varepsilon)$:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon &= d\sigma' / (A \cdot \sigma') & \sigma' < \sigma'_{prec} \\ d\varepsilon &= d\sigma' / (C \cdot \sigma') & \sigma' = \sigma'_{prec} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

où σ' est actualisée au cours de la consolidation, $\sigma' > \sigma'_{prec}$ étant impossible.

- le couplage emmagasinement-compressibilité:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon &= q_{exp} = d\sigma' / (A \cdot \sigma') & \sigma' < \sigma'_{prec} \\ d\varepsilon &= q_{exp} = d\sigma' / (C \cdot \sigma') & \sigma' = \sigma'_{prec} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- une loi de Darcy 1D, exprimée en terme de pressions:

$$\underline{v} = - \frac{K_z}{\rho \cdot g} (\underline{grad} p + \rho \cdot g \cdot \underline{grad} z) \quad (4)$$

- une loi de non linéarité de K_z à choisir en fonction des terrains:

$$K_z = f(e) \quad (5)$$

- une loi liant l'indice des vides e à la déformation (en supposant l'incompressibilité du fluide et des grains solides):

$$\frac{de}{(1+e)} = d\varepsilon \quad (6)$$

Ces relations permettent de relier $\sigma, \sigma', v, q_{exp}, e$ et σ'_{prec} aux variables de base ε et p .

Les paramètres sont les constantes A et C , les poids spécifiques γ_s et γ_w ainsi que deux paramètres intervenant dans la loi de non linéarité de K_z .

Le problème étant posé en conditions transitoires, il est nécessaire de connaître l'état initial de σ, σ', p, e et σ'_{prec} .

4.2. CHOIX DE LA NON LINEARITE DE K

Sur base des essais géotechniques réalisés à Shanghai et à Liège, fournissant les valeurs de I_p, e et K_z , il est apparu que la relation de Nishida & Nakagawa (1969) (cfr précédemment, équation 28) est la plus adaptée pour représenter la variation de K_z en fonction de la variation de l'indice des vides. De plus, cette relation a été établie sur base d'essais réalisés sur le même type de sédiments que ceux de Shanghai. Les valeurs des coefficients intervenant dans cette relation ont été adaptées de façon très précise en fonction des caractéristiques des différents terrains présents dans le sous-sol de la zone étudiée.

Au départ, la relation s'écrit:

$$\log K = \left[\frac{e}{(0.01 \cdot I_p + 0.05)} \right] - 12 \quad (7)$$

En la généralisant, de manière à pouvoir ensuite caractériser au mieux cette équation au type de sédiments étudiés à Shanghai, on peut écrire:

