

**Groupe de travail**  
**« Modélisation numérique »**

-

**Validation des logiciels**

Philippe Mestat (LCPC)

CFMS – 3 avril 2003

# Groupe de travail « Modélisation numérique »

- Création en 2002.
- Objectifs principaux :
  - organiser un lien entre les **enseignants** de méthodes numériques en géotechnique, les chercheurs et les ingénieurs ;
  - réfléchir collectivement à la **bonne pratique** de la modélisation en géotechnique ;
  - proposer des fiches de **validation** pour les logiciels de calcul numérique dans le domaine de la géotechnique, et notamment de l'interaction sol-structures
  - servir de correspondant national pour l'ETC 7 « Numerical Methods in Geotechnical Engineering » de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique (SIMSG).

# Organisation et productions

Animateurs : Philippe Mestat et Yvon Riou

Productions envisagées :

- rapport d'activités annuel ;
- document de recommandations pour la validation des logiciels de calculs numérique en géotechnique.

Activités en cours :

- benchmark de type académique (concours de prévision) lancé en 2002 ;
- référentiel de tests (recueil de fiches de validation pour les logiciels) ;
- base de données MOMIS sur la confrontation calculs MEF-mesures (« Modélisation des Ouvrages et Mesures In Situ ») ;
- colloque national annuel sur l'Enseignement des méthodes numériques en génie civil (rencontres AUGC).

# Validation des logiciels

- Problématique « d'assurance de la qualité » :
  - prouver la conformité à un référentiel donné.
- **Enjeux** :
  - il devient nécessaire d'apporter la preuve factuelle de la qualité de ses produits.
  - Compétitivité / Aspects économiques
  - Réaliser un « bon » modèle du « premier coup »
  - Bonnes pratiques
  - Qualité des prestations

# Qualité d'un logiciel – Qualité des calculs

- Comment juger de la **qualité d'un logiciel** dont va dépendre la **qualité des services** réalisés par le bureau d'études ?
  - pour le concepteur, l'important est de produire et de maintenir un logiciel de qualité à un coût raisonnable (procédures qualité pour la conception, validation, certification, sûreté de fonctionnement) ;
  - pour l'utilisateur, l'essentiel est de réaliser de bons modèles du premier coup (condition de la compétitivité). C'est un enjeu économique fondé sur la maîtrise du logiciel (facilité de mise en oeuvre et sécurité) et sur les niveaux de qualification et de formation des utilisateurs (qui ont un coût).

## Critères de choix et qualités des logiciels (adapté de Vouilloux, 1988)

Critères de choix	Qualités d'un logiciel
Besoins actuels en modélisation	Définition claire des capacités du logiciel. Limitations et domaine de validité.
Prix du logiciel	Compétitivité. Matériels et logiciels de base nécessaires.
Fiabilité Exactitude des résultats Validation	Maîtrise des risques. Fiabilité informatique. Robustesse des algorithmes et des modèles de comportement. Aptitude à fournir des résultats satisfaisants. Couverture de tests. Protection des données.
Convivialité	Simplicité d'emploi. Clarté des menus. Aide en ligne.
Documentation Assistance Formation	Conformité du logiciel aux références techniques. Clarté et exhaustivité de la documentation. Formation initiale et continue. Formation théorique ou pratique. Conseils pour les calculs complexes (non linéaires). Club d'utilisateurs. Messages erreur/avertissement.

## Critères de choix et qualités des logiciels (adapté de Vouilloux, 1988)

Critères de choix	Qualités d'un logiciel
Maintenabilité	Pérennité de l'équipe de développement. Lisibilité du code. Aptitude à intégrer les progrès techniques en matière d'informatique. Gestion des anomalies et des corrections. Délais de réponse.
Coût, rentabilité des études. Productivité. Tenue des délais.	Facilité d'emploi. Maîtrise rapide du logiciel, des pré- et post-processeurs. Aide à la rédaction des rapports d'étude (dessins de présentation). Taille et complexité maximale des modèles. Traçabilité.
Portabilité.	Type de matériel préconisé.
Interopérabilité	Echanges de données. Compatibilité.
Besoins futurs en modélisation	Evolutivité. Modularité de la programmation. Aptitude à s'adapter aux besoins des utilisateurs et délais pour les développements demandés.

# Conformité et référentiels

- Réglementations :
  - règles obligatoires émises par une autorité réglementaire.
- Normes :
  - documents établis par un consensus.
- Spécifications techniques :
  - documents établis par le fournisseur.
- Codes d'usage :
  - documents établis par une profession.

# Les modes de preuve

- Il s'agit de démontrer que des exigences préétablies sont bien satisfaites.
- Cinq modes de preuve :
  - déclaration écrite du fournisseur ;
  - procès-verbal d'essai technique ;
  - rapport de contrôle (audit interne) ;
  - rapport d'inspection (organismes indépendants) ;
  - certification par une tierce partie.
- **D'où la nécessité de disposer d'un référentiel.**

# Référentiel : les tests numériques

- Les tests sont le moyen de s'assurer que ce que l'on a programmé est correct.
- « Un test est un protocole expérimental très précis et reproductible qui doit provoquer un ensemble de réponses qui montrent que la transformation opérée par le programme est correcte. »

Jacques Printz  
(in « Le génie logiciel »)

- La **validation** est le fait de certifier qu'un logiciel effectue une certaine tâche d'une manière correcte.

# Que doit-on tester ? Que doit-on valider ?

- Pré-processeur
- Post-processeur
- **Solveur**
  
- Algorithmes généraux
  
- Lois de comportement et algorithmes particuliers
- Couplages :
  - lois d'interface, hydro-mécanique, thermo-mécanique, etc.

# Plate-forme de tests

- Élaboration d'une stratégie fondée sur un ensemble de tests :
  - tests unitaires (vérification d'une action) ;
  - tests d'intégration (rapatriement) ;
  - tests de non-régression (altération possible des résultats) ;
  - tests de robustesse (conditions d'utilisation extrêmes) ;
  - tests élémentaires (au niveau d'un élément fini) ;
  - tests semi-industriels (benchmarks académiques) ;
  - tests industriels (ouvrages réels).

# Des tests pour valider les logiciels

- Tests numériques élémentaires (vérifications)
- Tests théoriques (solutions « complètes »)
- Tests théoriques (solutions « incomplètes »)
- Comparaisons entre logiciels de calcul
- Comparaisons avec des expériences en laboratoire
- **Comparaisons avec des expériences in situ**

# Tests numériques élémentaires

Vérifications de la programmation :

- « Quantités » calculées par élément
- Assemblage des matrices et des vecteurs
- Résolution d'un système linéaire, etc.
- Algorithmes de résolution en comportement non linéaire
- Intégration locale d'une loi de comportement
- Stabilité des schémas d'intégration dans le temps

# « Entrées » d'un test pour un logiciel

1. Le modèle d'espace (déformation plane, axisymétrique, tridimensionnelle, contrainte plane).
2. Type d'élément fini (massif 2D : T3, T6, Q4, Q8 ; massif 3D : H8, H20, H27, P6, P15, P18, T4, T10 ; poutres ; plaques ; coques ; interfaces).
3. La finesse du maillage.
4. La loi de comportement : élasticité (linéaire isotrope ou anisotrope, non linéaire, variable avec  $z$  ; plasticité sans ou avec écrouissage).
5. La loi de chargement : pas de temps, incréments.
6. La méthode de résolution itérative.
7. La reprise des calculs (phasage).

# Trois notions de convergence

## Convergence au sens du maillage

Elle est assurée par le choix et la formulation mathématique des éléments finis. Lorsque le maillage devient de plus en plus fin, la solution numérique tend vers une limite très proche de la solution exacte du problème.

## Convergence au sens du processus de résolution incrémental et itératif

Elle permet d'obtenir la solution en déplacements et en contraintes pour un maillage et un schéma d'intégration des lois de comportement non linéaire donnés.

## Convergence au sens du schéma d'intégration locale

Elle permet le calcul des contraintes et des quantités non linéaires (déformation plastique, écrouissage) vérifiant la loi de comportement.

# Le nombre de tests nécessaire

- Dans un système à  $m$  entrées et  $n$  sorties ayant respectivement  $a_1, a_2, \dots, a_m$  et  $b_1, b_2, \dots, b_n$  possibilités, le nombre de scénarios d'emploi possibles est

$$(b_1 \times b_2 \times \dots \times b_n)^{a_1 \times a_2 \times \dots \times a_m}$$

- Face à un tel nombre, le problème est de trouver les « bons » tests.
- Il faut donc une stratégie de construction des tests de validation fondée sur une connaissance approfondie des possibilités d'emploi du logiciel. Mais il faut également construire un ensemble de scénarios aussi représentatifs que possible des besoins des utilisateurs : cela peut se traduire par des fascicules d'exemples.

# Référentiel de tests

- Travail fondamental, long et coûteux :
  - maintenance et documentation, chaque test doit être décrit avec soin.
- Régularité des passages de tests (pour un logiciel en évolution).
- Certains experts ont estimé que, si l'activité de programmation compte pour environ 15 à 20 % dans l'effort de développement d'un logiciel, la vérification et la validation peuvent en représenter de l'ordre de 40%.
- **La maîtrise du processus de test est le garant de la qualité d'un logiciel.**

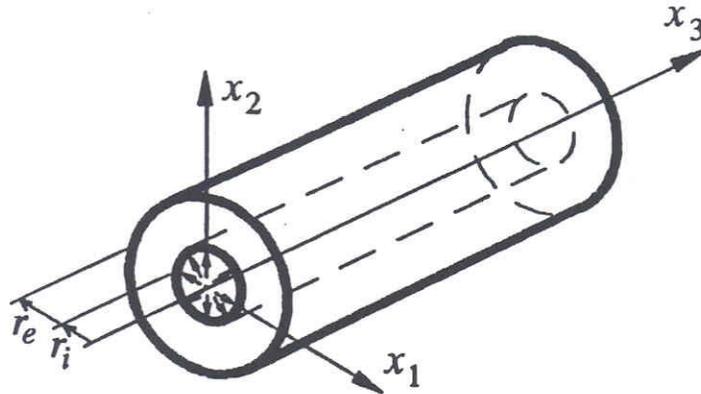
# Référentiel de tests

- Le nombre de tests croît avec les possibilités du logiciel :
  - ANSYS (5 000 tests) ;
  - Code\_Aster (1 400 tests) ;
  - CESAR-LCPC (200 tests, en cours de construction).
- Couverture documentaire :
  - Code\_Aster (10 000 pages) ;
  - CESAR-LCPC (2 000 pages).
- Références dans les publications :
  - CESAR-LCPC (340 publications, dont 94 articles de revues, au 31/12/2000).

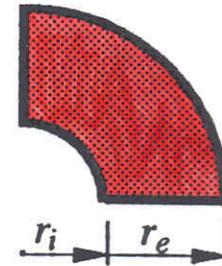
Type de solution	Ouvrages	Références
Solutions complètes en élasticité linéaire isotrope	Sollicitation sur un massif semi-infini	Poulos et Davis (1974) ; Giroud (1972) ; Selvadurai (1979)
	Fondations superficielles	Burminster (1943) ; Giroud (1972) ; Poulos et Davis (1974) ; Selvadurai (1979)
	Fondations profondes	Buttfield et Banerjee (1971) ; Poulos et Davis (1974) ; Poulos et Davis (1980) ; Fleming et al. (1992)
	Remblais et pentes	Giroud (1972) ; Osterberg (1957) ; Poulos et Davis (1974)
	Ouvrages souterrains	Kirsch (1898) ; Mindlin (1940) ; Bouvard-Lecoanet et al. (1988)
	Ouvrages souterrains	Mindlin (1940) ; Sagaseta (1988) ; Sagaseta et Uriel (1989) ; Einstein et Schwartz (1979) ; Poulos et Davis (1974)
	Soutènements	Finn (1963) ; Baladi (1968) ; Poulos et Davis (1974) ; Winterkorn et Fang (1975)
	Milieu 1D	Terzaghi (1923)
	Milieu 2D	Mandel (1953) ; Cryer (1963) ; Gibson et McNamee (1963) ; Schiffmann et al. (1969) ; Sills (1975) ; Randolph et Wroth (1979) ; Booker et Small (1982, 1985, 1987)
	Drains	Barton (1947) ; Hansboo (1981)
Solutions incomplètes : charges limites exactes	Fondations superficielles	Prandtl (1921) ; Button (1953) ; Cox et al. (1961) ; Davis et Booker (1973) ; Chen (1975) ; Matar et Salençon (1979) ; Meyerhof (1982) ;
	Fondations superficielles	Meyerhof (1982) ; Chen (1975) ; Jiang (1992) ; Garnier (1995)
Solutions incomplètes approchées : bornes supérieure et inférieure (l'encadrement est plus ou moins important selon les cas traités)	Fondations profondes	Meyerhof (1982) ; Griffiths (1982) ; Randolph et Houlsby (1984)
	Ouvrages souterrains	Atkinson et Potts (1977) ; Davis et al. (1980) ; Britto et Kusakabe (1985) ; Leca et Dormieux (1990) ; Leca et Panet (1988) ; Sloan et Assadi (1993) ; Chambon et Corté (1991) ; Antao (1997)
	Soutènement (Excavations)	Salençon (1983) ; Britto et Kusakabe (1983, 1984) ; Bakker et Vermeer (1986) ; Bakker et Bringre (1991)

Comportement	Ouvrages	Références
Elasticité linéaire isotrope	Fondations superficielles	Bescond et al. (1974)
Elastoplasticité parfaite	Remblais et pentes	Clough et Woodward (1967)
	Fondations superficielles	Zienkiewicz et al. (1969, 1975) ; de Borst (1982) ; Griffiths (1982a ; 1982b) ; Casciaro et Cascini (1982) ; Sloan et Randolph (1982) ; de Borst et Vermeer (1984) ; Mahapatra et Dasgupta (1988, 1990, 1991) ; van Langen et Vermeer (1990) ; Jiang (1992) ; Mestat (1993)
	Fondations profondes	Griffiths (1982c) ; de Borst et Vermeer (1982) ; Randolph et Houlsby (1984) ; Tadjbakhsh et Frank (1985) ; Lane et Griffiths (1988) ; van Langen et Vermeer (1990) ; Chaoui (1992) ;
	Remblais et pentes	Zienkiewicz et al. (1975) ; Smith et Griffiths (1982) ; Lépidas et Magnan (1990) ; Mestat (1993) ; Smith (1994) ; Sassi (1996)
Consolidation (élastoplasticité parfaite)	Ouvrages souterrains	Mestat (1993) ; Atahan (1995)
	Ouvrages de soutènement	Christian et al. (1977) ; Smith et Griffiths (1982) ; Smith (1994) ; Arafati (1996)
	Milieu 1D (expansion cylindriques)	Nahra et Frank (1985)

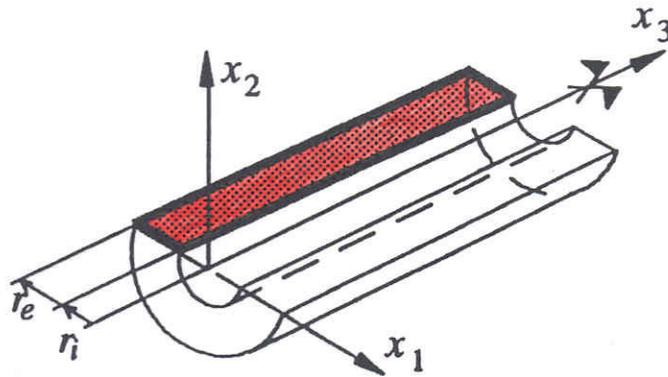
# Un excellent problème théorique...



