

Pathologie des sols et des fondations

# Pathologie des sols et des fondations

Mehrez KHEMAKHEM 1

Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM 2

Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM 3

Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM 4

Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM 5

Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM 6



Pathologie des sols et des fondations

**PATHOLOGIE DES SOLS ET FONDATIONS**

- Pathologies dues au sol
- Pathologies dues à l'exécution
- Pathologies dues à l'environnement
- Pathologies dues à des actions accidentelles
- Etc

Mehrez KHEMAKHEM 9

Pathologie des sols et des fondations

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS**

- Pathologies des semelles
- Pathologie des pieux
- Pathologie des dallages
- Pathologie des parois moulées
- Pathologie des micropieux
- Pathologie des soutènements
- Etc.

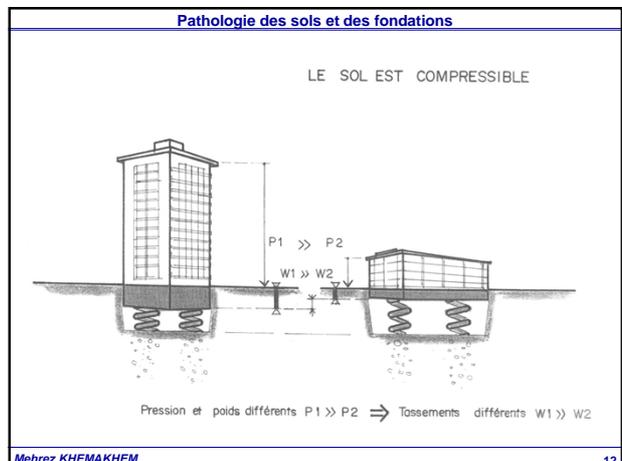
Mehrez KHEMAKHEM 10

Pathologie des sols et des fondations

**PRINCIPALES CAUSES DES DESORDRES**

- reconnaissance insuffisante ou mal adaptée;
- défauts de conception de l'ouvrage;
- défauts dans l'exécution des travaux;
- application d'efforts ou de déformations non prévus - exécution de travaux;
- efforts (situations) accidentels (chocs, séismes..);
- affouillement, érosion du sol de fondation;
- vieillissement (naturel ou accéléré) des matériaux;
- insuffisance d'entretien des ouvrages.

Mehrez KHEMAKHEM 11



**Pathologie des sols et des fondations**

1 - reconnaissance insuffisante ou mal adaptée

W1 = 20 mm  
W2 = 5 mm  
(confortement : injections + micropieux)

Mehrez KHEMAKHEM 13

**Pathologie des sols et des fondations**

reconnaissance insuffisante ou mal adaptée

sondage  
ancienne canalisation

Mehrez KHEMAKHEM 14

**Pathologie des sols et des fondations**

reconnaissance insuffisante ou mal adaptée

sondage  
couche molle sous-jacente  
karst

Mehrez KHEMAKHEM 15

**Pathologie des sols et des fondations**

reconnaissance insuffisante ou mal adaptée

sondage  
faux refus

Mehrez KHEMAKHEM 16

**Pathologie des sols et des fondations**

reconnaissance insuffisante ou mal adaptée

couche instable  
mouvements du site non décelés par la reconnaissance

Mehrez KHEMAKHEM 17

**Pathologie des sols et des fondations**

défaut de conception de l'ouvrage

TN initial

Etudes (stabilité, fondations, structures,...) insuffisantes ou incomplètes

Mehrez KHEMAKHEM 18

Pathologie des sols et des fondations

### défaut de conception de l'ouvrage

Sous estimation des efforts ou surestimation des résistances (sols, matériaux de structure,...)

Mehrez KHEMAKHEM 19

Pathologie des sols et des fondations

### Absence de contrôle de la conformité (aux prévisions) de la nature et des qualités des terrains rencontrés, non adaptation des fondations à celles-ci

Absence de réception du fond de fouille, absence de réaction de l'entreprise à l'ouverture de la fouille.....

Mehrez KHEMAKHEM 20

Pathologie des sols et des fondations

### Application d'efforts (ou de déformations) non prévus – exécution de travaux

Modification de la structure (élargissement par exemple)

Mehrez KHEMAKHEM 21

Pathologie des sols et des fondations

**Dégradation du béton de pieux**

Mehrez KHEMAKHEM 22

Pathologie des sols et des fondations

### Tassement différentiel

Renversement du bâtiment à un sol hétérogène

Mehrez KHEMAKHEM 23

Pathologie des sols et des fondations

### LE TASSEMENT CROIT AVEC LE TEMPS

dans les sols fins (argileux)

Le tassement nécessite la sortie de l'eau du volume du sol A B C D qui devient A' B' C' D' comme pour la compression d'une éponge.