$$K_z = e^{a \cdot e + b} \quad (8)$$

$$\text{où } a = \frac{2.3}{c \cdot I_p + d}$$

b, c, d sont des constantes à déterminer expérimentalement

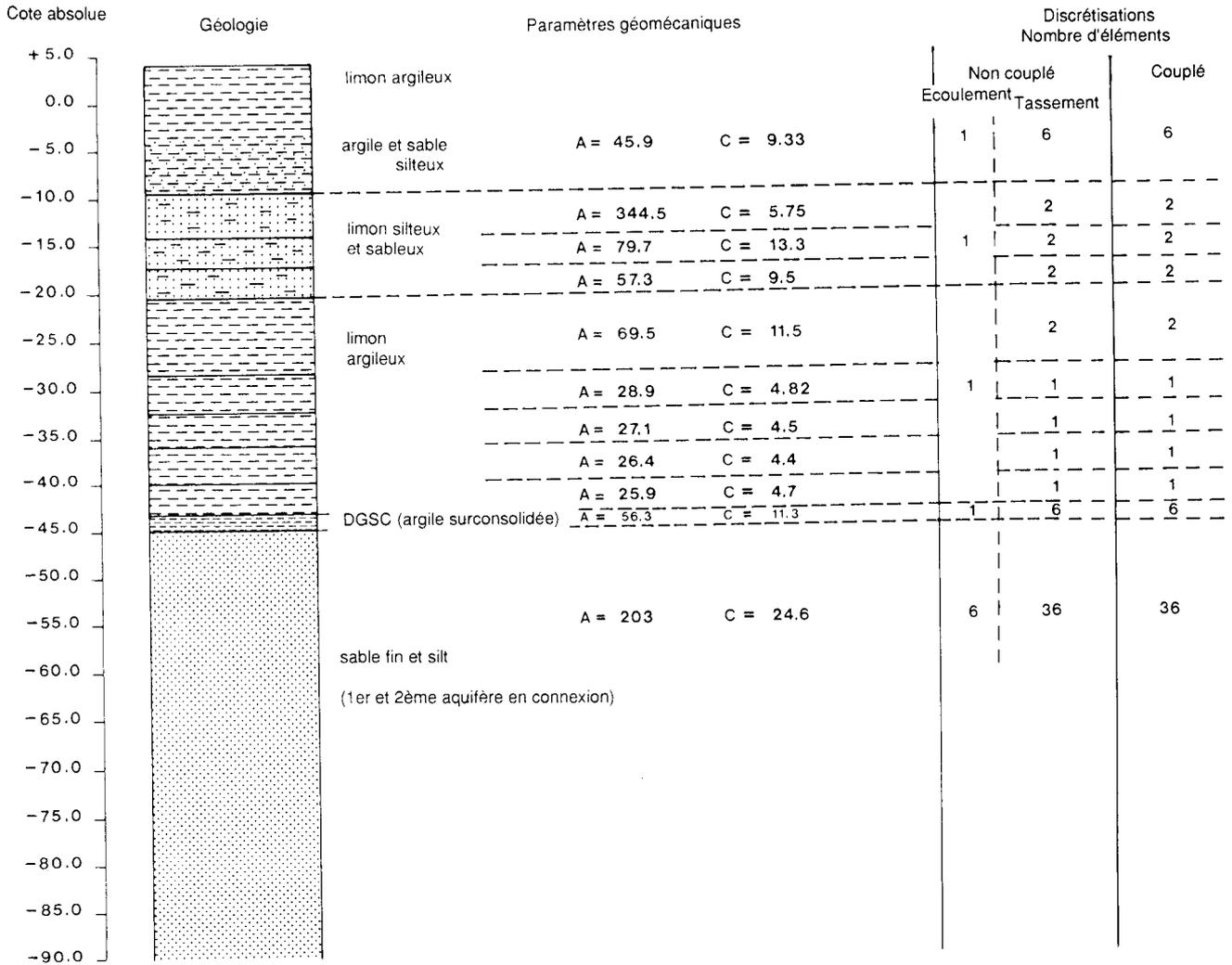


Figure 11 : Discretisation verticale de la colonne 8 et paramétrisation.

En reprenant les résultats des essais de laboratoire pour appliquer l'équation 8; connaissant K_z et e , on en déduit les valeurs de $(c.lp+d)$. Pour les différentes couches compressibles, on obtient:

- 1ère couche compressible: $0.0083.lp + 0.213$
- 2ème couche compressible: $0.0174.lp + 0.0167$
- couche DGSC: $0.0127.lp + 0.0885$
- 3ème couche compressible: $0.0079.lp + 0.176$

Les valeurs des paramètres c et d sont obtenues pour chaque horizon compressible, permettant de calculer des valeurs de a , pouvant être différentes à l'intérieur d'un horizon (car dépendantes de lp).

Les paramètres a et b sont donc les deux paramètres intervenant dans la loi de non linéarité de K_z : ils sont fournis au modèle pour chacune des couches (ou sous-couches) qui composent la colonne 1D.

Cette relation (8) n'est valable en principe que pour les couches argileuses compressibles. Nous la

généralisons pour toutes les couches en posant $a = 0$ et $b = constante$ telle que $ln K_z = b$ dans les couches aquifères plus sableuses ou silteuses. La variation de perméabilité dans ces dernières est donc négligée.

La possibilité d'utiliser d'autres relations $K = f(e)$ et leur influence sur les résultats obtenus seront discutées ultérieurement (cfr. 4.6).

4.3. DISCRETISATION, ETAT INITIAL ET CONDITIONS AUX FRONTIERES

Trente-deux colonnes verticales ont été choisies dans la structure 3D du modèle écoulement. Le plus souvent, elles sont situées au droit de forages, où des prélèvements d'échantillons non-remaniés ont permis la détermination des paramètres. Chaque colonne est divisée en 60 éléments afin d'obtenir une grande précision, particulièrement dans les couches compressibles. La figure 11 décrit la discretisation pour la colonne située au droit du noeud 8 du maillage 3D.