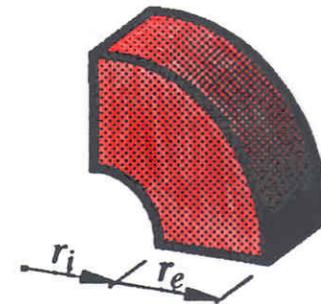
Problème de l'expansion  
d'une cavité cylindrique



Modélisation plane



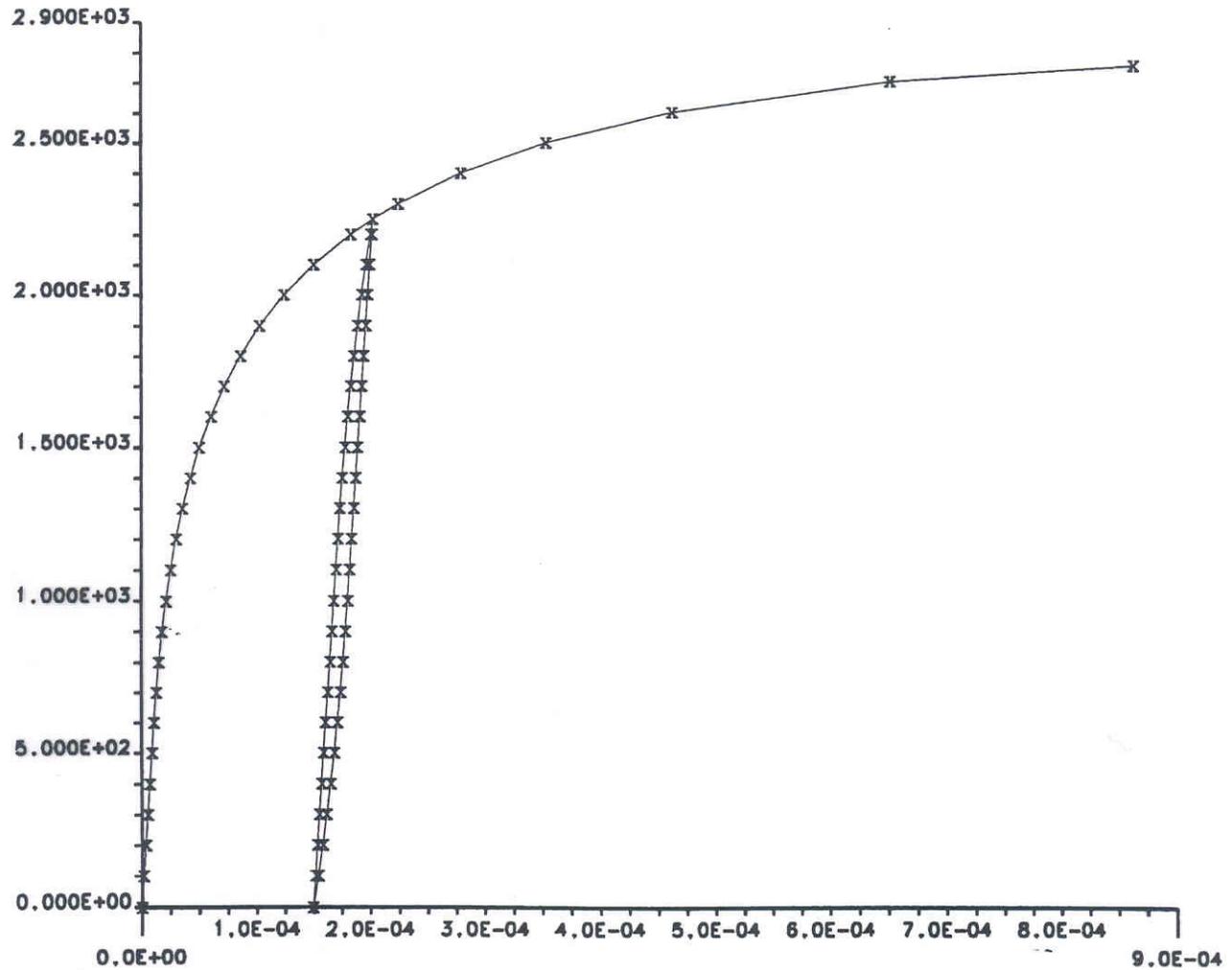
Modélisation axisymétrique



Modélisation tridimensionnelle

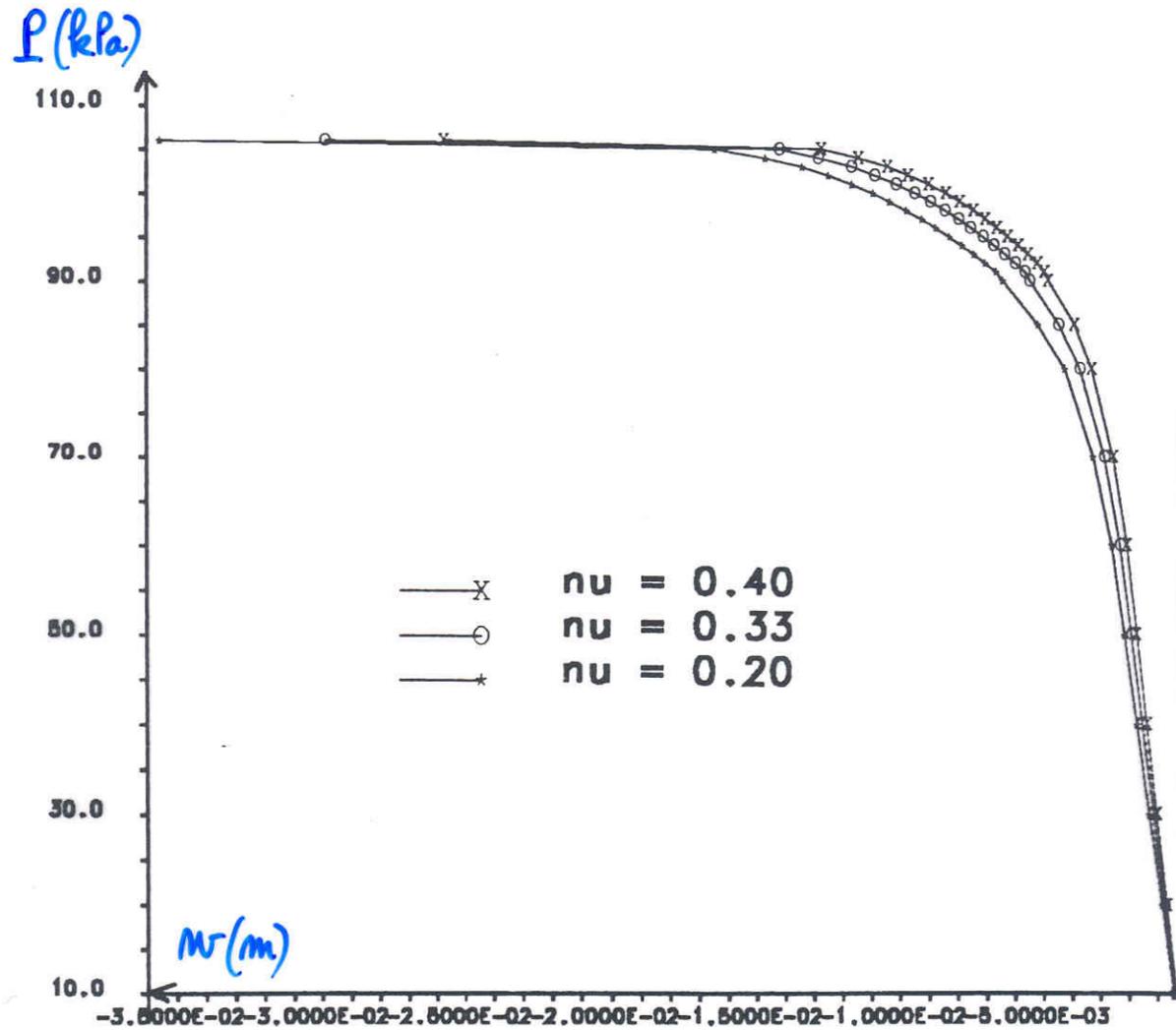
Solutions : élasticité linéaire (iso. et aniso.), élastoplasticité (Tresca, Mohr-Coulomb)

# Expansion d'une cavité cylindrique avec un cycle

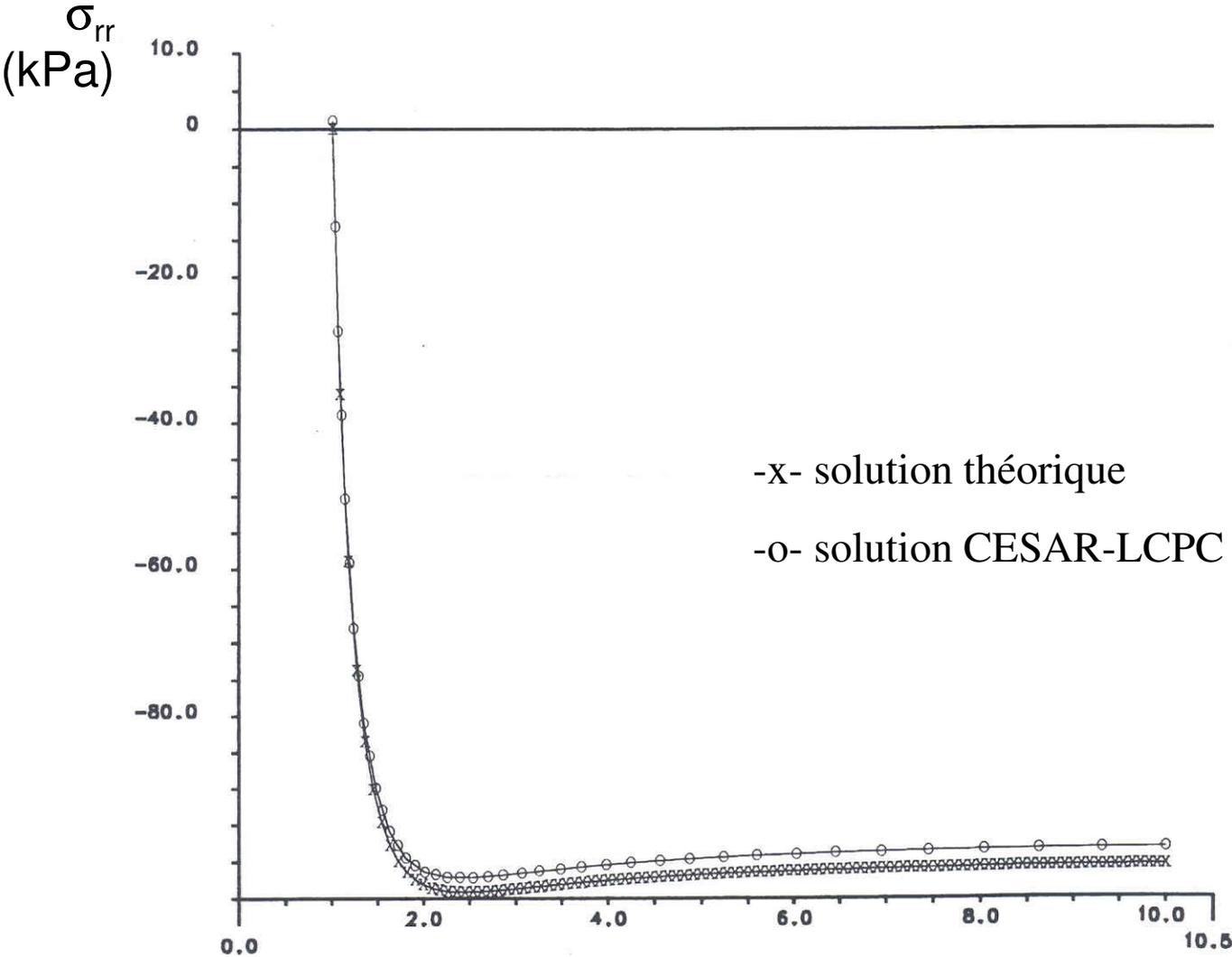


Critère de  
Tresca

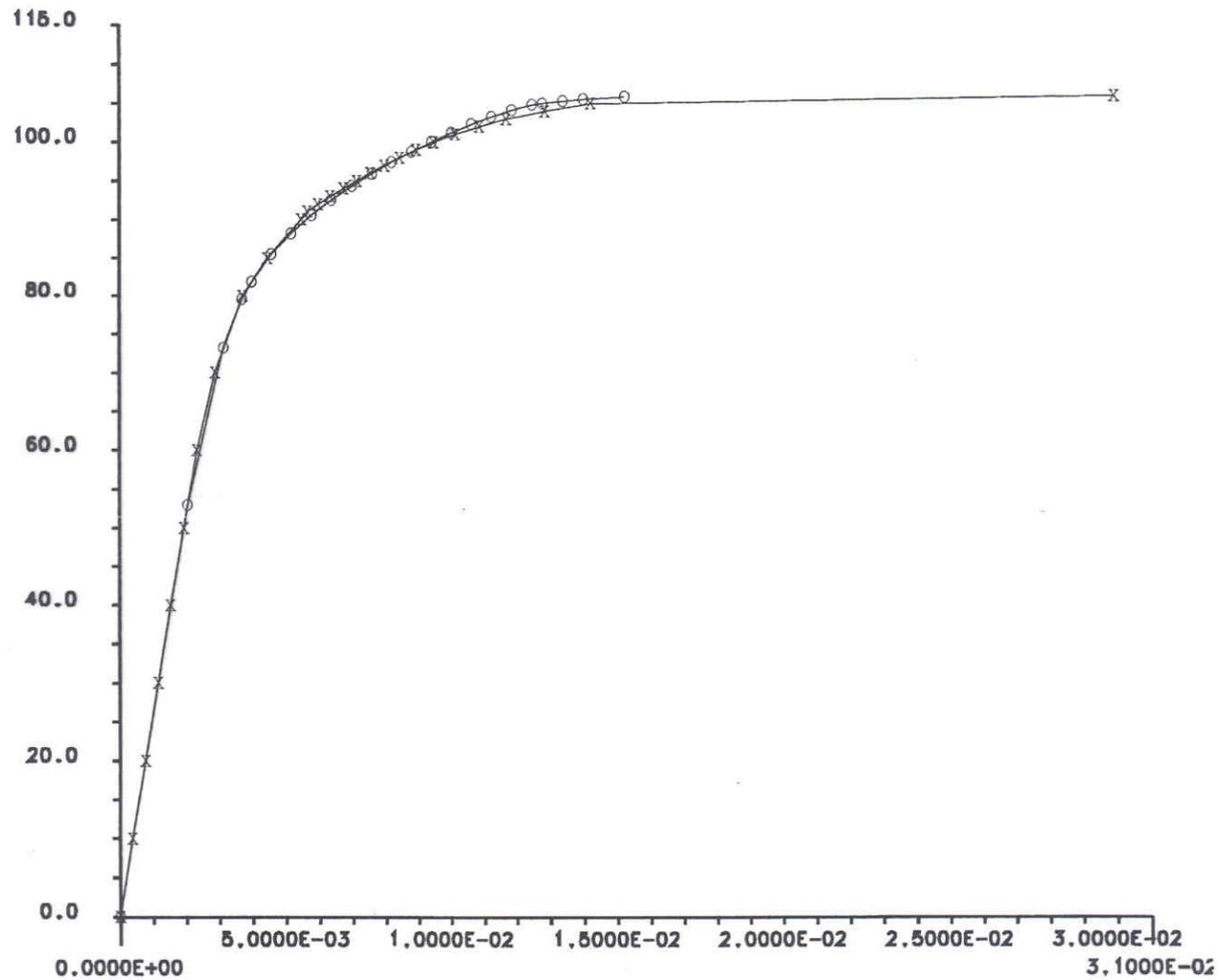
# Chargement d'une fondation superficielle



# Comparaison avec la solution théorique de Kirsch (1898)



# Comparaison entre logiciels : CESAR-LCPC et PLAXIS



# Validation et ouvrages in situ

- Cette fois, on ne valide plus seulement le logiciel en tant que tel mais **simultanément** on valide plusieurs aspects qui sont :
  - les équations de la mécanique ;
  - les lois de comportement des matériaux ;
  - la manière de déterminer les paramètres ;
  - les hypothèses de calcul ;
  - les algorithmes de résolution.
- Un critère de validation doit tenir compte du triplet « **logiciel - théories – utilisateur** ».