Mehrez KHEMAKHEM 24

**Pathologie des sols et des fondations**

Sol compressible  
Tout-venant compacté  
Sol résistant

Mehrez KHEMAKHEM 25

**Pathologie des sols et des fondations**

Il faut éviter de fonder sur un sol compressible  
Il faut éviter de fonder sur un sol organique

Mehrez KHEMAKHEM 26

**Pathologie des sols et des fondations**

**1\_ CHARGES NON UNIFORMES**

Une pression plus élevée à hauteur d'un étage provoque une déformation plus importante que celle des étages inférieurs. Mais on ne peut pas évaluer l'effet de cette déformation par un calcul de tassement.

**CHARGES NON UNIFORMES ( suite )**

b) Habitat inégalement chargé (Faire une étude spéciale)

c) Garage ou bâtiment secondaire sur semelles séparées

**REMEDE :**

- Bien étudier les descentes de charge et les semelles.
- Des ventouses de sols peuvent être disposées aux 4 angles.
- Séparer les bâtiments.
- Calculer les tassements pour les rendre tous voisins.

Mehrez KHEMAKHEM 28

**Pathologie des sols et des fondations**

**FONDATEMENTS HÉTÉROGÈNES À HAUTEURS DIFFÉRENTES**

a) Pieux-semelles

b) Caves partielles

**3\_ TASSEMENT AU VOISINAGE D'UN BÂTIMENT NEUF**

Le sol battu pour un bâtiment neuf provoque dans le voisinage (quelques mètres...) un tassement du sol du bâtiment existant.

**ATTENTION :** Rendre les tassements égaux ou nuls. (Contrainte peu différente du poids du sol naturel). Enlever un poids de terre égal au poids du bâtiment... (à faire avec précaution). Un joint de dilatation entre les bâtiments ne joue qu'un rôle négligeable.

**REMEDE :**

- Calculer les tassements pour les rendre semblables.
- Séparer les bâtiments.

Mehrez KHEMAKHEM 29

**Pathologie des sols et des fondations**

Mehrez KHEMAKHEM 29

**Pathologie des sols et des fondations**

1. Fondations sur radier  
2. Fondations sur pieux  
3. Joint de rupture  
4. Poussées latérales

Mehrez KHEMAKHEM 30

**Pathologie des sols et des fondations**

LE REMBLAI PROVOQUE UN TASSEMENT DIFFERENTIEL

Mehrez KHEMAKHEM 31

**Pathologie des sols et des fondations**

4 a. SOL NON HOMOGENE

Argile molle  
Grosier

REMEDES : Reconstituer le sol, (travaux, ajutage, remblai de...)  
Egalement à éviter comme dans l'exemple précédent.

4 b. SOL HETEROGENE NON EXAMINE

Ancienne fondation  
Remblai  
Egout gâchées (graves / gypse)  
Grosier sans fine "dur"

TASSEMENTS DIFFERENTIELS.

ATTENTION : Faire une maquette ! (travaux de lit, ajutage, remblai...)

Mehrez KHEMAKHEM 32

**Pathologie des sols et des fondations**

Mehrez KHEMAKHEM 33

**Pathologie des sols et des fondations**

4 d. FONDATIONS SUR COUCHE TROP MINCE

Argile  
Sable-gravier  
Argile

Bulbe de pressions  
 $\sigma_v = 0.5 \cdot 10^3 \text{ pascals}$   
(0.5 kg/cm<sup>2</sup>)

VOLUME à reconnaître

FONDATIONS PROFONDES : Pieux, borrettes, parois.

Exécution difficile :  
- Travaux de spécialité.  
- Contraintes de chantier indispensables.

Pieux réalisés trop courts  
Béton insuffisant tassé  
Boue lavée dans le fond du forage.

Mince couche, aléatoire pour réduire considérablement la portance.

Béton  
Boue  
Béton

Interdit

Mehrez KHEMAKHEM 34

**Pathologie des sols et des fondations**

RP REFUS

COUCHE RESISTANTE

Un essai de pénétration aurait montré que la couche était trop mince et que la résistance à la pointe d'un pieu ne peut pas être multipliée par le nombre de pieux.

Mehrez KHEMAKHEM 35

**Pathologie des sols et des fondations**

7. VIBRATIONS = tassements

a) Battage de pieux

ATTENTION : Sables et graviers propres, pas de sable tassé partiellement, dangereux.

b) Engins lourds

Travaux en galerie Métro

2. EROSION:

Les surfaces de cisaillement dans les cailloux ou brèches peuvent provoquer une érosion (formation de bulles) qui provoque des tassements de tassement - peut être gâchée de tassement.

Vapeur phréatique

Fouille

ATTENTION : ... Prévoir aux circulations d'eau éventuelles.

Peut être évité par :  
- des filtres posés sur la surface  
- en faisant la pente de la fouille  
- par des pompes  
- l'éclaircissement des lits fins ou battement de la fouille.

Et l'absence de niveau dans la fouille épaie ou supérieure au niveau de la nappe (l'ouvrage, paroi mouillée...)