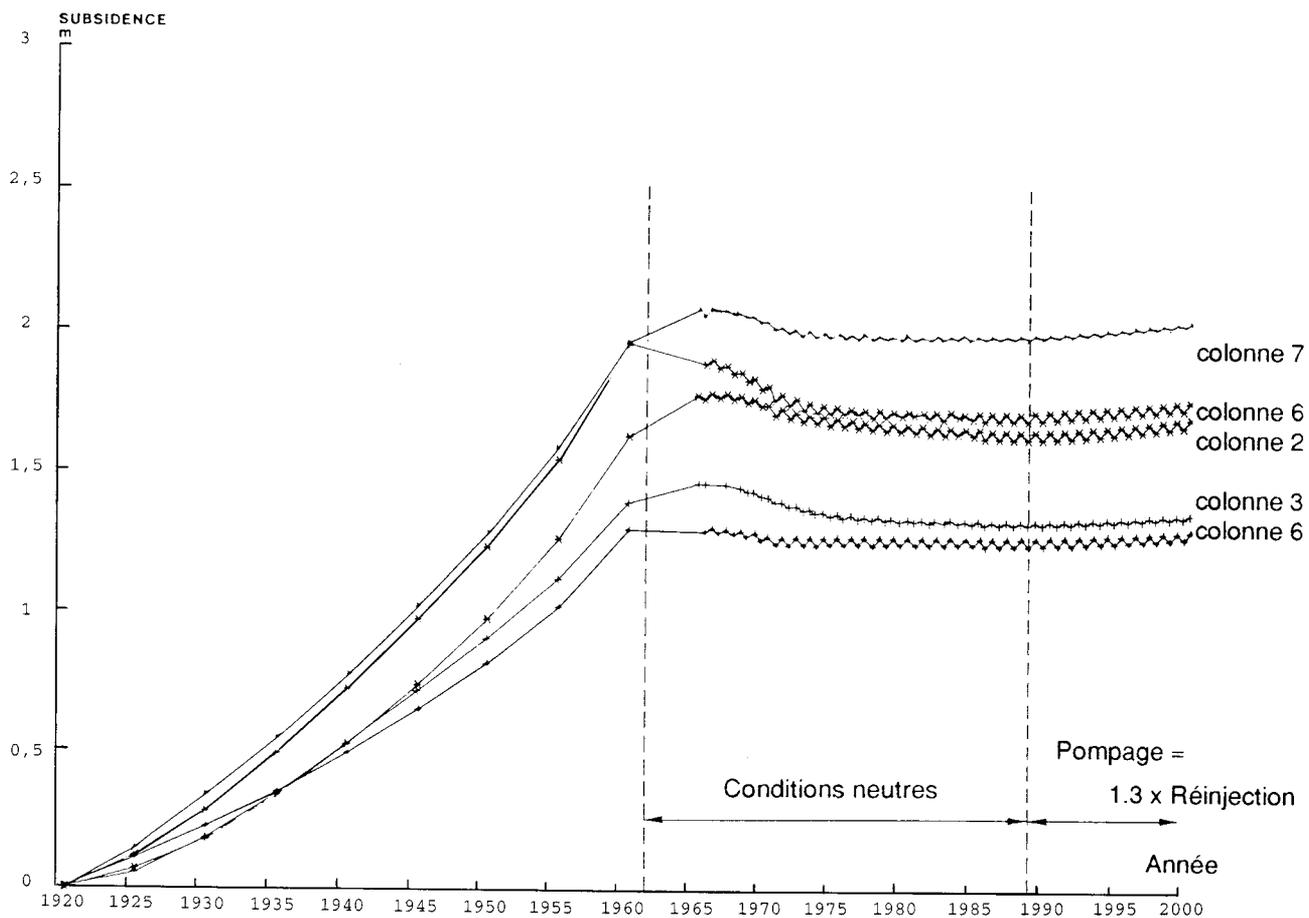
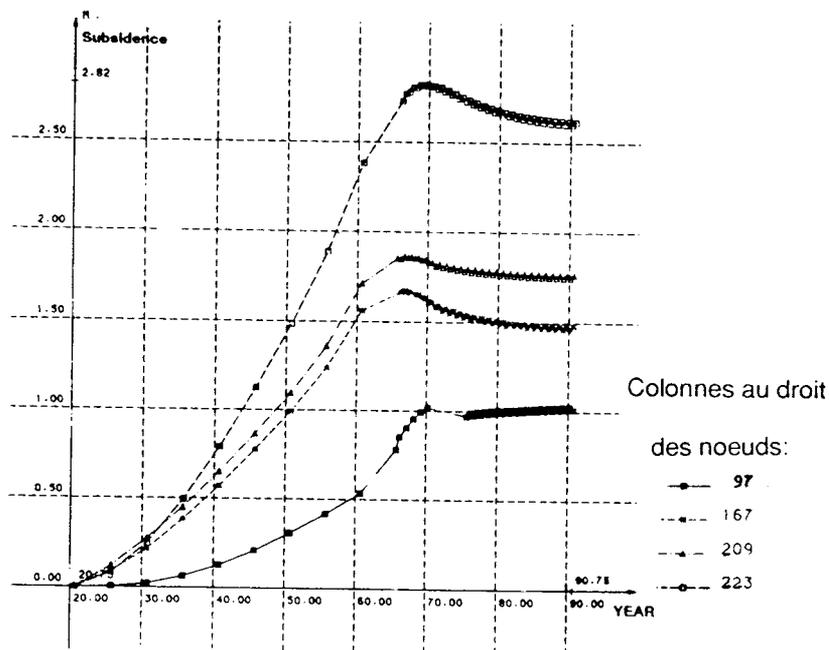


Figure 12 : Subsidence calculée en fonction du temps pour différentes colonnes.