# Quelques difficultés pour vérifier...

- Tests visuels pour les pré- et post-processeurs.
- On dispose de peu de solutions théoriques ou de référence (notamment dans le cas de l'interaction sol-structures).
- Les résultats mesurés et calculés sont entachés d'incertitudes liées :
  - à l'**instrumentation** ;
  - aux valeurs des **paramètres** de calcul ;
  - aux méthodes de résolution approchées ;
  - aux **hypothèses** simplificatrices nécessaires pour élaborer le modèle et réaliser le calcul.

# Validation : cas de référence

- À cause des nombreux facteurs d'incertitude, les expérimentations de référence utilisables à des fins de validation demeurent rares.
- La complexité de la construction, l'influence du phasage des travaux (battage, fonçage, etc.), les conditions hydrauliques, ou encore le comportement véritablement tridimensionnel (inclusions, intersection de structures) sont autant de problèmes qui empêchent de maîtriser les conditions d'une expérimentation pour qu'un modèle puisse décrire quantitativement le comportement mesuré.

# Les concours de prévisions

Workshops « Rhéologie des sols : essais de laboratoire »

Workshops « Prévisions de comportement d'ouvrages réels »

- fondations superficielles ;
- remblais sur sols compressibles ;
- ouvrages souterrains et cavités souterraines ;
- soutènements (rideaux de palplanches, paroi moulée).

Exercice : du plus « simple » au plus « complexe » ?

La justification vient alors se mêler étroitement à la validation.

**Mais seule l'expérimentation a le pouvoir de confirmer (vérifier) ou de rejeter les hypothèses de calcul.**

# Benchmark de Hochstetten (1994)

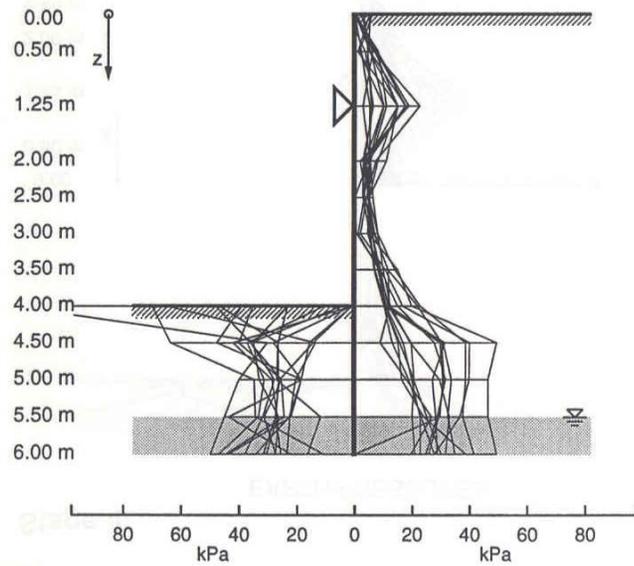
- Méthode des éléments finis :
  - 18 prévisions proposées.

# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

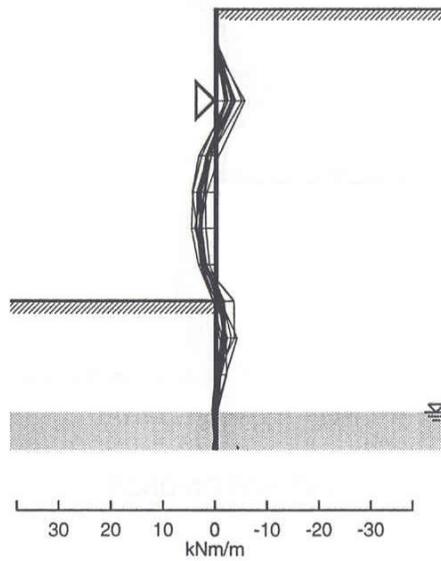
Results of the FEM-predictions for the sheetpile field test in Hochstetten

Stage I

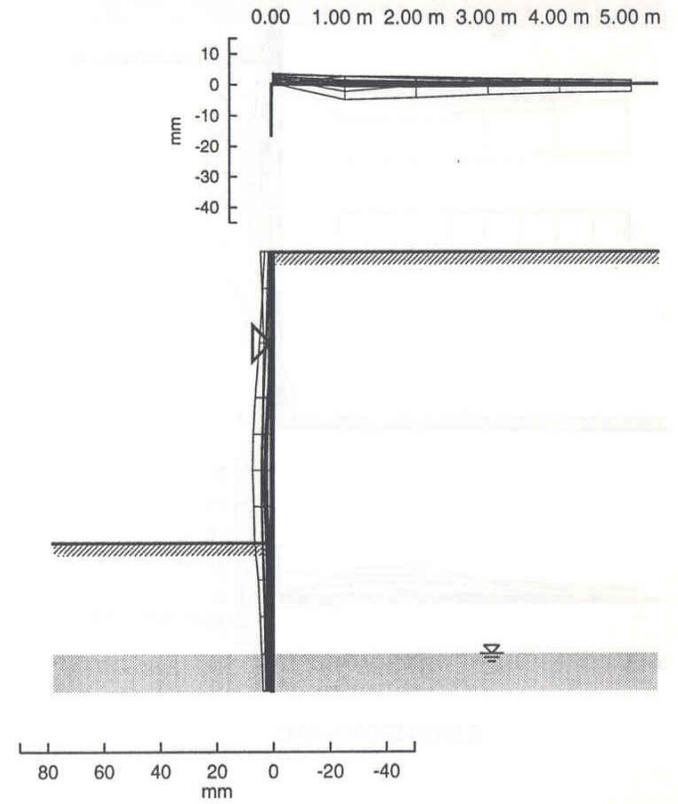
EARTH PRESSURES



BENDING MOMENTS



DISPLACEMENTS



# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

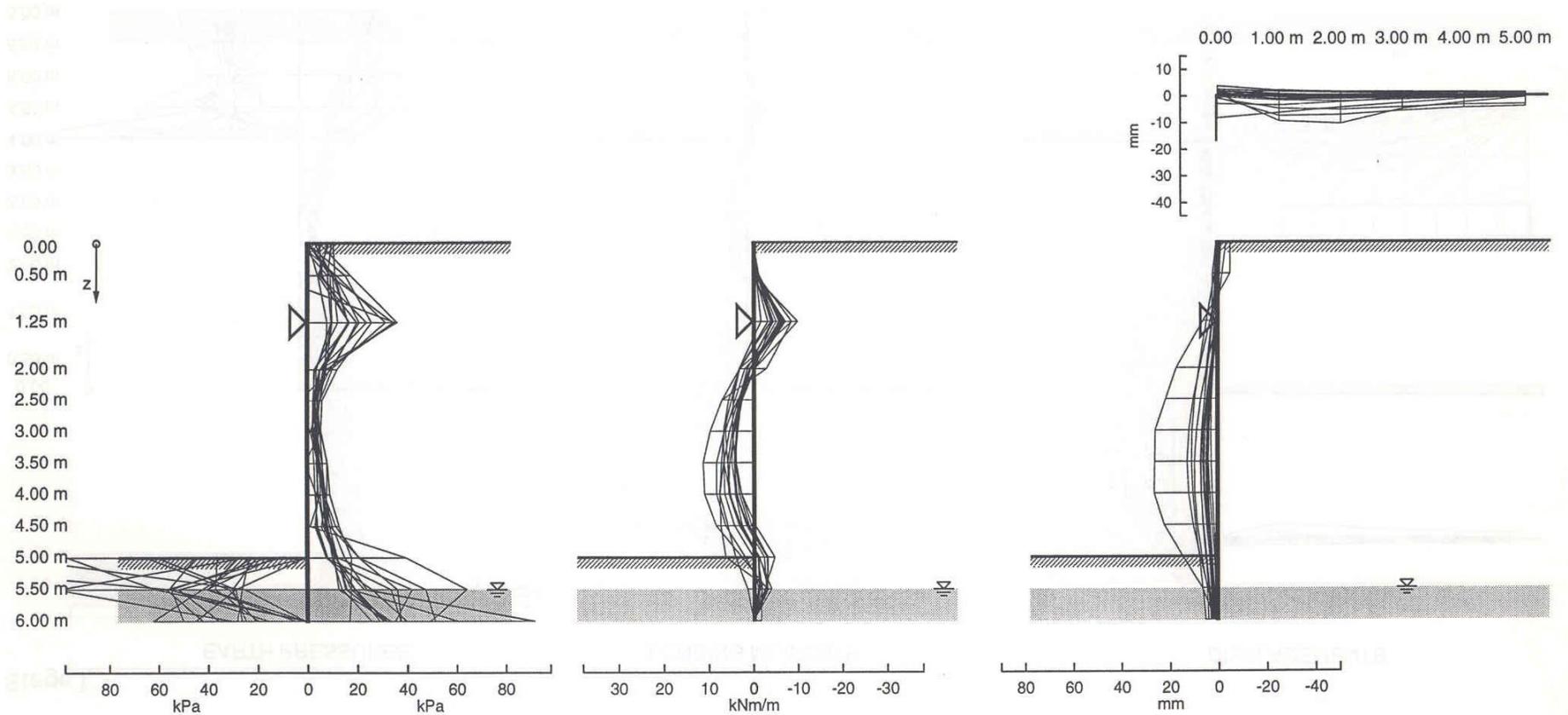
Results of the FEM-predictions for the sheetpile field test in Hochstetten

Stage II

EARTH PRESSURES

BENDING MOMENTS

DISPLACEMENTS

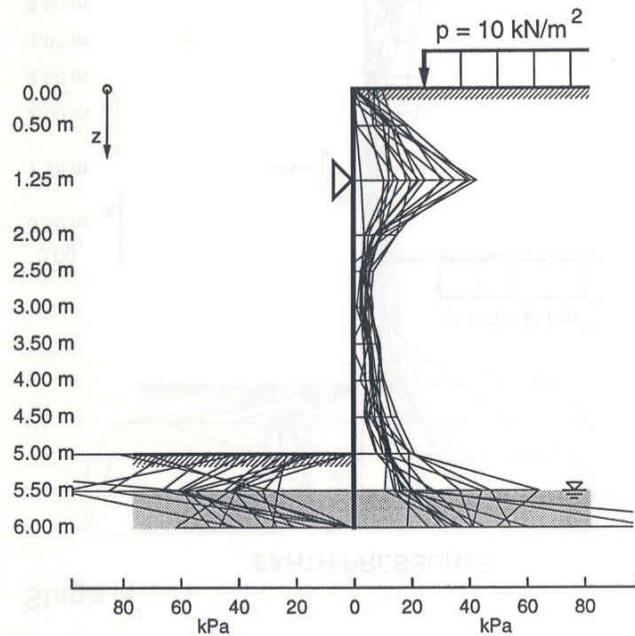


# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

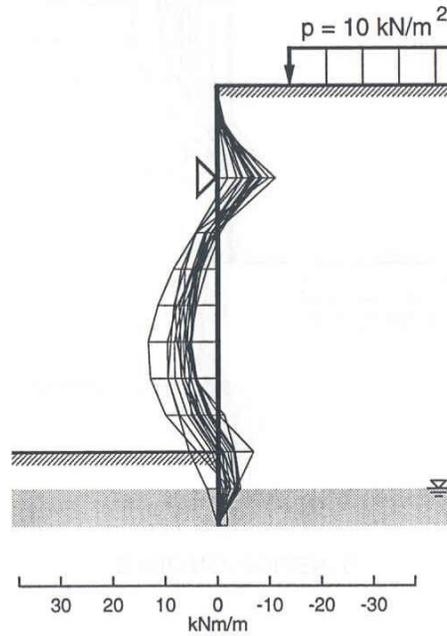
Results of the FEM-predictions for the sheetpile field test in Hochstetten