Mehrez KHEMAKHEM 36

### Pathologie des sols et des fondations

**3. VARIATIONS HÉTÉROGÈNES DE TENEUR EN EAU**

**CAUSES**

- Pompages
- Variations climatiques - Saisons sèche et humide (ruissel / infiltration)

**EFFETS**

- Augmentation du poids volumique  $\rho_{vol}$  (à cause de l'eau)
- Variation de volume par retrait-gonflement (pour des sols argileux)

**b. Variations climatiques.**

**d. ARBRES, PELOUSES...** Sur sols fins argileux, augmentent le séchage avec le tassement en saison sèche.

**ATTENTION** Se fonder en profondeur là où le sol n'est pas perturbé (petits pieux)  
Prévoir des chaînages continus au des ouvertures.  
Établir des versants lents de niveau de la masse (protéger les pieux en bore)

**e. Gel** Le gel produit un gonflement dû à la formation de cristaux de glace qui trouble les liaisons plus que le centre.  
Il faut donc se fonder, pour la profondeur atteinte par le gel qui peut être de 0,5 à 1 mètre en France

**f. Remontée d'eau (et de sels)** par capillarité dans l'ouvrage  
Ceci peut être limité soit par une membrane (soit par un milieu non capillaire)

### Pathologie des sols et des fondations

*Incidence de la proximité des arbres sur les constructions.*

Mehrez KHEMAKHEM 38

### Pathologie des sols et des fondations

pathologie sous une construction due à la succion

Mehrez KHEMAKHEM 39

### Pathologie des sols et des fondations

pathologie sous une construction due au gonflement

Mehrez KHEMAKHEM 40

### Pathologie des sols et des fondations

**EFFET MÉCANIQUE SUR LE SOL DES BÂTIMENTS VOISINS**

**ATTENTION:** Laisser une banquette (L) assez large.  
Surtout, la banquette voisine est une banquette.

**TREMBLEMENT DE TERRE**

- Crée des forces spéciales (danger de l'entraîné en résonance du bâtiment ou du sol)
- Affaiblissement du sol "liquéfaction" (augmentation de la pression interstitielle)
- Tassement.

Un bâtiment comme une balançoire instable à une fréquence donnée (pas plus)

L'application d'une force F produisant de même fréquence (ou multiples) augmente considérablement le déplacement.

**REPRISE EN SOUS-ŒUVRE**

**ATTENTION:**

- Laisser des banquettes assez importantes.
- N'ouvrir les banquettes que par de petites distances.
- Soutier le bâtiment (éviter par appuis et banquettes)

La réalisation de fissures en gelées peut résulter de précipitation beaucoup plus

41

### Pathologie des sols et des fondations

## PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES

- Pathologies dues au sol
- Pathologies dues à l'exécution
- Pathologies dues à l'environnement
- Pathologies dues à des actions accidentelles
- Etc

Mehrez KHEMAKHEM 42

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES**

Plusieurs causes sont possibles :

- une étude de sol incomplète, inadaptée ou l'absence d'étude géotechnique ;
- une mauvaise interprétation de la reconnaissance des sols :
  - les tassements de pieux peuvent résulter de la non prise en compte d'un frottement négatif dû à des couches de surface compressibles et qui s'ajoute, par conséquent, à la charge transmise au pieu par l'ouvrage ;
  - sur un même terrain, l'interaction des charges entre pieux isolés et groupes de pieux ne sera pas la même, ce qui peut être à l'origine de tassements importants ;

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES**

Plusieurs causes sont possibles :

- une mauvaise interprétation de la reconnaissance des sols :
  - en présence de couches compressibles de surface, chargées par des remblais dissymétriques, le fluage des couches molles peut engendrer des efforts latéraux sur le fût des pieux allant jusqu'à leur rupture en l'absence d'armatures ;
  - les pieux battus peuvent rencontrer de faux refus ou pas de refus dans certains sols.
- Les erreurs d'implantation ou d'exécution : rupture de pieu lors du battage, du recépage, ou du terrassement...

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES**

Plusieurs causes sont possibles :

Pour les pieux coulés en place, un mauvais bétonnage peut résulter de l'emploi d'un béton trop « sec », de ferrailles trop importantes gênant le coulage du béton ou une remontée trop rapide du tube ;

L'agression des pieux par le sol environnant (circulation d'eaux acides, d'eaux contenant des sulfates,...). Cette pathologie est en récession grâce à l'emploi de ciments adaptés à ces agressions.

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES**

•25% des sinistres sont dû à l'ignorance du comportement des sols (tassements différentiels, fondations hétérogènes, etc.).

•25% sont dûs au rôle néfaste des remblais qui tassent ou qui font tasser les terrains sur lesquels on construit.

•32% sont dûs à l'action de l'eau sur des terrains argileux compacts, qui modifie profondément leurs caractéristiques (affouillements, diminution de la force portante, gel, glissements, sous-pression, etc.).

**PATHOLOGIE DES FONDATIONS PROFONDES**

A côté des ces trois grandes familles, dues à l'ignorance ou à l'optimisme des constructeurs, il existe d'autres causes, moins nombreuses, qui se partagent à peu près également les 18% restants.