La contrainte totale est constante et sa répartition représente l'état initial en équilibre hydrostatique; les contraintes effectives initiales correspondent également à cet état (cfr. 2.2). La répartition initiale de l'indice des vides (en 1920) a été recalculée. Les contraintes effectives de préconsolidation initiales sont prises, en considérant les couches normalement consolidées sauf pour le *DGSC* où un coefficient 1.4 est appliqué correspondant aux résultats des essais de consolidation (cfr. 2.3).

Comme précisé précédemment, les pressions interstitielles sont imposées aux limites des couches compressibles à chaque pas de temps.

4.4. RESULTATS DE LA SIMULATION

Les points où la subsidence totale est mesurée depuis 1920 sont peu nombreux et tous localisés dans une zone restreinte. De plus, les mesures effectuées en ces points sont relatives aux 300 mètres de sédiments meubles. La partie du tassement total, correspondant uniquement aux 70 mètres supérieurs, est mal connue. Pour ces raisons, la calibration du modèle écoulement-tassement a été réduite, privilégiant les valeurs des paramètres géomécaniques, trouvées par les essais réalisés en laboratoires (oedométriques principalement).

La figure 12 illustre certains résultats du modèle couplé et non linéaire. Les tassements cumulés sont compris entre 1 et 3 m. On constate un "rebond" élastique, plus ou moins différé selon les colonnes en fonction de la proximité des puits de réinjection et surtout des valeurs de K_z et S_v qui influencent le temps nécessaire pour qu'une remise en pression se propage dans les couches compressibles. Souvent le "rebond" élastique est d'autant plus important que le tassement avait été important au préalable. Ceci paraît logique puisqu'il a été reconnu certaines relations (empiriques) entre les valeurs de la constante de gonflement (A) et la constante de compression (C) (Bonnechère, 1985).

En "conditions neutres", les tassements sont totalement stabilisés car les sollicitations saisonnières restent dans le domaine élastique et le tassement secondaire n'est pas pris en compte. Les variations saisonnières de subsidence sont d'amplitudes variables entre 5 mm et 5 cm, dépendant directement des valeurs de A . Si la quantité d'eau réinjectée est supérieure au pompage, le rebond élastique n'est pas plus important car le reste de la subsidence correspond à une partie non récupérable de la déformation (régime plastique). Comme signalé précédemment, la simulation de 1990 à 2000 prend

en compte des pompages de 30 % supérieurs aux réinjections. Une reprise du tassement est constatée avec des valeurs comprises entre 1.4 et 7.9 cm.

4.5. COMPARAISON AVEC UN MODELE LINEAIRE

Pour comparer les résultats obtenus avec le modèle non linéaire et ceux qu'on aurait trouvés en utilisant soit un modèle complètement linéaire (paramètres constants), ou un modèle couplé (S_v variable) avec K_z constant, on a utilisé les données de la colonne située au droit du noeud 8 (figure 11). La figure 13 reprend les valeurs de K_z et S_v , dans le cas du modèle linéaire non couplé et dans le cas des non linéarités de K_z et S_v . Remarquons cependant que, dans le cas du modèle couplé et non linéaire, les couches compressibles sont mieux décrites, du point de vue des paramètres hydrogéologiques, que pour le modèle non couplé car ce dernier emprunte la discrétisation tridimensionnelle du modèle d'écoulement où les couches compressibles sont décrites parfois par une seule couche d'éléments finis.

Comme signalé précédemment (cfr. Précédemment), le couplage et les non linéarités permettent de simuler de façon beaucoup plus réaliste la lente propagation des dépressions dans les semi-perméables. La figure 14 montre la répartition des pressions d'eau dans la colonne 8, en fonction de la profondeur, la pression d'eau initiale de 1920 étant supposée en équilibre hydrostatique. Pour 1960, on constate une différence des pressions d'eau qui peut atteindre 75 kN/m^2 , entre 20 et 42 m de profondeur, lorsque l'on compare l'approche couplée et non couplée. La répartition des pressions d'eau et donc celle des contraintes effectives induit l'essentiel de la différence des tassements. En résultat final, la figure 15 montre l'ampleur que peut prendre l'erreur commise en calculant les tassements par un modèle non couplé à paramètres constants.