## Stage III

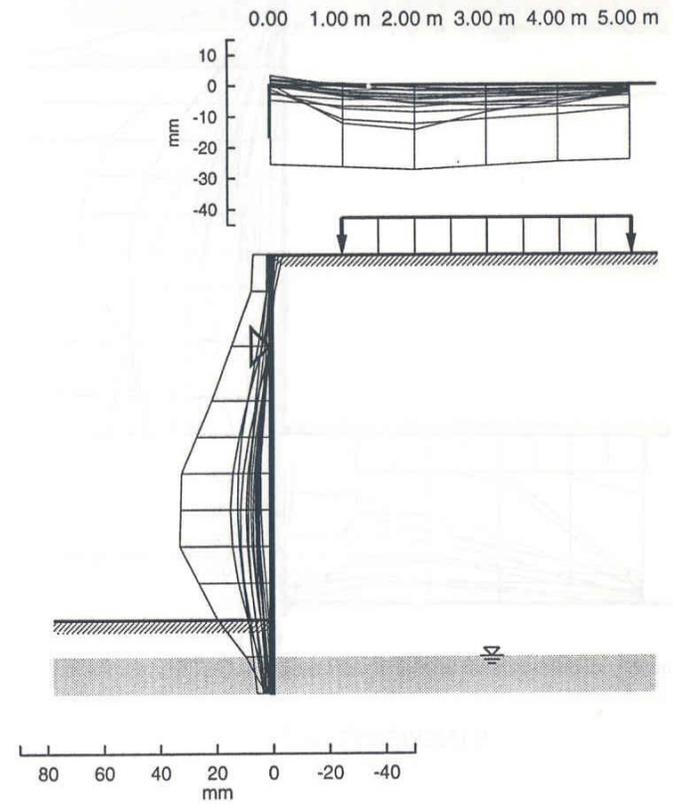
### EARTH PRESSURES



### BENDING MOMENTS



### DISPLACEMENTS



# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

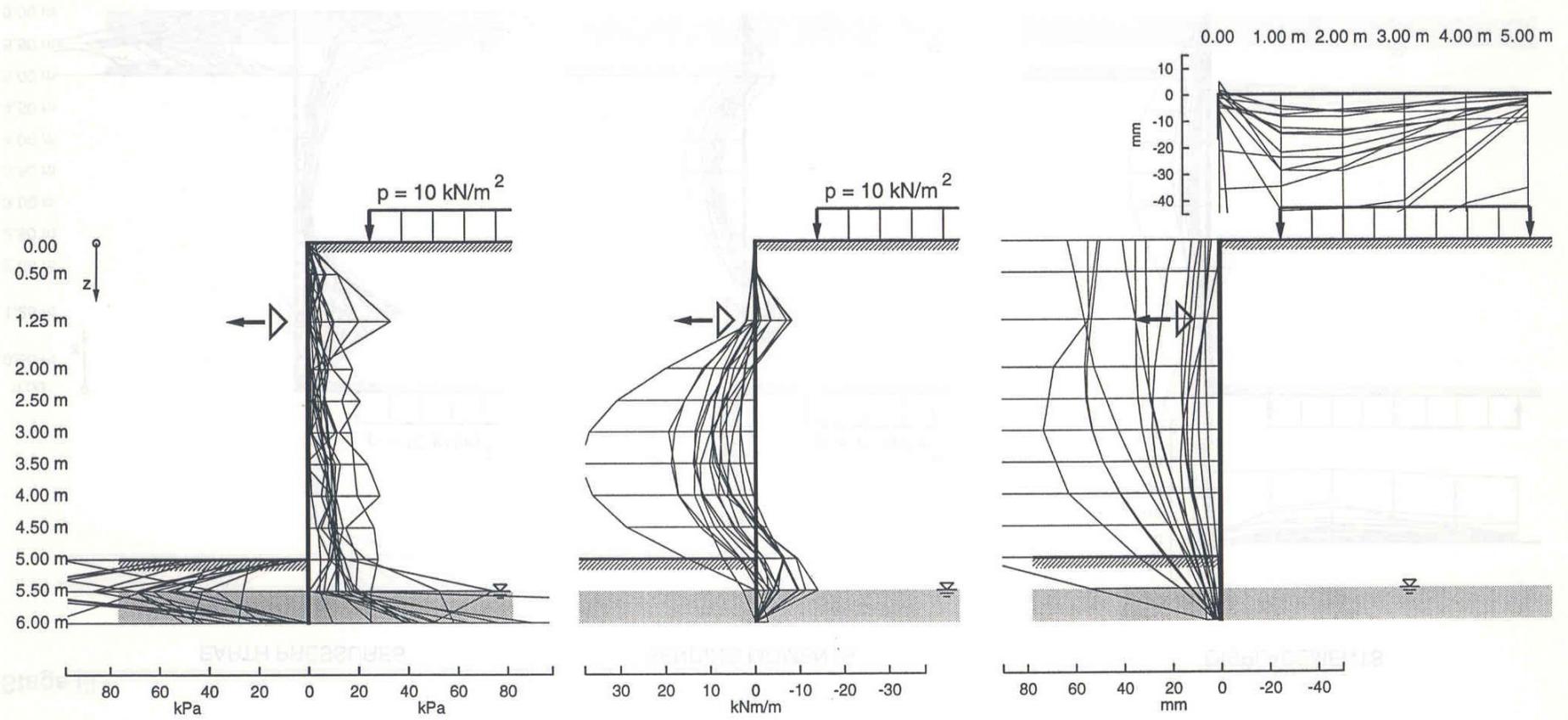
Results of the FEM-predictions for the sheetpile field test in Hochstetten

Stage IV

EARTH PRESSURES

BENDING MOMENTS

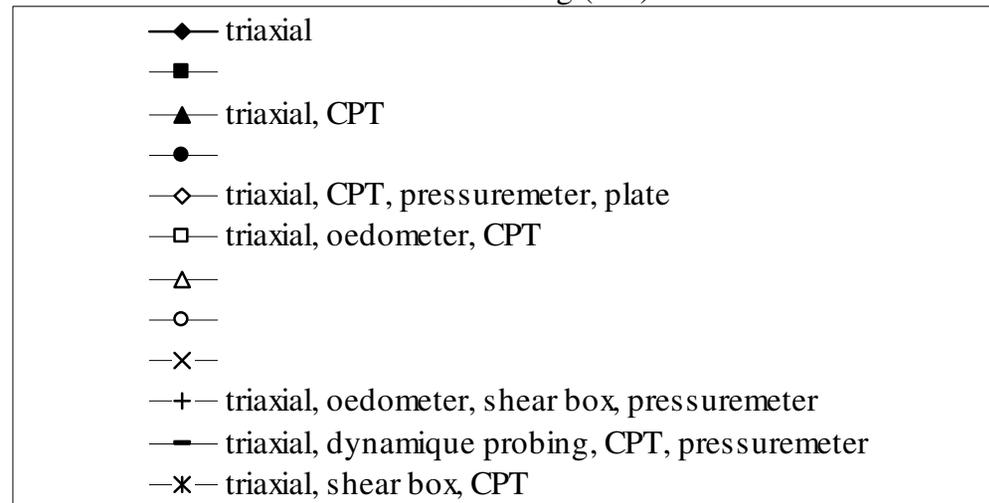
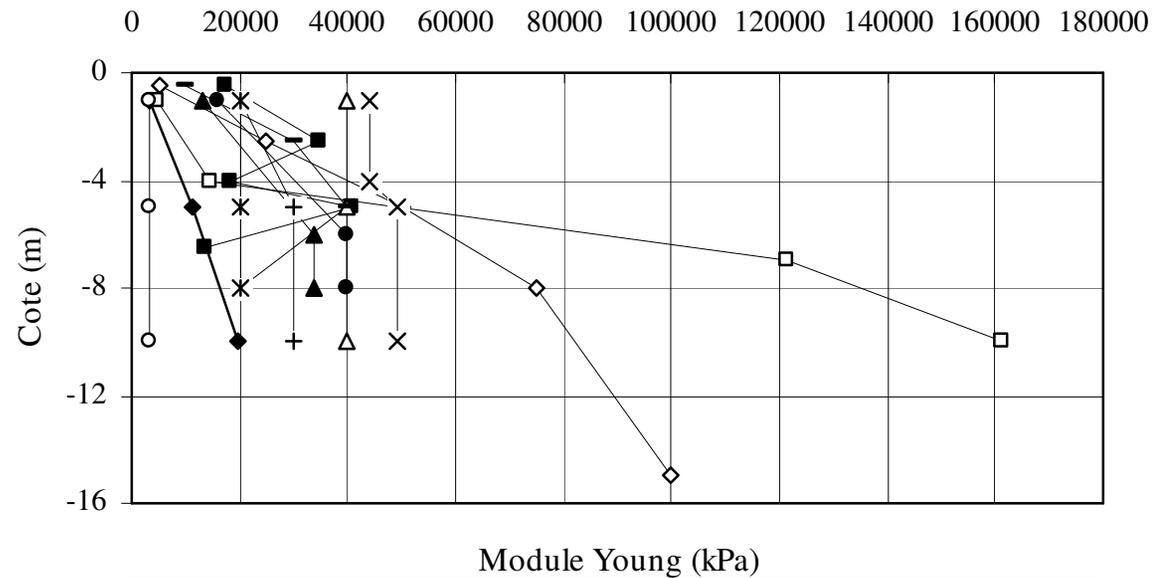
DISPLACEMENTS



## Benchmark d'Hochstetten

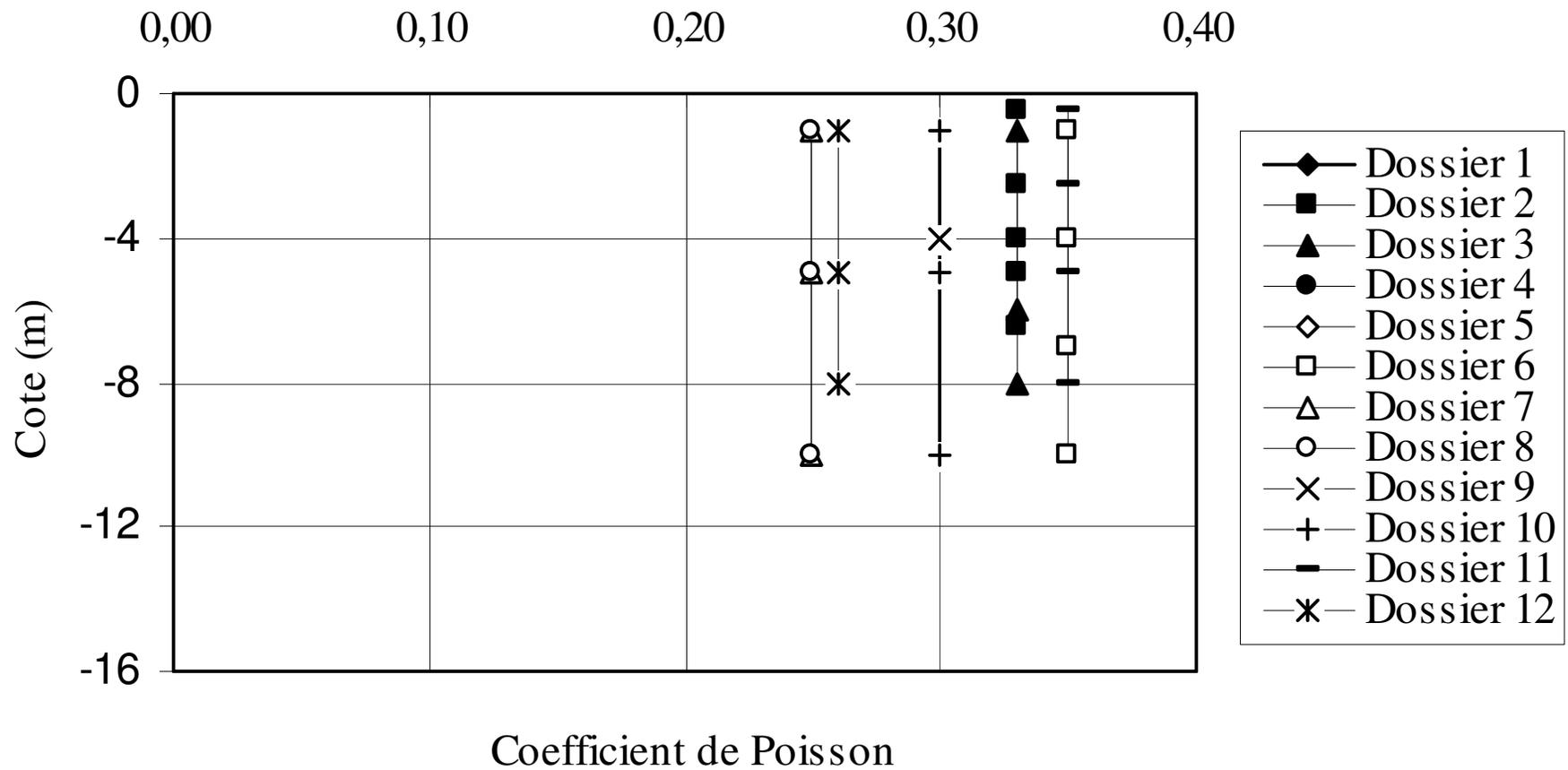
Module d'Young en fonction de la profondeur et des types d'essais considérés

(la profondeur de fiche du rideau est égale à 6 m)