- les fondations sur sol instable en profondeur (exploitation de carrières, dissolution du gypse, tassements miniers) ;
- les fondations à une profondeur insuffisante ;
- la corrosion des fondations par le milieu ambiant ;
- enfin, les erreurs d'exécution ou malfaçons, notamment dans le domaine des fondations profondes.

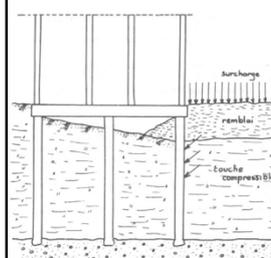


Fig. 2 - Poussées dues aux remblais

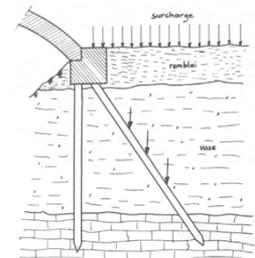
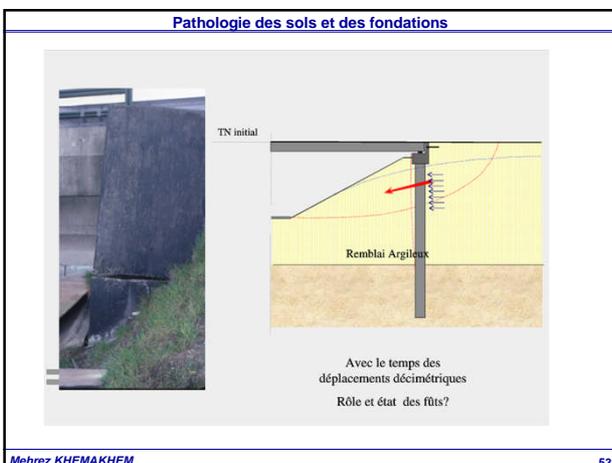