4.6. SIMULATION AVEC UNE AUTRE LOI DE NON LINEARITE DE K

Bien que la relation de Nishida & Nakagawa présentait dans notre cas des avantages indéniables (4.2), il n'est pas interdit de penser que d'autres relations pourraient convenir. Dans cet esprit, la relation de Terzaghi (équation 20 cfr théorie) a été généralisée pour prendre la forme:

| COTES ABSOLUES | LITHOLOGIE | $S_s \text{ m}^{-1}$ | | | K m/s | | |
|-------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | | NON COUPLE | COUPLE | | NON COUPLE | COUPLE NON LINEAIRE | |
| | | LINEAIRE | 1920 | 1960 | LINEAIRE | 1920 | 1960 |
| +5 | Limon argileux | $4 \cdot 10^{-3}$ | | | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | $0.9 \cdot 10^{-8}$ |
| 0 | | | | | | | |
| -5 | Argile et sable silteux | | | | | | |
| -10 | Limon silteux et sableux | $0.2 \cdot 10^{-3}$ | $9.7 \cdot 10^{-3}$ | $9.5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ | $2.5 \cdot 10^{-9}$ | $2.4 \cdot 10^{-9}$ |
| -15 | | | $1.57 \cdot 10^{-2}$ | $1.5 \cdot 10^{-2}$ | | | |
| -20 | | | $1.19 \cdot 10^{-2}$ | $1.15 \cdot 10^{-2}$ | | | |
| -25 | | | $5.2 \cdot 10^{-3}$ | $5.0 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -30 | Limon argileux | $4.1 \cdot 10^{-3}$ | $4.2 \cdot 10^{-3}$ | $4.0 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $0.8 \cdot 10^{-7}$ |
| -35 | | | $5.9 \cdot 10^{-3}$ | $5.5 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -40 | | | $5.5 \cdot 10^{-3}$ | $5.2 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -45 | | | $4.5 \cdot 10^{-3}$ | $4.3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -50 | | | $3.4 \cdot 10^{-3}$ | $3.2 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -55 | | | $8.0 \cdot 10^{-3}$ | $7.7 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -60 | | | $7.2 \cdot 10^{-3}$ | $6.8 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -65 | | | $7.7 \cdot 10^{-3}$ | $7.3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -70 | | | $7.0 \cdot 10^{-3}$ | $6.4 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -75 | | | $7.2 \cdot 10^{-3}$ | $6.5 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -80 | DGSC | $0.1 \cdot 10^{-3}$ | $6.5 \cdot 10^{-3}$ | $5.75 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-9}$ | $2.7 \cdot 10^{-9}$ | $2.3 \cdot 10^{-9}$ |
| -85 | | | $6.1 \cdot 10^{-3}$ | $5.4 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -90 | | | $5.2 \cdot 10^{-3}$ | $3.2 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -95 | | | $4.7 \cdot 10^{-3}$ | $3.7 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| -100 | Sable fin et silt | $0.2 \cdot 10^{-5}$ | $4.6 \cdot 10^{-4}$ | $3.5 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $1.2 \cdot 10^{-9}$ | $1.0 \cdot 10^{-9}$ |
| -105 | | | $10.5 \cdot 10^{-4}$ | $6.9 \cdot 10^{-4}$ | | | |
| -110 | | | $8.7 \cdot 10^{-4}$ | $6.0 \cdot 10^{-4}$ | | | |
| -115 | | | $7.4 \cdot 10^{-4}$ | $5.5 \cdot 10^{-4}$ | | | |
| -120 | | | $7.0 \cdot 10^{-4}$ | $5.1 \cdot 10^{-4}$ | | | |
| -125 | | | $5.5 \cdot 10^{-5}$ | $4.2 \cdot 10^{-4}$ | | | |

Figure 13 : Paramètres K_z et S_s de la colonne 8, dans le cas du modèle linéaire et du modèle non linéaire.

$$K_z = a_T \cdot (e - b_T)^{c_T} \cdot (1 + e)$$

où a_T , b_T et c_T sont des constantes à déterminer expérimentalement.

Ces paramètres a_T , b_T et c_T ont été ajustés aux mesures par moindres carrés sur des diagrammes (e , K_z), pour les différentes couches compressibles composant les colonnes de tassement à Shanghai (Velz, 1989).

Les résultats sont les suivants:

- 1ère couche compressible

$$K = 5.44 \cdot 10^{-10} \cdot (e - 0.5)^{1.916} \cdot (1 + e)$$

- 2ème couche compressible

$$K_1 = 3.1 \cdot 10^{-10} \cdot (e - 0.5)^{0.3963} \cdot (1 + e)$$

$$K_2 = 70.0 \cdot 10^{-10} \cdot (e - 0.6)^{0.916} \cdot (1 + e)$$

- couche D.G.S.C.

$$K = 7.0 \cdot 10^{-10} \cdot (e - 0.5)^{1.059} \cdot (1 + e)$$

- 3ème couche compressible

$$K = 12.0 \cdot 10^{-10} \cdot (e - 0.4)^{1.5} \cdot (1 + e)$$

Lorsque la couche étudiée est fortement hétérogène, comme la 2ème couche compressible, on est obligé de distinguer 2 lois de non linéarité et ensuite de choisir pour la simulation celle qui convient le mieux dans chaque cas. La loi de Nishida & Nakagawa permettait, grâce à l'intervention de lp , de passer d'une loi à l'autre (caractérisées par des valeurs différentes du paramètre a) en fonction des lp trouvés à différentes profondeurs au sein des entités compressibles.