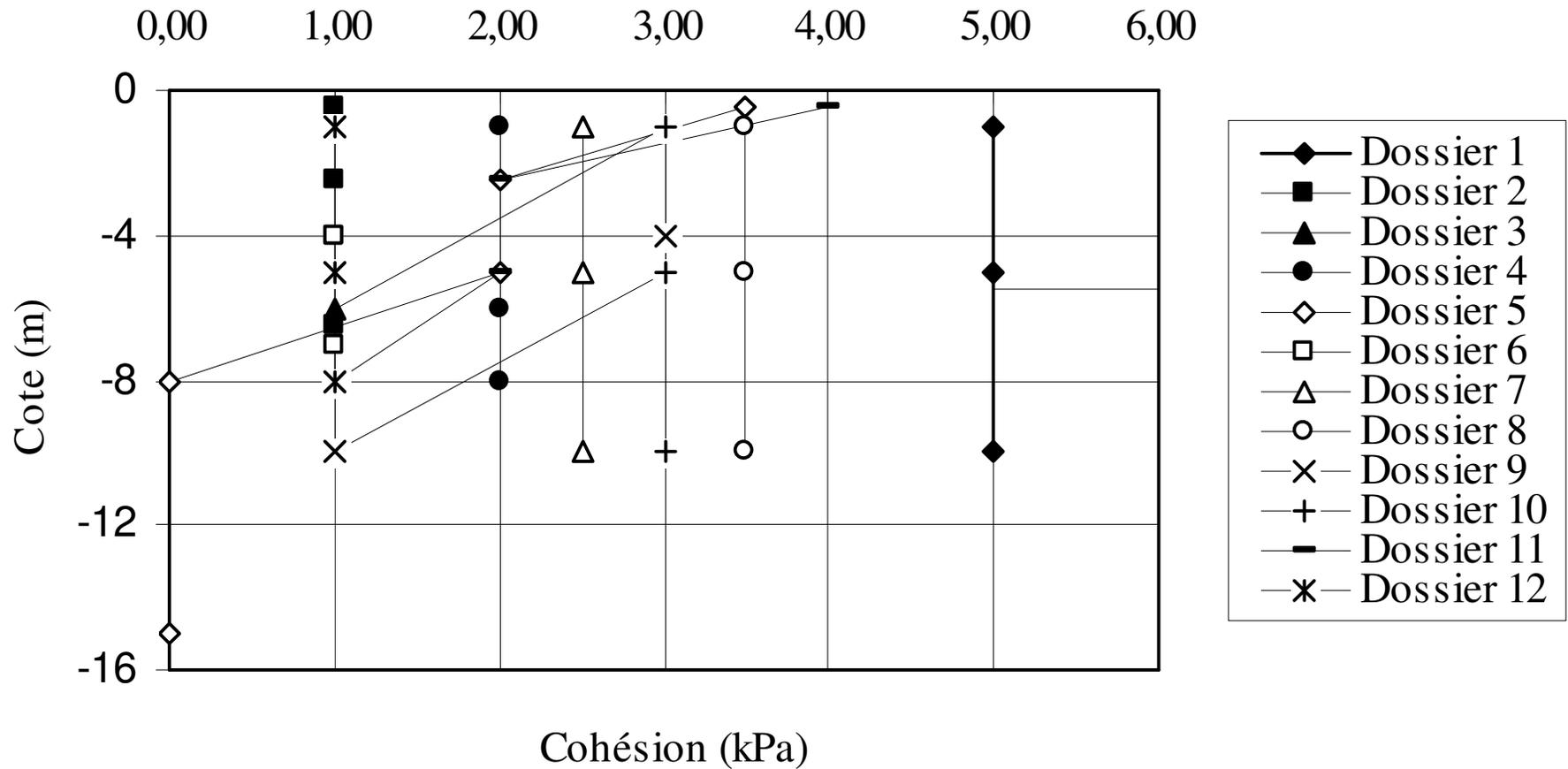
## Benchmark de Hochstetten

Coefficient de Poisson en fonction de la profondeur



## Benchmark de Hochstetten

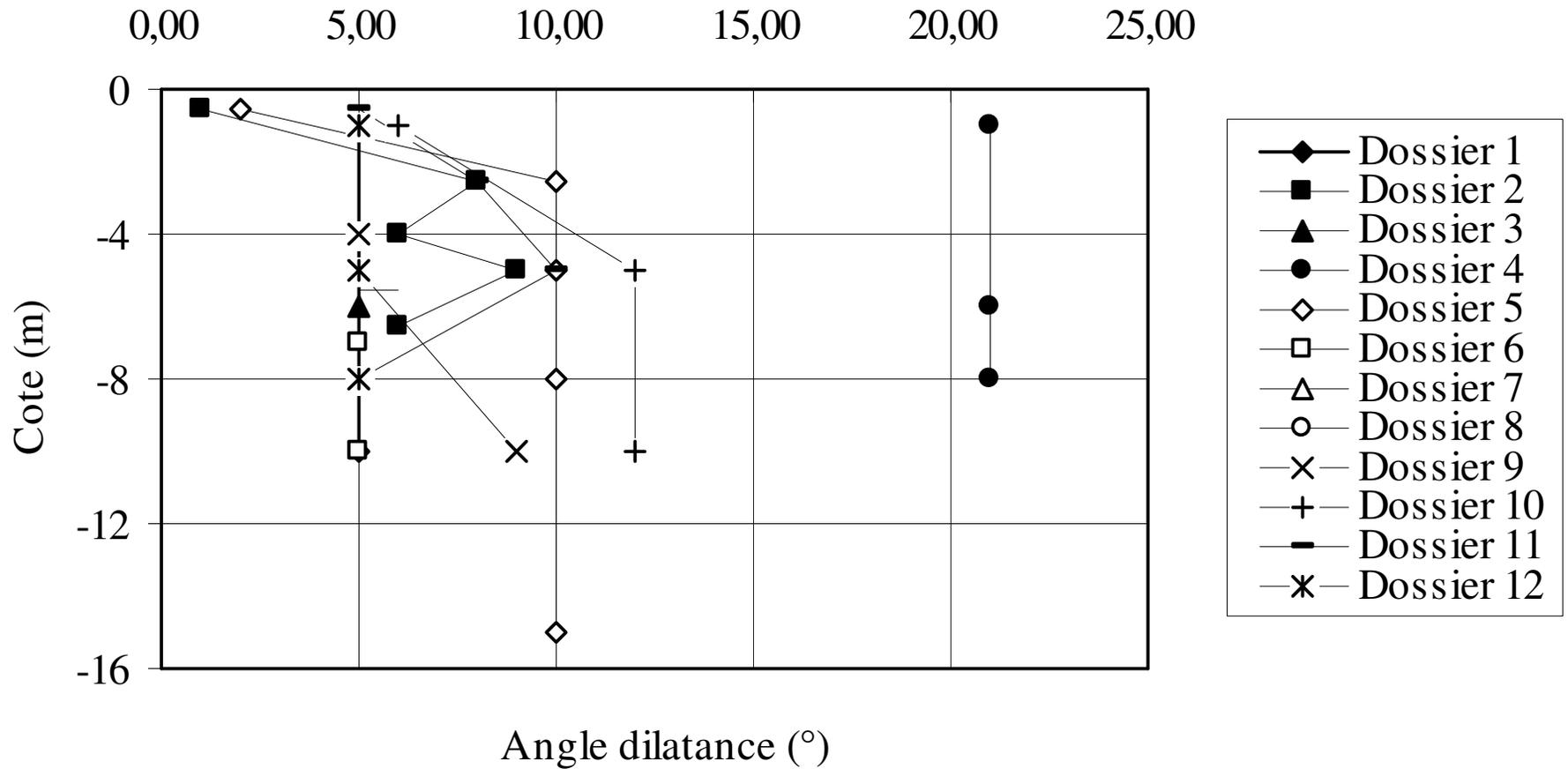
Cohésion effective en fonction de la profondeur





## Benchmark de Hochstetten

Angle de dilatance en fonction de la profondeur



## Benchmark de Hochstetten (1994)

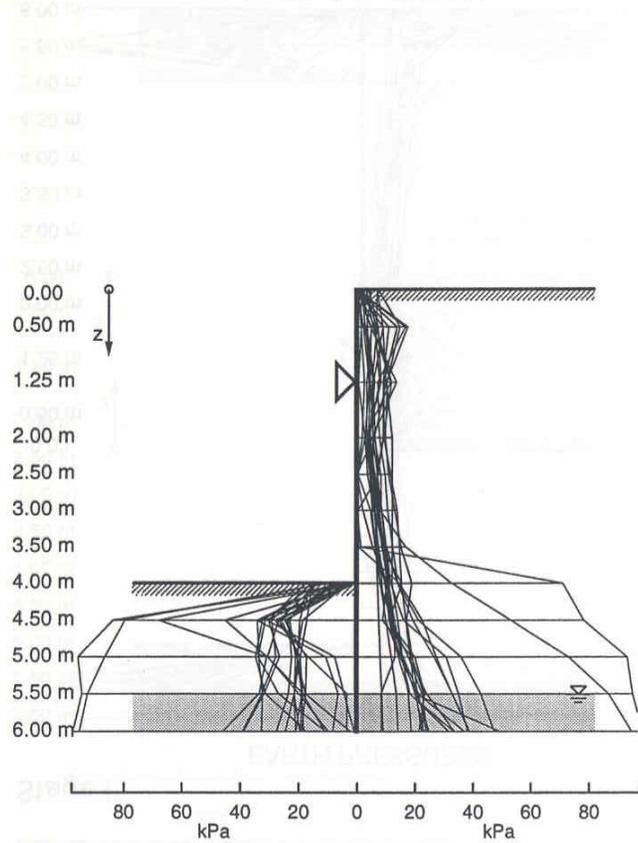
- Méthode de calcul au module de réaction :
  - 23 prévisions proposées.

# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

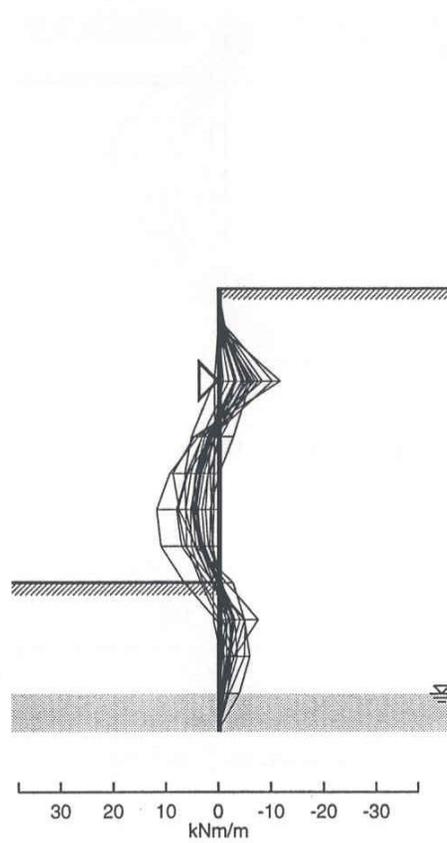
Results of the predictions by using subgrade reaction methods for the sheetpile field test in Hochstetten

## Stage I

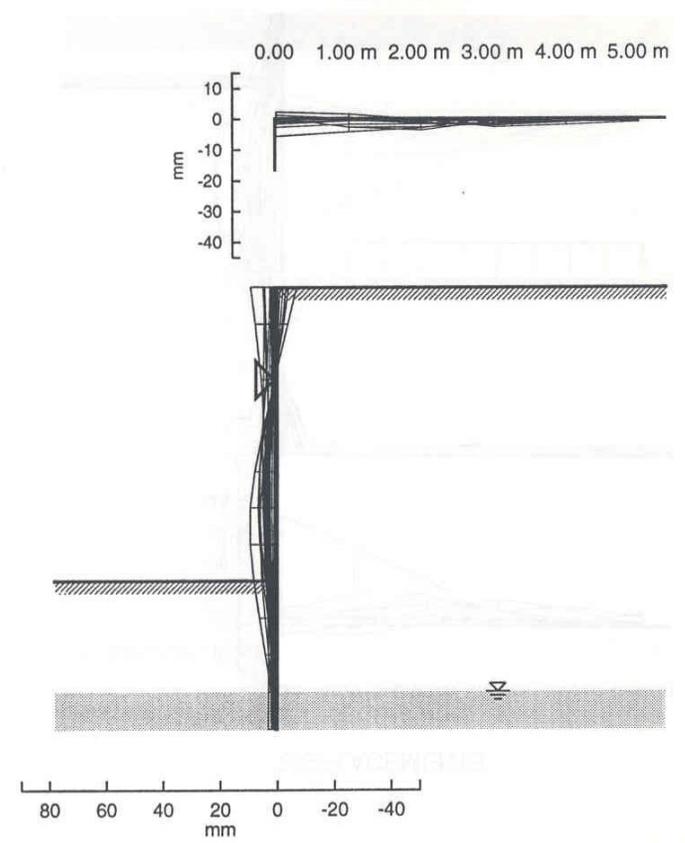
EARTH PRESSURES



BENDING MOMENTS



DISPLACEMENTS

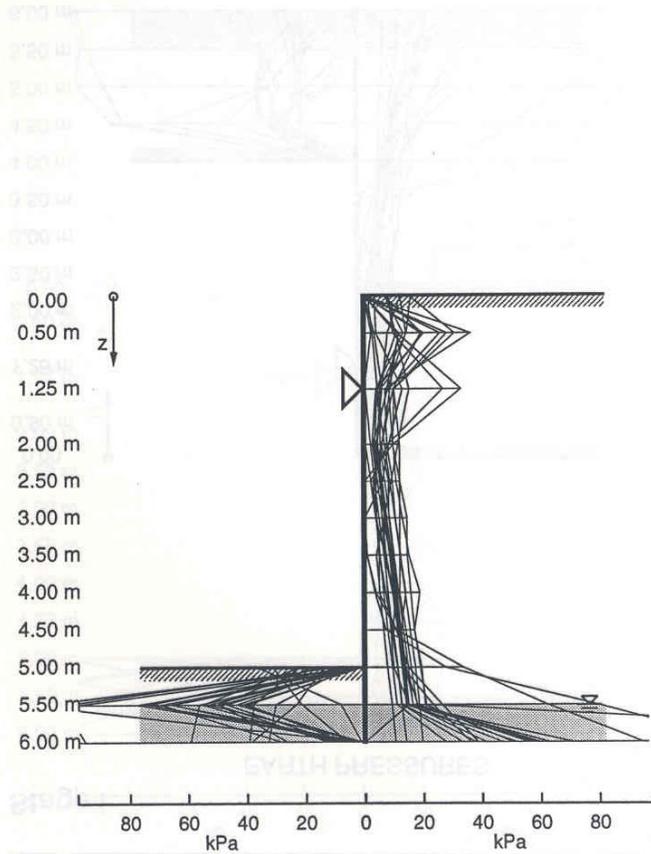


# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

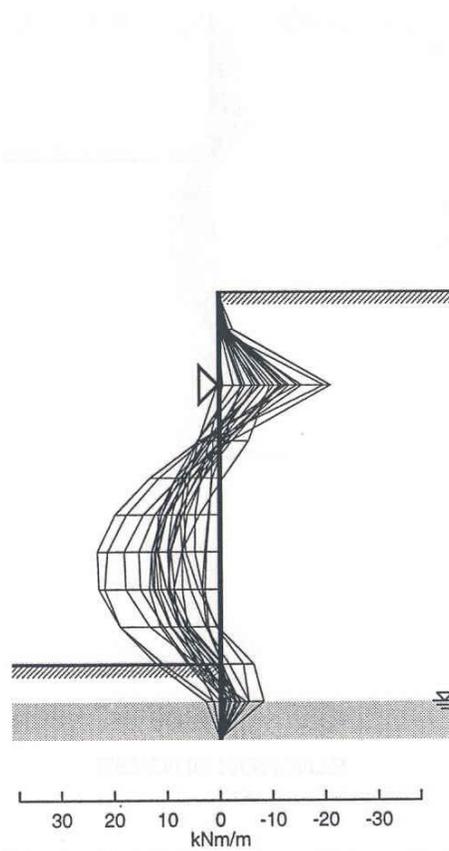
Results of the predictions by using subgrade reaction methods for the sheetpile field test in Hochstetten

## Stage II

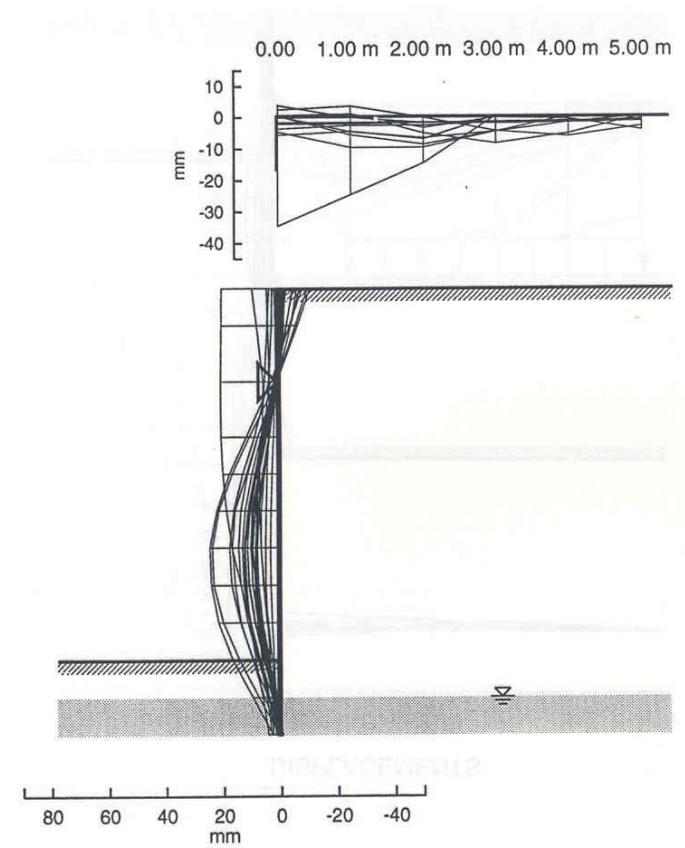
EARTH PRESSURES



BENDING MOMENTS



DISPLACEMENTS

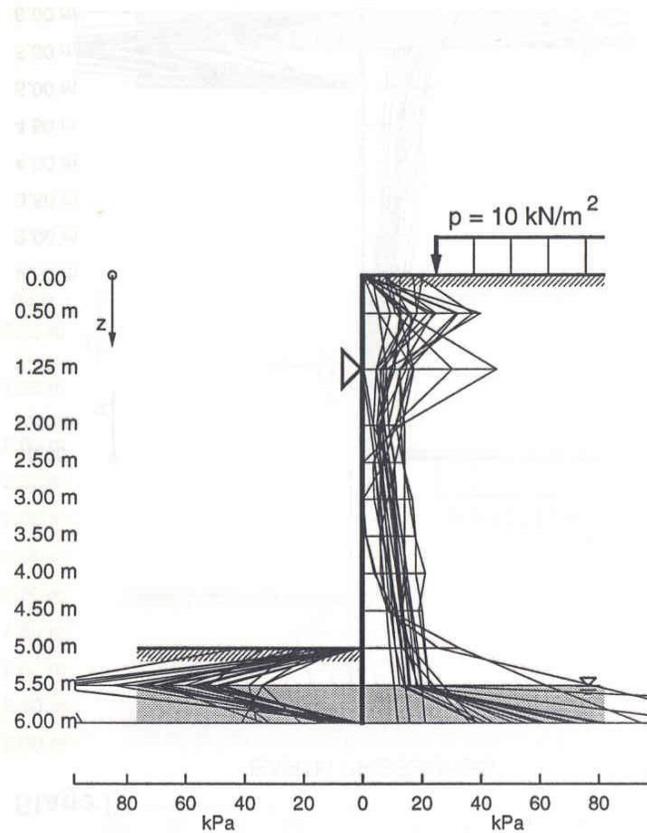


# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

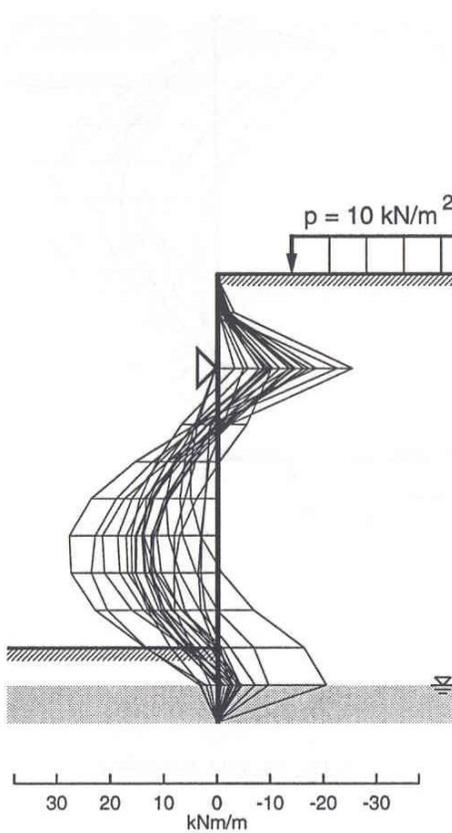
Results of the predictions by using subgrade reaction methods for the sheetpile field test in Hochstetten