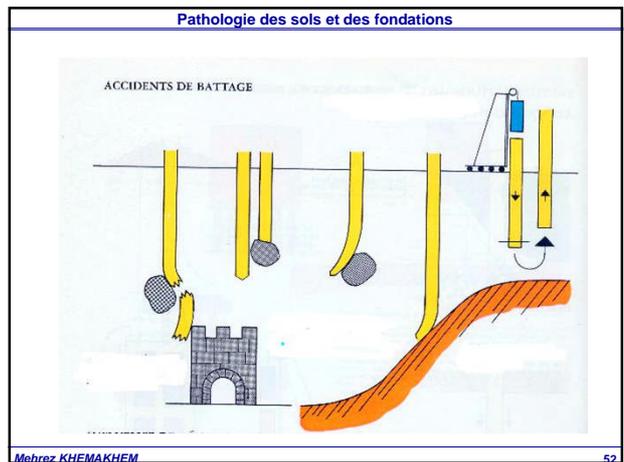
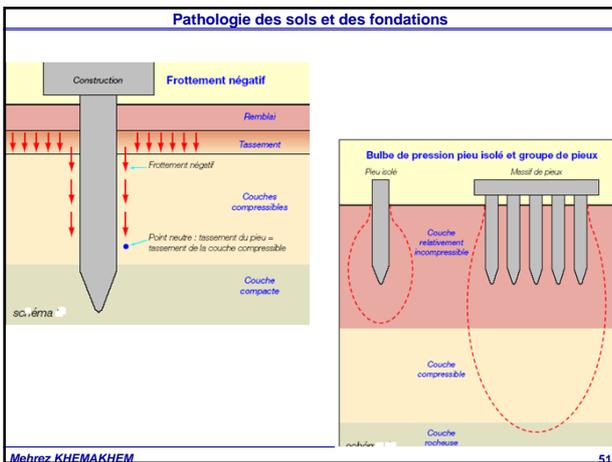
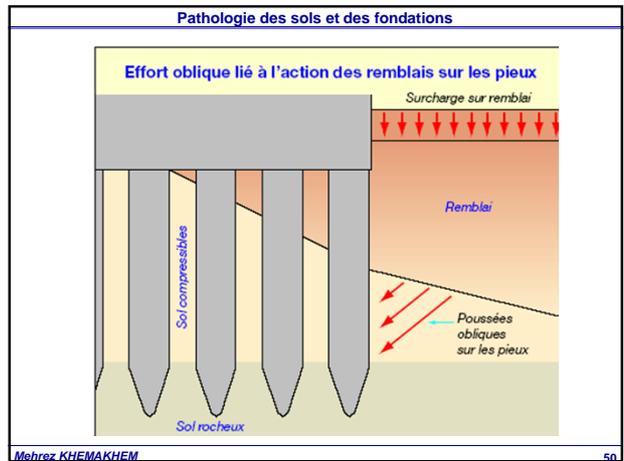
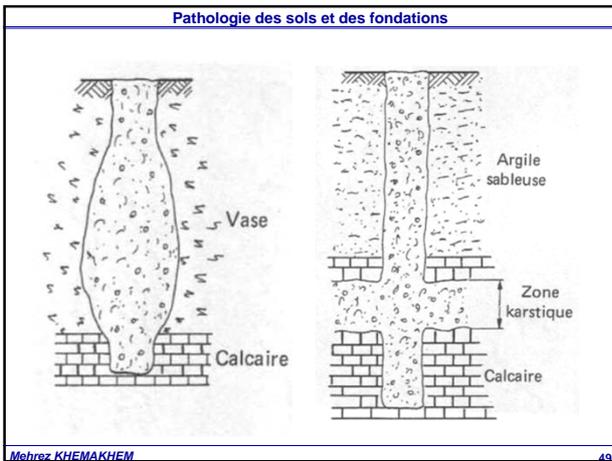
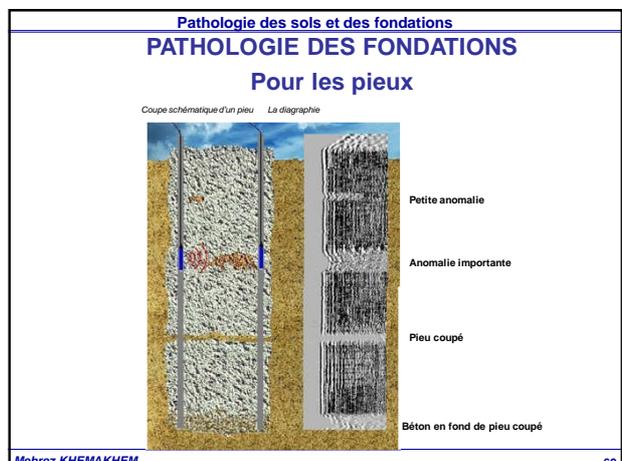
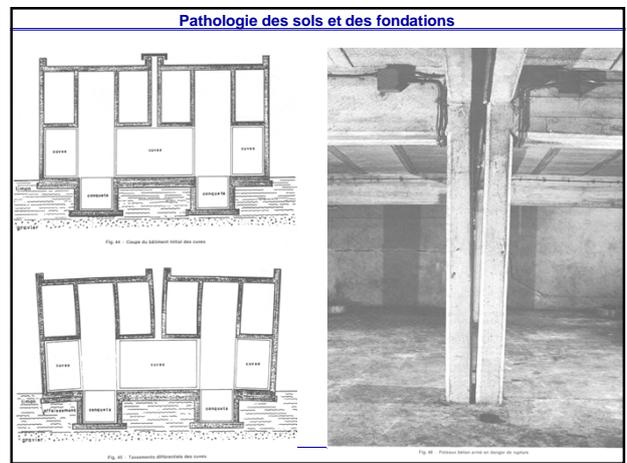
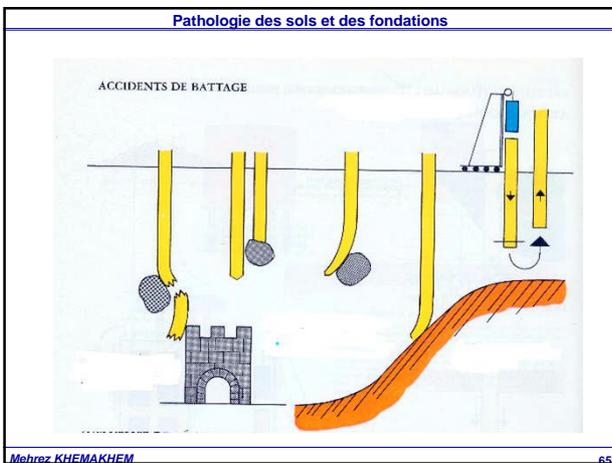
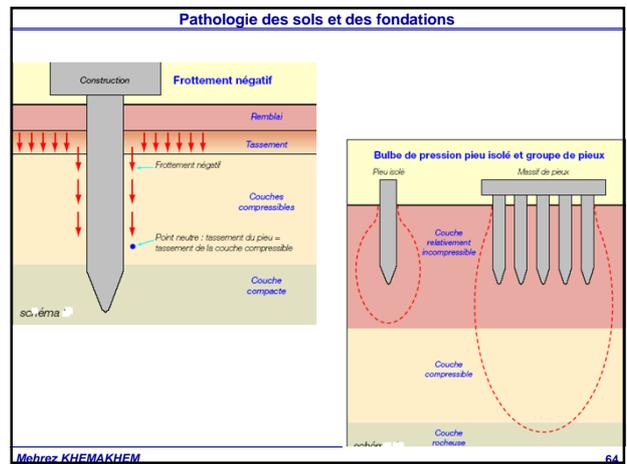
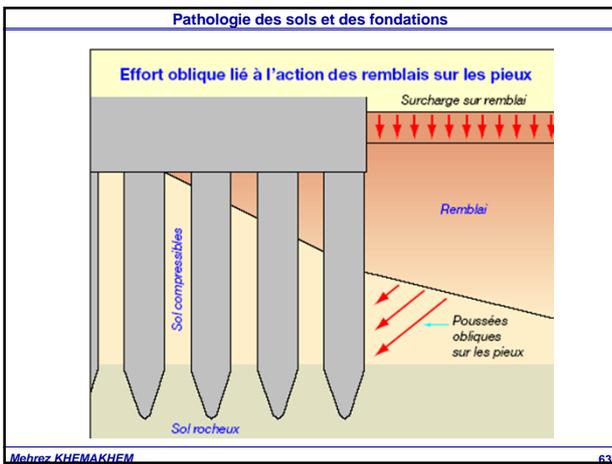
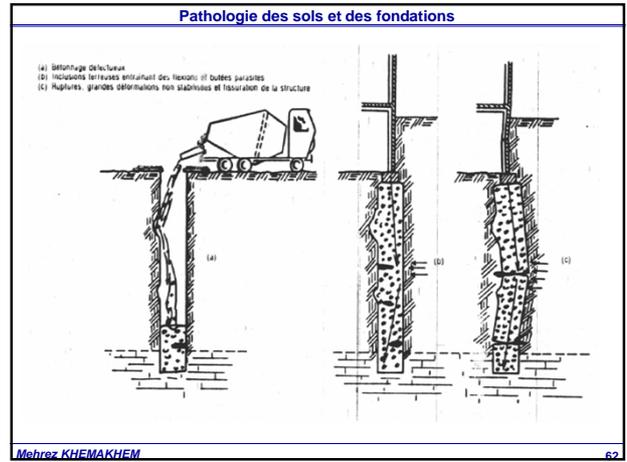
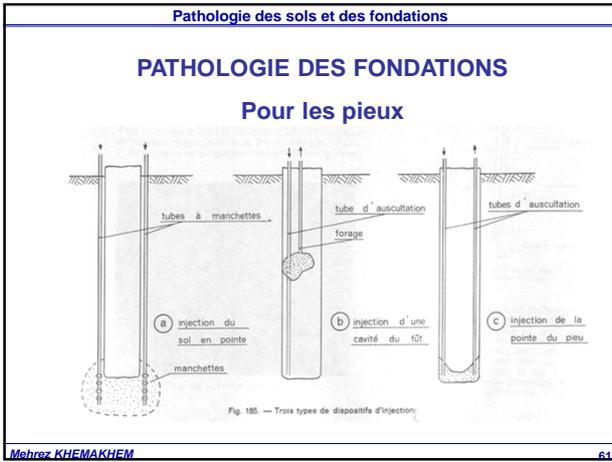