Dans ces conditions, les subsidences totales calculées pour la colonne 8, jusqu'en 1990, sont les suivantes:

- modèle non couplé (paramètres constants):

1.92 m

- modèle couplé et constant: 1.42 m

- modèle couplé et non linéarité de Nishida: 1.04 m

- modèle couplé et non linéarité de Terzaghi (la loi K2): 2.48 m.

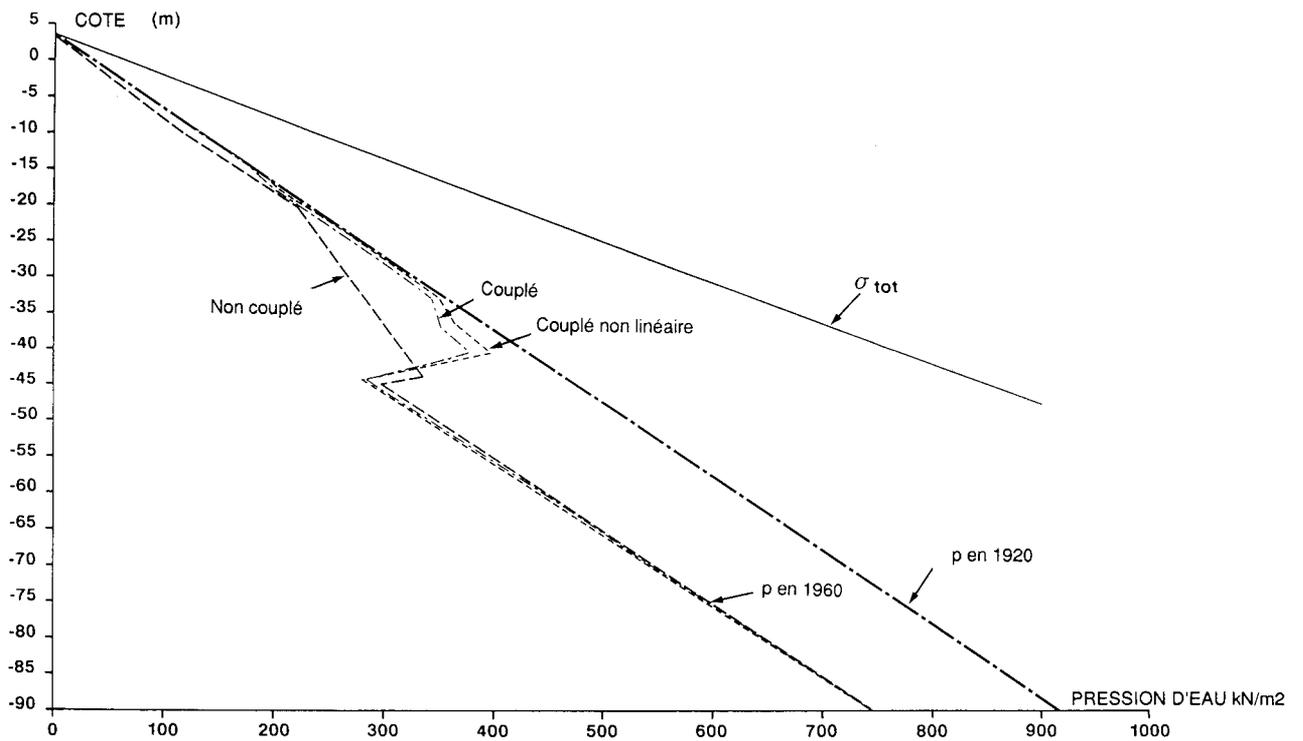


Figure 14 : Répartition des pressions d'eau en fonction de la profondeur en 1960, colonne 8.