## Stage III

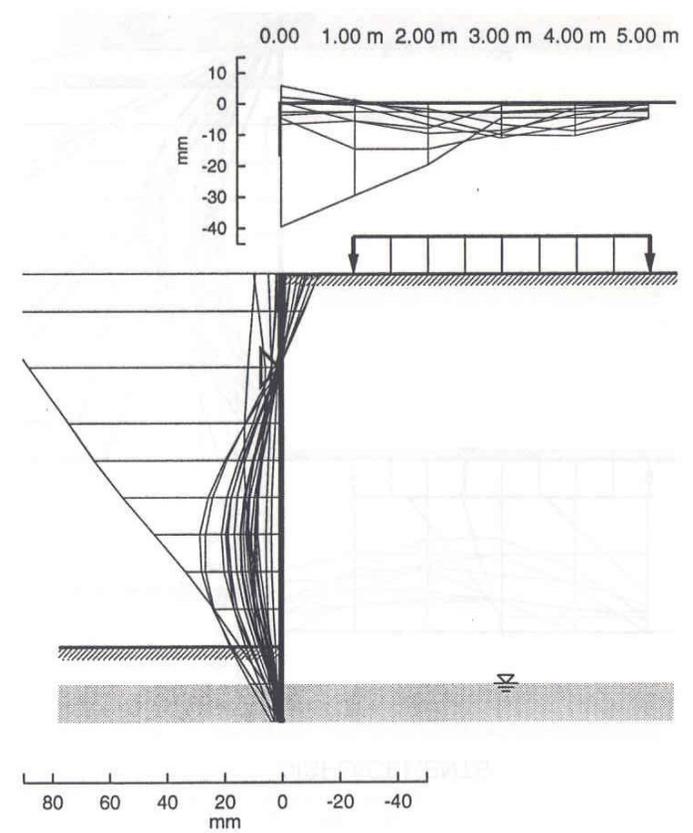
EARTH PRESSURES



BENDING MOMENTS



DISPLACEMENTS

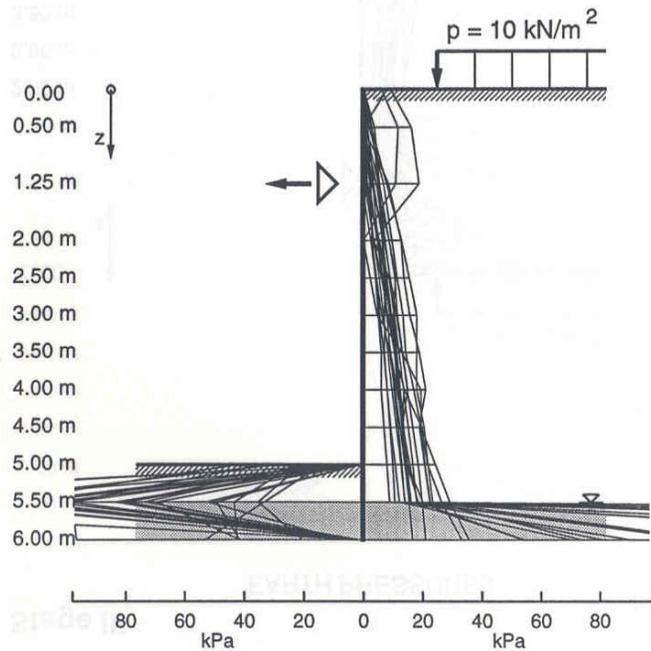


# Concours de prévisions (Rideau de Hochstetten)

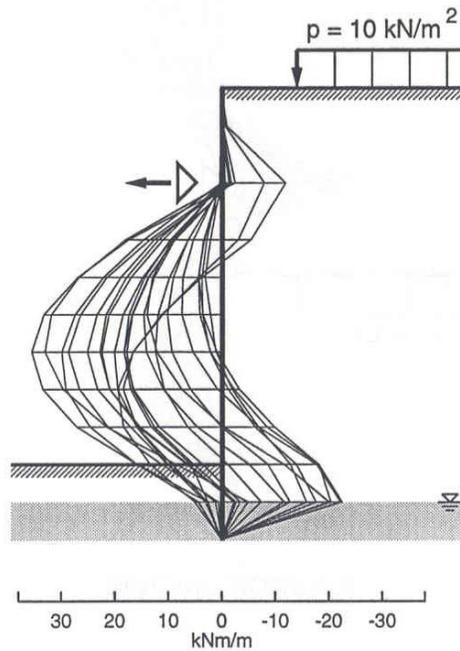
Results of the predictions by using subgrade reaction methods for the sheetpile field test in Hochstetten

## Stage IV

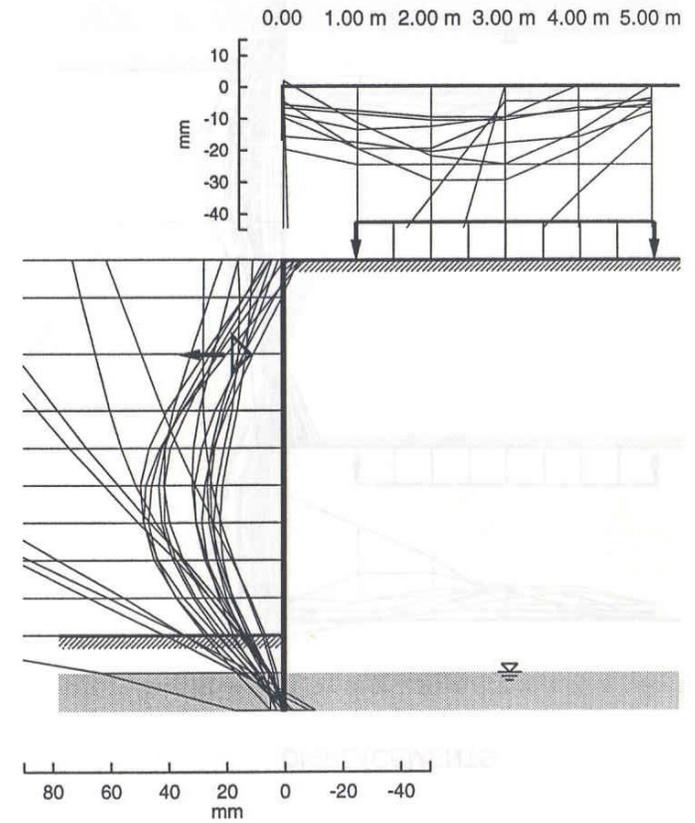
EARTH PRESSURES



BENDING MOMENTS



DISPLACEMENTS

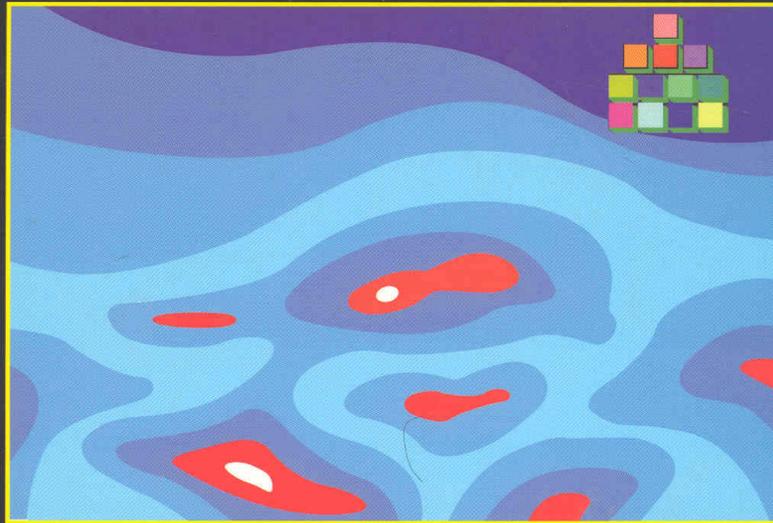


## « Validation » : quelques travaux

- Travaux du GRECO (1989 et 1995)
- Recueil de tests de l'AFNOR - calcul des structures (1991)
- Commission Internationale des Grands Barrages (1993)
- NAFEMS (1994)
- Rapport de I. Smith (ISSMFE, 1994)
- Rapport de J.M. Duncan (ISSMFE, 1994)
- ISSMFE : Technical Committee n° 12 (?)
- Organisation de Benchmarks internationaux
- Groupe de travail SMGE allemand et autrichien
- Groupe de travail « A » de l'action COST C7 (2002)
- Groupe de travail du CFMS
- Base de données MOMIS (LCPC et EC Nantes)
- etc.

(1999)

AFPC – Emploi des éléments finis en génie civil



## Ouvrages en interaction

*sous la direction de*

Philippe Mestat et Michel Prat

*et avec le concours de*

Philippe Bisch

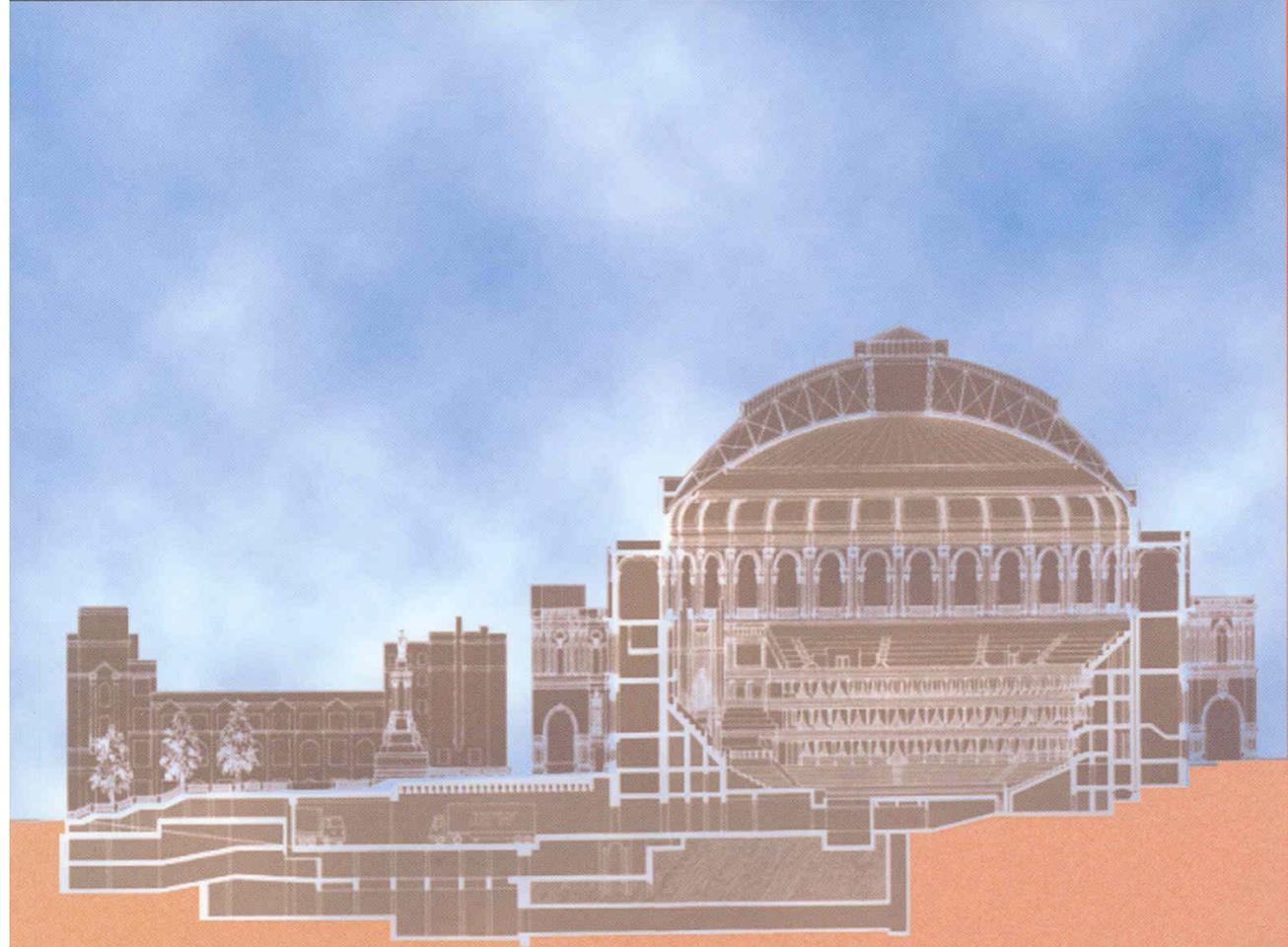
Alain Millard

Gilles Pijaudier-Cabot

hermes

**Publication  
récente  
(2003)**

# Guidelines for the use of advanced numerical analysis



# Qualification des utilisateurs

- 100 000 utilisateurs « qualifiés » dans le monde  
1,5 millions d'utilisateurs potentiels  
(estimations de la société MacNeal-Schwendler en 1994).
- Aujourd'hui, peut-être cinq fois plus ?  
La famille de logiciels STAAD revendique 110 000 utilisateurs et Ansys plus de 16 000 installations !

# Portrait d'un utilisateur qualifié

- Il doit :
  - savoir quel logiciel utiliser pour le type d'analyse souhaité ;
  - pouvoir mener à bien la modélisation d'un ouvrage ;
  - réaliser les calculs qui lui sont demandés avec diligence ;
  - connaître le logiciel manipulé et notamment les traitements numériques (dont ceux des « boîtes noires »).
- Il doit être également capable de :
  - porter un jugement critique sur les résultats soumis à son contrôle ;
  - estimer l'influence des paramètres sur les résultats ;
  - fournir des explications d'ordre technique.
- S'il lui est impossible de garantir l'absence d'erreurs, il doit être capable de découvrir celles qu'il a pu commettre.

# Base de données MOMIS

- MOMIS est développée par le LCPC et l'EC Nantes.
- Objectifs :
  - garder la mémoire des modélisations par éléments finis et des mesures ;
  - faire une synthèse de ces comparaisons ;
  - dégager des recommandations pour la modélisation numérique (choix de modèles, détermination des valeurs des paramètres et principes de contrôle des résultats) ;
  - évaluer les performances des modèles ;
  - quantifier l'erreur de modèle.