Fig. 3 - Efforts dus aux remblais







**Pathologie des sols et des fondations**

Pour les ouvrages enterrés, et particulièrement les réseaux, l'infiltration d'eau localisée serait la cause du gonflement inégal de l'argile sous-jacente

pathologie affectant une conduite enterrée

*Mehrez KHEMAKHEM* 67

**Pathologie des sols et des fondations**

Pour les ouvrages enterrés, et particulièrement les réseaux, l'infiltration d'eau localisée serait la cause du gonflement inégal de l'argile sous-jacente

*Mehrez KHEMAKHEM* 68

**Pathologie des sols et des fondations**

*Mehrez KHEMAKHEM* 69

**Pathologie des sols et des fondations**

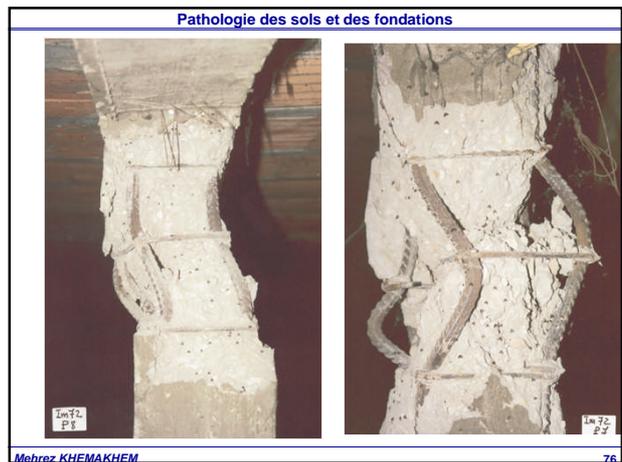
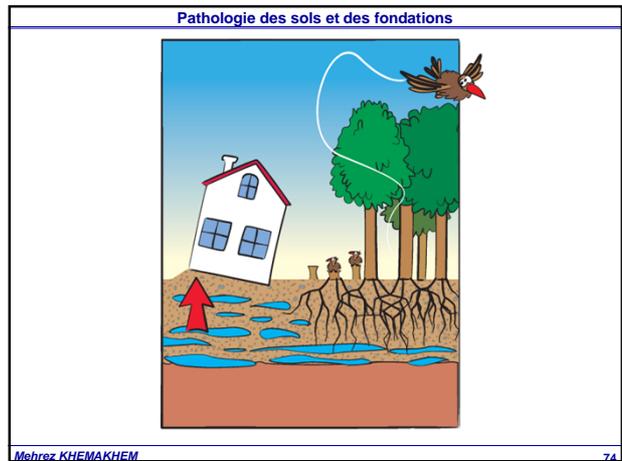
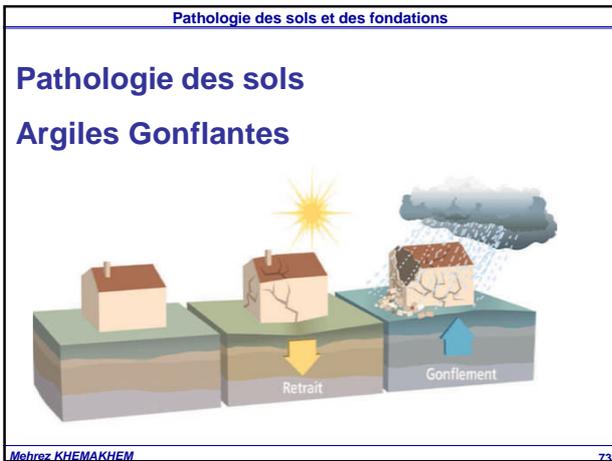
*Mehrez KHEMAKHEM* 70