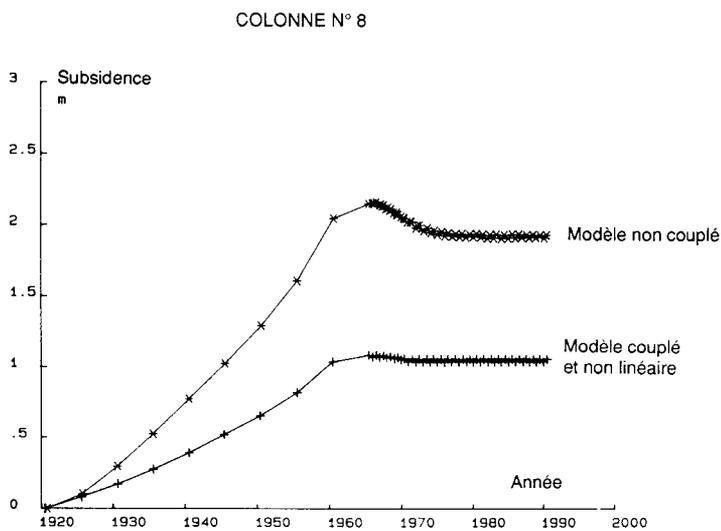


Figure 15 : Tassements calculés pour la colonne 8 par un modèle non couplé à paramètres constants et un modèle où K_z et S_s varient en fonction de e et/ou σ^1 .

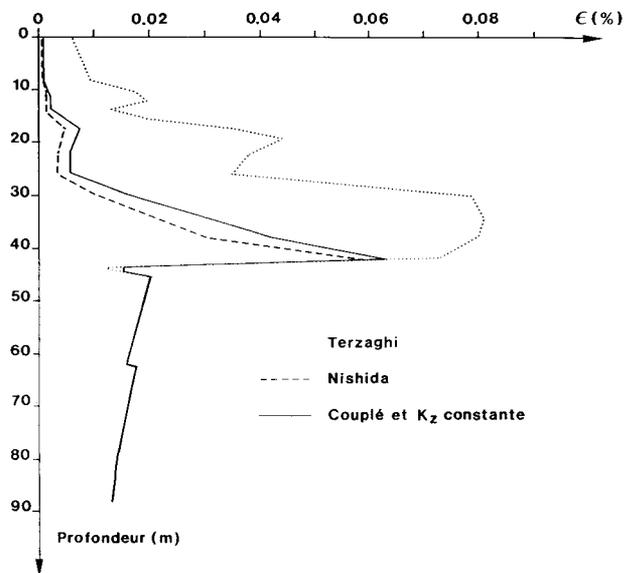


Figure 16 : Profils des déformations relatives en 1965.75, colonne 8, pour différentes simulations.

La figure 16 illustre les déformations totales relatives, en fonction de la profondeur pour chacun de ces modèles, en 1965.75. La loi de Terzaghi (K_z) induit une diminution très rapide de K_z . Dans la mesure où ce comportement n'est certainement pas caractéristique de l'ensemble de la 2^{ème} couche compressible, on est amené à surestimer de façon importante les perméabilités initiales de cette couche, alors qu'avec les relations de Nishida & Nakagawa, différentes relations sont utilisées en fonction des valeurs de I_p . La surestimation des perméabilités initiales induit des déformations très importantes dans les couches compressibles puisque les dépressions d'eau s'y propagent rapidement.

La loi de Terzaghi est donc, dans le cas de cette colonne, difficilement applicable, car engendrant des résultats peu fiables.

Des comparaisons similaires sur les résultats trouvés aux autres colonnes ont été réalisées. Elles tendent à montrer que l'introduction d'une non linéarité de K_z , provoque une diminution des tassements calculés, si la loi de non linéarité est réaliste (tableau 4).

Les lois de type K_z de Terzaghi ne conviennent pas sauf peut-être dans la colonne 15. Le passage d'une loi de Terzaghi à une autre (de K_1 à K_z) peut provoquer des différences non négligeables de tassements calculés. Ce dernier fait confirme qu'il ne faut en aucune façon négliger l'apport d'autres données permettant de caractériser plus finement les couches compressibles. Comme signalé précédemment, la loi de Nishida & Nakagawa, en se servant des valeurs de I_p pour distinguer différentes valeurs du paramètre a au sein même des couches compressibles, est la loi qui permet la meilleure caractérisation des couches compressibles. Les autres lois se basent sur l'ajustement global (par moindres carrés, etc...) des paramètres pour l'ensemble d'une couche. Cet inconvénient peut être partiellement évité si le nombre de couches discrétisées est très important, ce qui implique une très grande densité de données sur K_z et e .

D'autres relations de non linéarité de K_z restent à tester et tout particulièrement la relation (31) évoquée précédemment, car elle propose un formalisme similaire à la non linéarité de S_s dans le couplage écoulement-tassement.

5. CONCLUSIONS

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

a) Une densité suffisante des données est un préalable indispensable à une simulation qui se veut relativement précise. De nombreux points de mesures répartis régulièrement sont utilisés pour définir au mieux la géométrie 3D du modèle écoulement dont la structure peut rarement être considérée comme un empilement de couches horizontales.