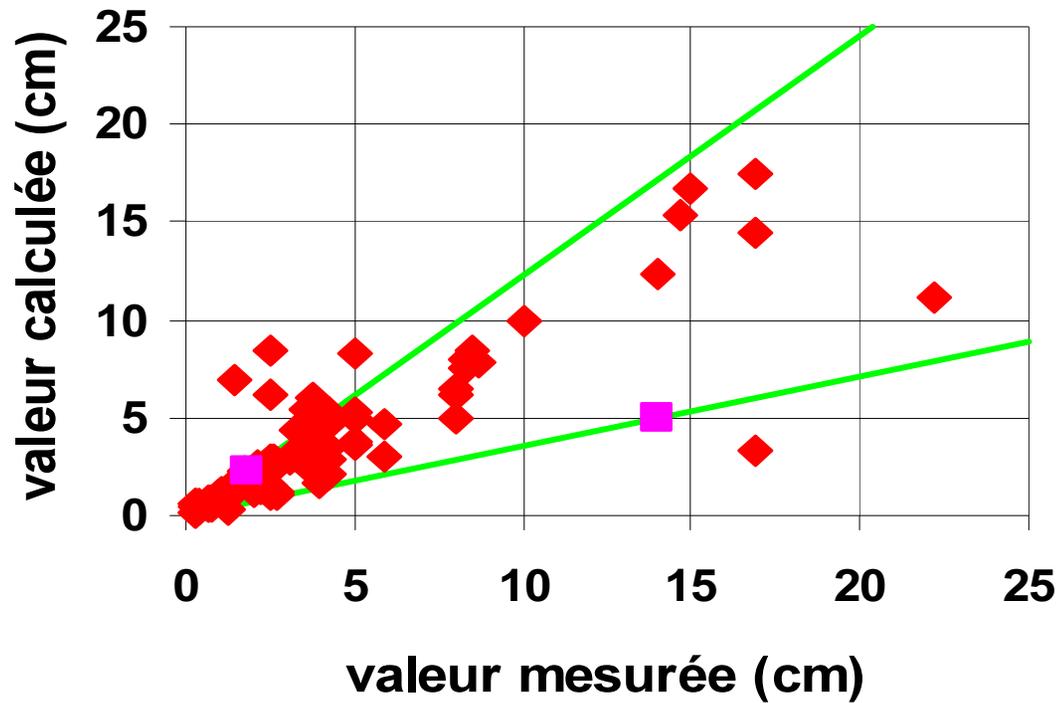
# Base de données MOMIS

- MOMIS contient actuellement près de 430 références :
  - 133 pour des remblais sur sols compressibles ;
  - 135 pour des ouvrages souterrains ;
  - 168 pour des ouvrages de soutènement.
- Les données les plus anciennes remontent au début des années 1970.
- On a distingué :
  - les prévisions réalisées après l'instrumentation d'un ouvrage réel (prévisions de classe C) ;
  - les prévisions effectuées avant toute expérimentation (prévisions de classe A) ;
  - les concours internationaux de prévisions (classe A).

Remblai (fin de la construction)	Tassement maximal dans l'axe	39
	Déplacement latéral maximal en profondeur (pied du talus)	24
	Surpression interstitielle maximale dans l'axe	16
Remblai (long terme)	Tassement maximal dans l'axe	38
	Déplacement latéral maximal en profondeur (pied du talus)	26
Remblai sur sols améliorés	Tassement maximal dans l'axe	35
	Déplacement latéral maximal en profondeur (pied du talus)	21
	Surpression interstitielle maximale dans l'axe	22
Tunnels (fin de la construction)	Tassement maximal en surface (modèle transversal)	120
	Distance du point d'inflexion de la cuvette de tassement	87
	Tassement en clé	30
	Déplacement horizontal maximal en profondeur	32
Rideaux (fin de la construction)	Déplacement horizontal maximal du rideau	69
	Tassement maximal derrière le rideau	37
	Moment fléchissant maximal dans le rideau	24
Parois moulées (fin de la construction)	Déplacement horizontal maximal de la paroi	98
	Tassement maximal derrière la paroi	28
	Moment fléchissant maximal dans la paroi	16

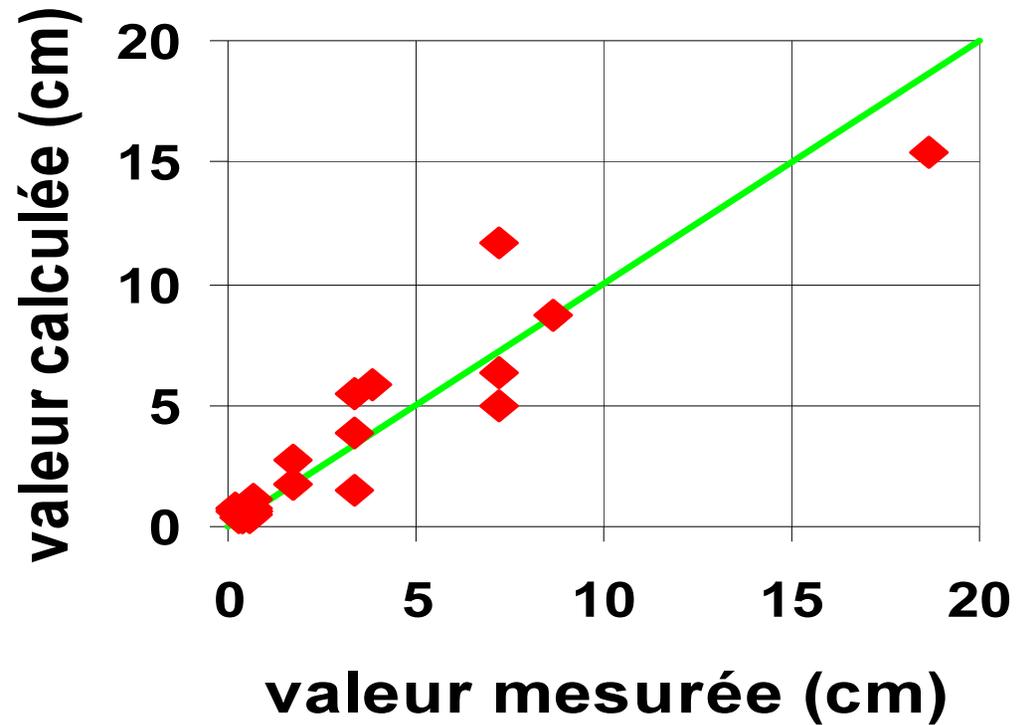
# Tunnels : Validation

Tassement maximal en surface (dans l'axe du tunnel)



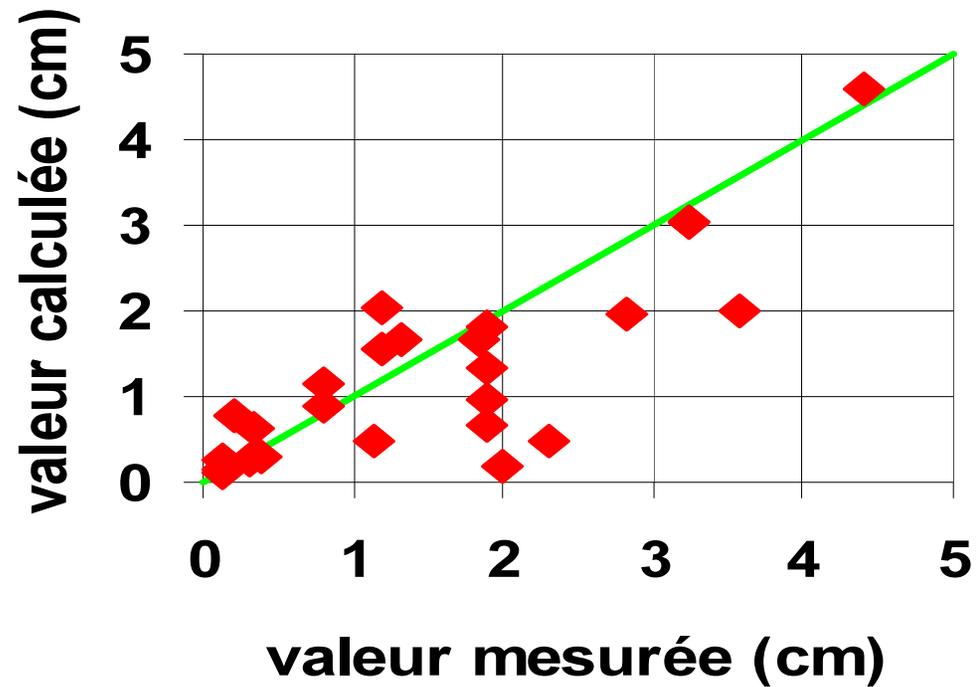
# Tunnels : Validation

## Tassement en clé



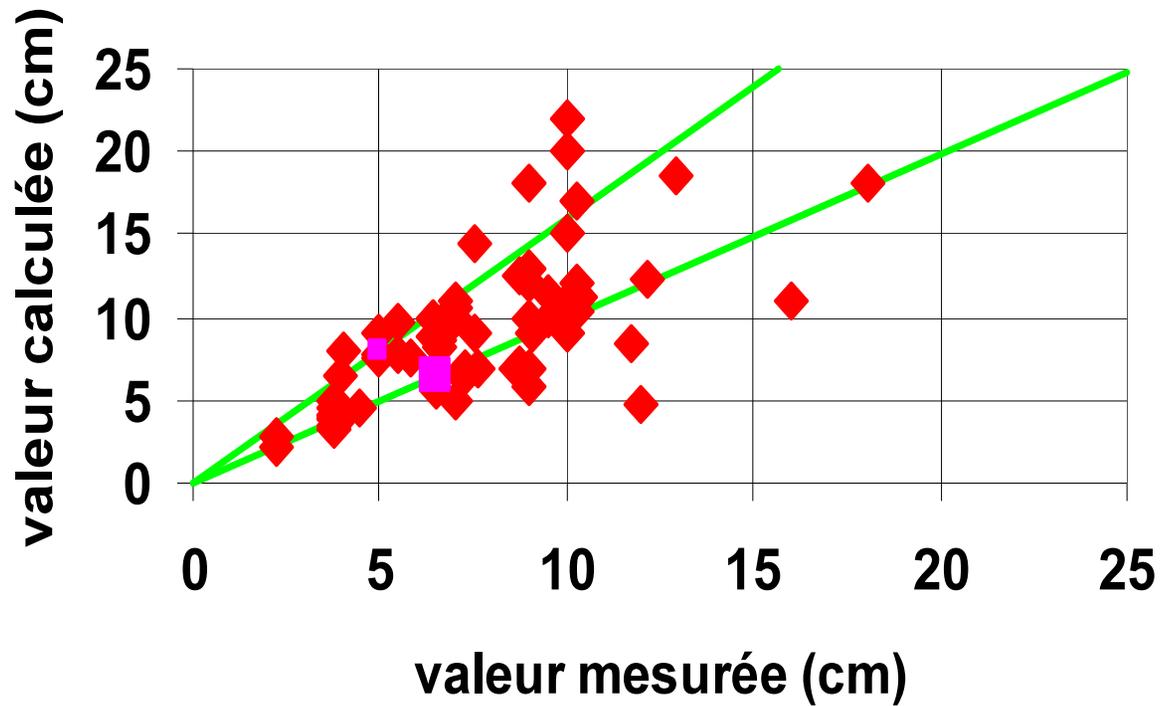
# Tunnels : Validation

Déplacement horizontal maximal (en profondeur)