**Pathologie des sols et des fondations**

*Mehrez KHEMAKHEM* 71

**Pathologie des sols et des fondations**

*Mehrez KHEMAKHEM* 72



Pathologie des sols et des fondations

**Le sol : un complexe de trois éléments : les grains solides, l'eau et l'air (ou le gaz)**  
 L'assemblage des *grains solides* forme le *squelette du sol*.  
 Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé..  
 L'eau existe dans le sol sous plusieurs formes :  
 Eau de constitution  
 Eau liée ou adsorbée  
 Eau libre ou gravifique (ou interstitielle)  
 Eau capillaire  
 Le gaz est généralement l'air ou un mélange d'air et de vapeur d'eau. Lorsque les vides sont remplis d'eau, on dit que le sol est saturé.

Mehrez KHEMAKHEM 77

Pathologie des sols et des fondations

Pour identifier un sol, on définit des paramètres :

► **Paramètre de nature** : Paramètre intrinsèque qui ne varie pas ou peu, ni dans le temps, ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en oeuvre comportant :

- La granularité ;
- Les limites d'Atterberg ;
- La plasticité ;
- Les constituants minéraux et organiques : carbonates, matières organiques,...
- L'activité argileuse ;
- La masse volumique des particules solides ;
- Les indices des vides maxi et mini ;
- L'équivalent de sable.

Mehrez KHEMAKHEM 78

Pathologie des sols et des fondations

Pour identifier un sol, on définit des paramètres :

► **Paramètre d'état** : Paramètre qui ne dépend pas du sol mais qui est fonction de l'environnement dans lequel il se trouve et des manipulations auxquelles il a été soumis comportant :

- Les teneurs en eau naturelle et de saturation ;
- La masse volumique humide ;
- L'indice des vides et la porosité ;

Mehrez KHEMAKHEM 79

Pathologie des sols et des fondations

LES ARGILES VUES GÉOLOGIQUEMENT

Les argiles sont des roches composées principalement de silicates en feuillets (Phyllosilicates) d'Al, plus ou moins hydratés.

Elles sont les plus abondants des roches sédimentaires : 50% des sédiments (69 % des sédiments continentaux). Elles sont les constituants principaux des sols.

Elles sont formées de particules fines, de l'ordre du µm. Les techniques propres d'étude et de caractérisation sont délicates.

Mehrez KHEMAKHEM 80

Pathologie des sols et des fondations

LES ARGILES VUES GÉOLOGIQUEMENT

Les caractéristiques principales des argiles :

la **plasticité** : déformation souple sous l'effet des contraintes, rôle de couche savon pour glissements des matériaux à toute échelle (glissement de terrain, nappe tectonique)

la **compaction importante** : expulsion d'une grande quantité d'eau. Les pores diminuent, la roche devient imperméable.

le **pouvoir adsorbant** : dispersion dans l'eau et floculation les particules fines restent en suspension dans l'eau agitée; elles décantent dans l'eau immobile avec une vitesse de chute très faible. En eau salée, elles s'agglomèrent (floculation) et précipitent plus rapidement.

Loi de Stokes:  $v = C.d^2$

Mehrez KHEMAKHEM 81

Pathologie des sols et des fondations

LES ARGILES VUES GÉOLOGIQUEMENT

vitesse de chute des éléments fins

diamètre (µm)	temps pour parcourir 1 m (à 20° C)	vitesse de chute (cm/s)
60	5 minutes	0,3
16	1 heure 12	0,02
4	19 heures	.
2	3 jours 5 heures	.
1	13 jours	.
0,1	1293 jours	.

Mehrez KHEMAKHEM 82

Pathologie des sols et des fondations

LES ARGILES VUES GÉOLOGIQUEMENT

○ Oxygène    ● Silicium    ○ Hydroxyle    ● Aluminium, Magnésium.