A 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 un centaine de points, régulièrement répartis dans la zone d'étude d'environ 120 km². 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 détermineront les paramètres du modèle écoulement- tassement 1D. A Shanghai, les colonnes retenues pour le calcul des tassements, ont été sélectionnées sur base de la disponibilité 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/réinjections ainsi que les mesures des hauteurs piézométrique 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 relativement précise du modèle écoulement 3D, malgré les imprécisions subsistant sur les pompages réels effectués entre 1920 et 1950. Par contre, les mesures historiques de la subsidence depuis 1920, en nombre trop restreint, n'ont pas permis une calibration satisfaisante du modèle écoulement-tassement.

Tableau 4 : Tassements totaux, en 1990.75, dans différentes colonnes et en utilisant différents modèles.

| Colonne | Tassements (m) | | | |
|---------|-------------------|---------|--------------------|--------------------|
| | Couplé K_z cste | Nishida | Terzaghi (K_1) | Terzaghi (K_2) |
| 8 | 1.42 | 1.04 | | 2.48 |
| 15 | 1.82 | 1.72 | 0.97 | 1.62 |
| 135 | 2.25 | 2.09 | 2.17 | 2.58 |
| 144 | 2.08 | 1.81 | 1.49 | 1.57 |

b) La précision complémentaire que l'on obtiendrait par un modèle écoulement-tassement 3D est peu importante 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 tridimensionnelle 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.

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

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

c) Le couplage écoulement-tassement provoquant la non linéarité de S_s et d'autre part la prise en compte de la non linéarité de K_z 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 empirique. 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 K_z 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. A ce sujet, la loi de Nishida et Nakagawa convient tout particulièrement bien au cas étudié de Shanghai.

6.REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée dans le cadre d'un contrat de Coopération Scientifique entre la Belgique et la R.P.de Chine de 1986 à 1989, et financé par le S.P.P.S. (Service de la Programmation et de la Politique Scientifique) en Belgique et le Ministère de la Géologie en Chine.

Nous tenons à remercier d'une part, Madame C. Baeteman du Service Géologique qui a réalisé l'entièreté de l'étude sédimentologique du Quaternaire à Shanghai, Monsieur Ch. Schroeder des L.G.I.H. de l'Université de Liège qui a largement contribué à l'étude géotechnique de cette recherche, et d'autre part, Messieurs J.P. Radu, R. Charlier et S. Cescotto du département M.S.M. de l'Université de Liège qui ont développé le code LAGAMINE pour tenir compte des couplages et non linéarités. Enfin, nous remercions également Madame Li Xianglin, Messieurs Su Heyuan, Li Qinfen et Zhang J qui ont participé à l'étude côté chinois.

La portabilité du code LAGAMINE sur une station de travail IBM Risc 6000 AIX a été rendue possible grâce au soutien de la société IBM.

7. BIBLIOGRAPHIE

- BAETEMAN, C., 1989.- The Upper Quaternary deposits of the Changjiang coastal plain, Shanghai area. Etude de la géologie du Quaternaire de l'hydrogéologie et de la géologie de l'ingénieur dans le delta du Yangtsé. Modèle mathématique de la zone de Shanghai, pp. 19-177.
- BAETEMAN, C. & DASSARGUES, A., 1992.- Relations between the characteristics of deposits at major river mouths and their hydrogeological and geotechnical properties conditioning natural and man-induced land subsidence. Mémoire primé par l'Académie Royale des Sciences d'Outremer (Lauréats 1992), non publié.
- BAETEMAN, C. & SCHROEDER, C., 1990.- Land subsidence in Shanghai, An application of the interaction between coastal-lowland geology and engineering geology. Proc. 6th Int. IAEG Congress. Balkema, 191-199.
- BONNECHERE, F., 1985.- Cours de mécanique des sols, Université de Liège. Faculté des Sciences Appliquées.
- DASSARGUES, A., 1991.- 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, 313 pp.
- FELDKAMP, J.R., 1989.- Numerical analysis of one dimensional non linear large-strain consolidation by the Finite Element Method. Transport in Porous Media, 4: 239-257.
- MONJOIE, A., 1991.- Subsidence dans la région de Shanghai (Rép. Pop. de Chine). Bulletin de l'Académie Royale des Sciences d'Outremer, 36(1990-4):725-750.
- NISHIDA, Y. & NAKAGAWA, S., 1969.- Water permeability and plastic index of soils. In Land Subsidence IAHS-UNESCO, Publ. n° 89: 573-578.
- SU, H.Y., 1984.- Mechanism of land subsidence and deformation of soil layer in Shanghai. Proc. of the 3rd International Symposium on Land Subsidence, Venice, IAHS, 425-433.
- VELZ, O., 1990.- Modélisation des tassements de Shanghai, Influence de la non linéarité des paramètres de couplage. Travail de fin d'études d'Ingénieur Civil Géologue, Faculté des Sciences Appliquées, 156 p.

Manuscrit reçu le 6 novembre 1992, accepté le 15 août 1993.