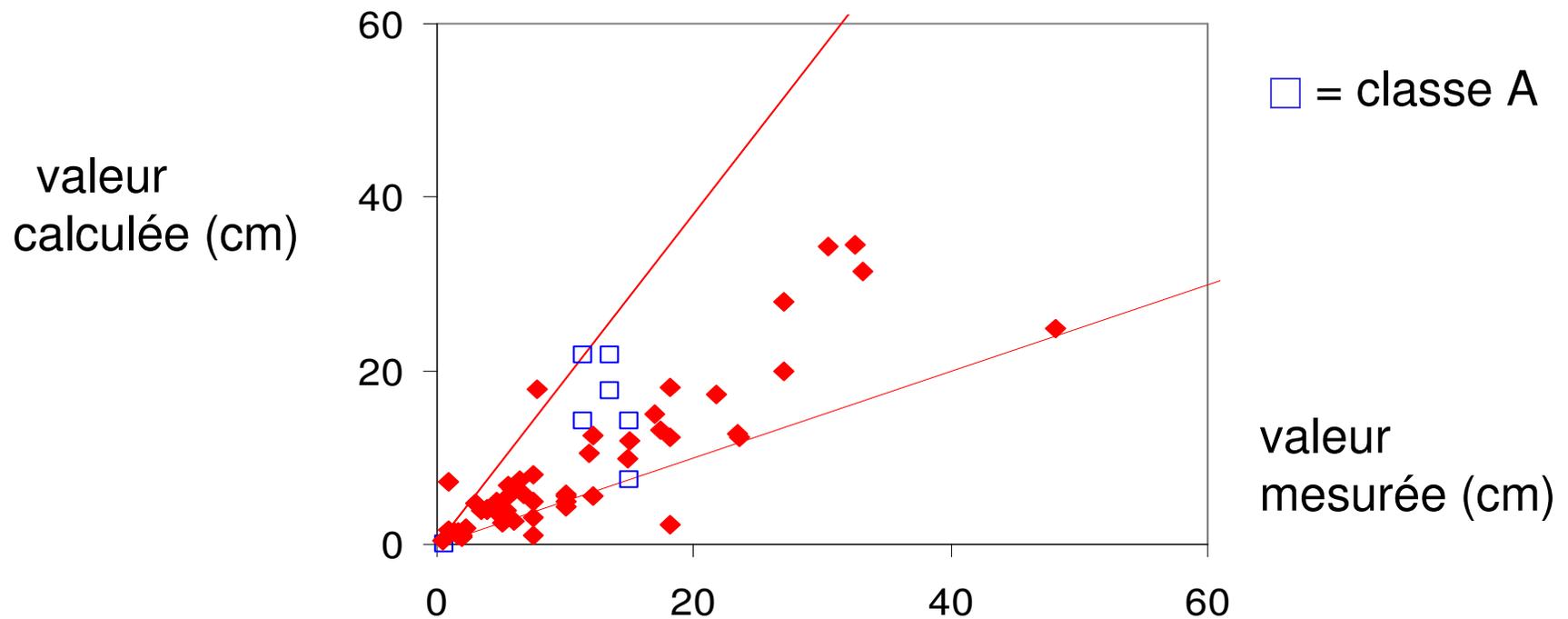
# Tunnels : Validation

Distance  $i$  du point d'inflexion



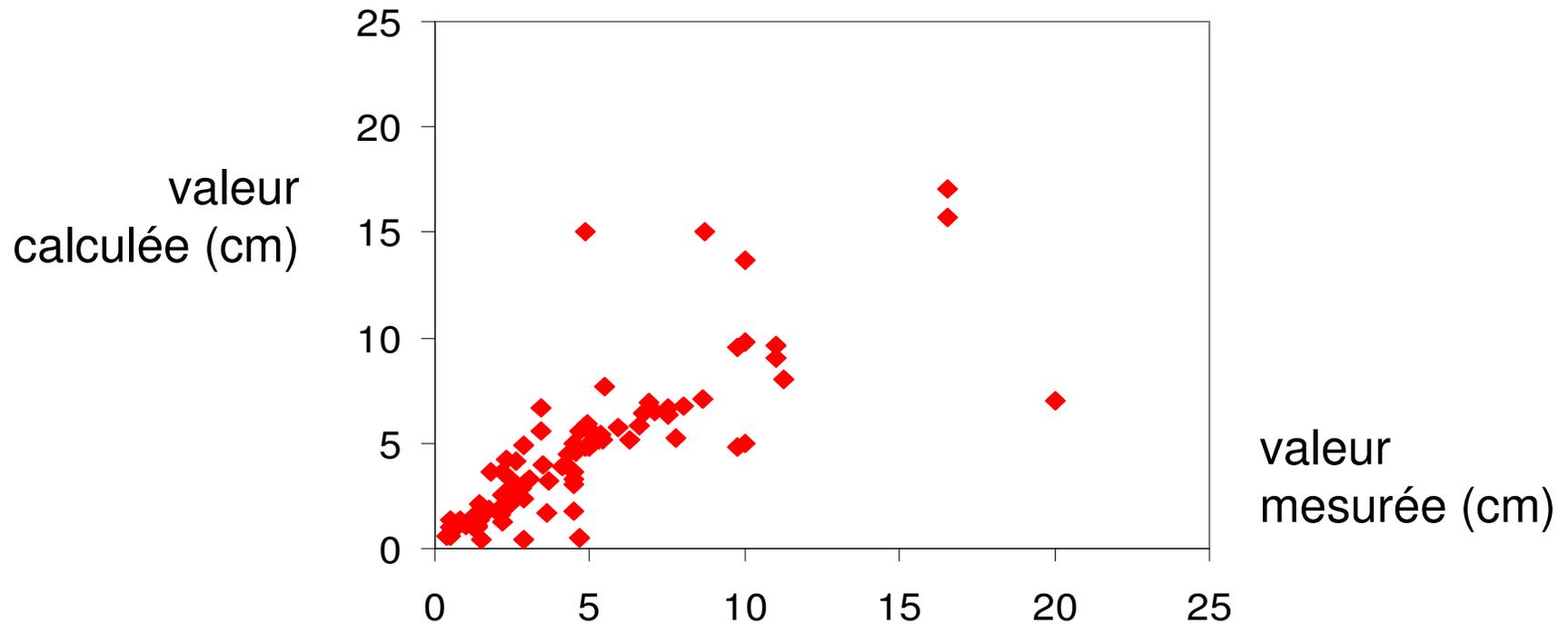
# Rideaux de palplanches : Validation

## Déplacement horizontal maximal



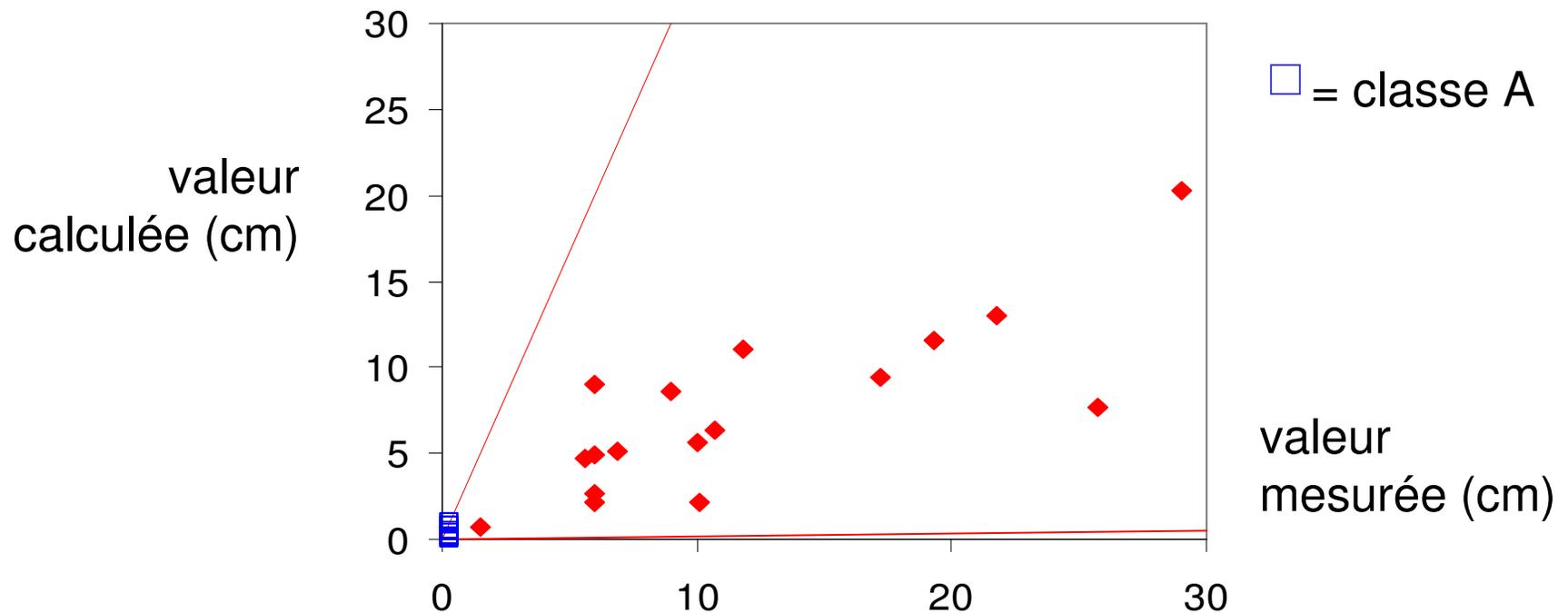
# Parois moulées : Validation

## Déplacement horizontal maximal



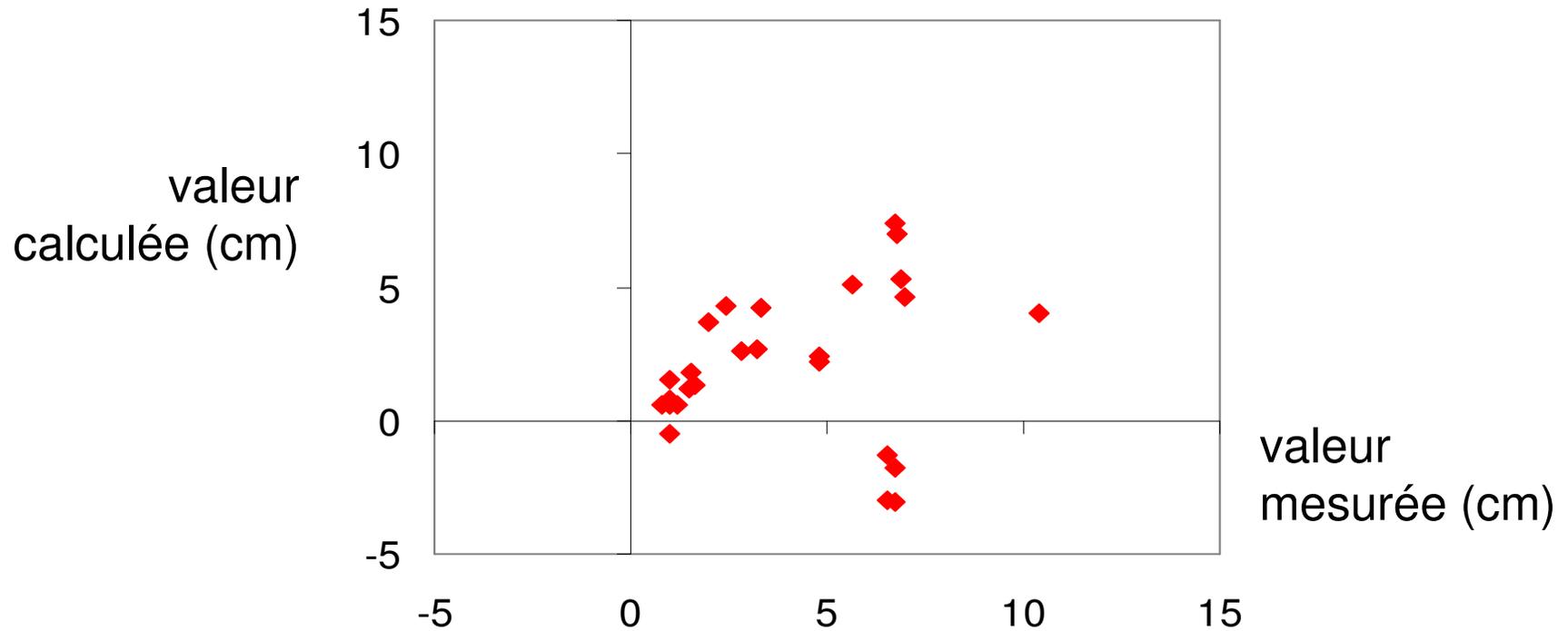
# Rideaux de palplanches : Validation

## Déplacement maximal derrière le rideau



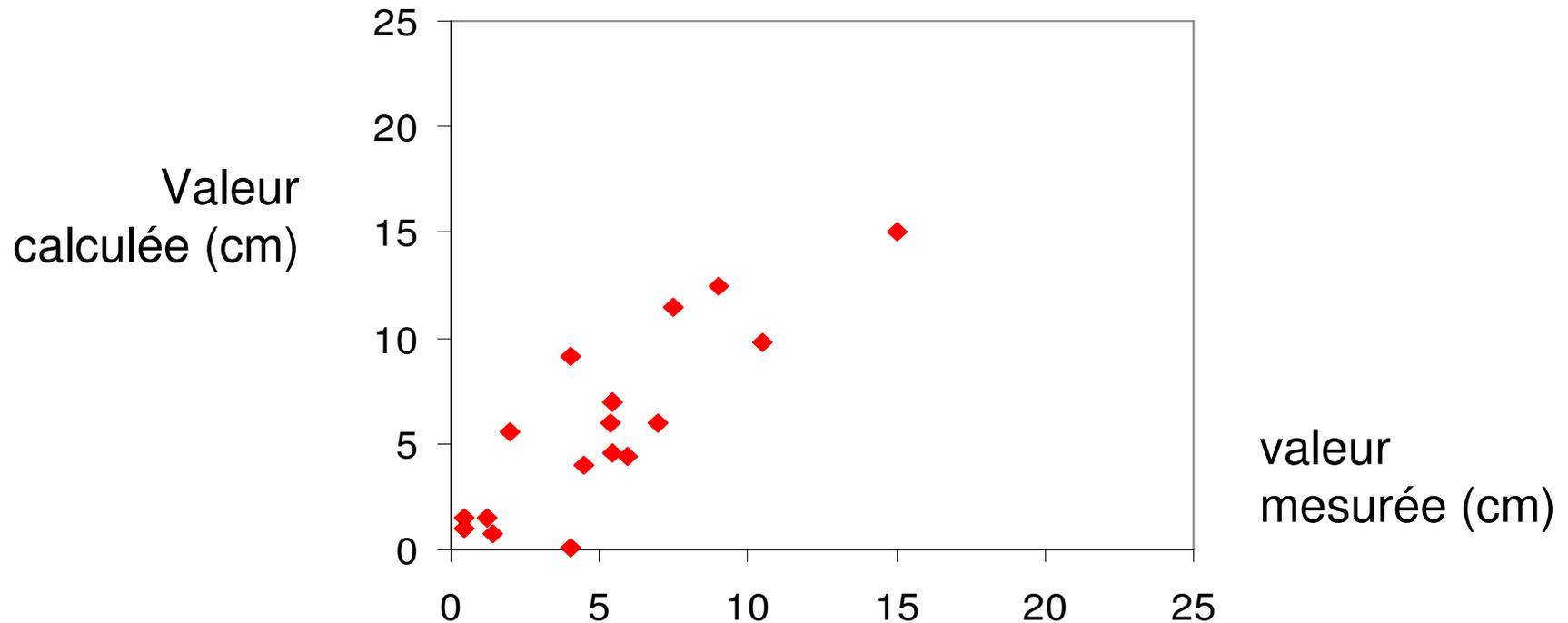
# Parois moulées : Validation

## Tassement maximal derrière la paroi



# Rideaux et parois : Validation

## Soulèvement maximal au fond de fouille



**FIN**

**Quelques annexes**

- Tests **unitaires** : vérification au niveau des sous-programmes.
- Tests d'**intégration** : test d'un ensemble de sous-programmes qui viennent d'être réunis dans le logiciel.
- Tests de **non-régression** : assurance que la programmation n'est pas altérée par des modifications du code (corrections, rapatriement) ou de l'environnement informatique.
- Tests de **robustesse** : estimation de la réponse du logiciel à des données erronées (exemple : valeurs non physiques pour les paramètres).

- Tests **élémentaires** :
  - contrôle des résultats par rapport à des solutions théoriques connues ;
  - tests des combinaisons de types d'analyse (élastique, élastoplastique, thermique, dynamique, etc.), de géométries, d'éléments finis (triangles, quadrilatères, poutres, plaques, coques), de chargements (poids volumique, pressions, efforts, contraintes initiales), de conditions aux limites, etc.
- Les tests unitaires et élémentaires servent à démontrer **l'absence d'erreurs** dans le code (autant que faire se peut) par un contrôle de l'exactitude des résultats et à fabriquer une **plate-forme de tests** automatiques afin de vérifier régulièrement que la programmation n'a pas été altérée.

- **Tests semi-industriels** : comparaison avec des solutions de référence (calculées par d'autres logiciels) ou avec des mesures sur des modèles physiques (centrifugés ou non). Ces tests sont réalisés avec une certaine maîtrise de la nature des matériaux considérés (homogénéité notamment) qui rend plus facile la modélisation des essais, mais ils s'éloignent de la réalité des projets.
- **Tests industriels** : comparaison avec des résultats de mesures sur ouvrages réels. Ils doivent démontrer l'aptitude du logiciel à modéliser des ouvrages dans des conditions proches de celles du projet. Ces tests constituent les véritables et seuls tests de validation au sens strict.

- La « **vérification** » consiste à vérifier que le logiciel fait bien ce que l'on attend qu'il fasse. Les résultats fournis doivent être en accord avec des solutions connues.
- La « **validation** » procure l'assurance que le logiciel fournit une réponse correcte au problème posé. En particulier, la validation doit montrer que le logiciel donne de bons résultats sur des cas réels.
- La « **qualification** » des utilisateurs assure que l'ingénieur chargé du calcul est apte à réaliser le modèle demandé.
- La « **justification** » permet de démontrer que le modèle réalisé est capable de décrire la réalité du fonctionnement de l'ouvrage étudié.

## Des questions à se poser ?

- À valeurs de paramètres mécaniques données, quelle est la sensibilité des résultats au maillage (densité), au type d'éléments finis, au « découpage » des sollicitations... ?
- À modèle d'éléments finis fixé, quelle est la sensibilité des résultats aux valeurs des paramètres de calcul ?

# Qu'est-ce qu'un bon modèle d'ouvrage ?

- Un bon modèle de fonctionnement doit permettre de prévoir **simultanément** tous les aspects importants de la réponse d'un ouvrage et de son environnement aux sollicitations qui lui sont imposées.
- Pour les calculs habituels (sans expérimentation associée), la « validation » du modèle se réduit à une **vérification** des résultats significatifs par rapport à des ordres de grandeur obtenus sur des ouvrages types similaires (calculs ou mesures).
- La comparaison avec d'autres méthodes de calcul propres à la géotechnique est fortement conseillée.
- Ces comparaisons constituent ainsi autant de critères de validation pour les modèles d'éléments finis.

- Toutefois, il est rare qu'un modèle donne de bons résultats pour l'ensemble des critères. Les comparaisons sont alors globalement satisfaisantes, avec des concordances plus ou moins bonnes, selon les régions du maillage concernées.
- Il est aussi courant que les résultats diffèrent de plus en plus à mesure que l'intensité du chargement croît ou qu'un phénomène physique, qui n'a pas été considéré dans la modélisation, devient prépondérant (par exemple : l'interface entre les matériaux, l'écoulement de l'eau, etc.).
- Enfin, si les valeurs calculées sont égales ou proches des valeurs mesurées, cela peut être seulement le fruit du hasard.