**KAOLINITE**  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$   
couche octaédrique / couche tétraédrique  
distance inter-réticulaire: 7 Å

**SMECTITES**  $2Al_2O_3 \cdot 8SiO_2 \cdot 2H_2O \cdot nH_2O$  (Montmorillonite)  
(Mg, Ca) O,  $Al_2O_3$ ,  $5SiO_2 \cdot nH_2O$   
substitution de Al par Mg et Fe  
distance 14 Å / gorge à 17 Å

**ILLITE**  $KAl_2(OH)_2 \cdot (AlSi_3(O,OH)_6)$   
substitution de Si par Al  
distance 10 Å

**CHLORITE**  $Mg_3(Al,Fe)(OH)_6 \cdot (Al, Si)_4O_{10}$   
substitution de Al par Fe / couche Mg-OH  
distance 14 Å

Mehrez KHEMAKHEM 83

Pathologie des sols et des fondations

LES ARGILES VUES MINÉRALOGIQUEMENT

Structure élémentaire du réseau cristallin de la kaolinite

Mehrez KHEMAKHEM 84

Pathologie des sols et des fondations

### LES ARGILES VUES MINERALOGIQUEMENT

Structure élémentaire du réseau cristallin de la montmorillonite

Mehrez KHEMAKHEM 85

Pathologie des sols et des fondations

### LES ARGILES VUES MINERALOGIQUEMENT

Structure élémentaire du réseau cristallin de l'illite

Mehrez KHEMAKHEM 86

Pathologie des sols et des fondations

### LES ARGILES VUES GÉOLOGIQUEMENT

Minéral	Diamètre des plaquettes (µm)	Epaisseur des plaquettes	Surface interne (m²/g)	Surface externe (m²/g)	Surface totale (m²/g)
kaolinite	0.3 à 3	D/3 à D/10	0	10-30	10-30
illite	0.1 à 2	D/10	20-55	80-120	100-175
smectites	0.05 à 1	D/100 à D/400	600-700	80	700-800

Mehrez KHEMAKHEM 87

Pathologie des sols et des fondations

*les paramètres de nature :*

Les limites d'Atterberg sont des paramètres caractéristiques de la fraction du sol passant au travers du tamis de 400 µm.

Ce sont des teneurs en eau caractérisant le passage, pour les sols fins, d'un état à un autre.

Le but des limites d'Atterberg est la mesure de l'aptitude de l'argile à être plus ou moins plastique.

Mehrez KHEMAKHEM 88

Pathologie des sols et des fondations

*les paramètres de nature :*

b/ Les limites d'Atterberg – La plasticité

**La limite de liquidité  $w_L$  qui sépare l'état plastique de l'état liquide :**

- à la coupelle de Casagrande (NF P 94-051) - au cône (NF P 94-052-1)

**La limite de plasticité  $w_p$  qui sépare l'état plastique de l'état solide :** déterminée par la méthode du rouleau (NF P 94-051)

**La limite de retrait  $w_R$  (XP P 94-060-1), teneur en eau au dessous de laquelle le volume de l'échantillon est supposé ne plus varier**

Mehrez KHEMAKHEM 89

Pathologie des sols et des fondations

Indice de plasticité	Qualificatif
$I_p \leq 12$	Non plastique
$12 < I_p \leq 25$	Peu plastique
$25 < I_p \leq 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Sols et provenance	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Teneur en eau naturelle
Argile de Tunis	59	39	35
Vase du lac sud (Tunis)	71	43	60
Argile de Mateur	85	56	35
Argile du sud Tunisien	130	92	95
Argile de Bizerte	78	41	32

Mehrez KHEMAKHEM 90

**Pathologie des sols et des fondations**

$I_R$	Potentiel de gonflement
0 à 20	Faible
20 à 30	Moyen
30 à 60	Fort
> 60	Très fort

Consistance du sol	$I_c$	Cohésion non drainée ( $C_u$ ou $S_u$ ) en kPa	Identification en place
Liquide	$I_c < 0$	< 20	On peut facilement enfoncer le doigt sur plusieurs cm
Très Molle	0 à 0.25	20 à 40	Le pouce s'enfonce facilement sur plusieurs cm
Molle	0.25 à 0.5	40 à 75	Le pouce peut être enfoncé sur plusieurs cm avec un effort modéré.
Ferme	0.5 à 0.75	75 à 150	Empreinte avec le pouce, mais pénétration seulement avec un grand effort.
Très ferme	0.75 à 1	150 à 300	Facile à rayer avec l'ongle du pouce
Dure	$I_c > 1$	> 300	Difficile à rayer avec l'ongle du pouce.

Mehrez KHEMAKHEM 91

**Pathologie des sols et des fondations**

**Retrait plastique d'une argile (montmorillonite)**

Conception manip : J.M. Torrenti  
Photos : H. Delahousse

Mehrez KHEMAKHEM 92

**Pathologie des sols et des fondations**

**Certains types de gonflement tirent leurs origines suite à des réactions chimiques avec certains sols.**

Composants	Produits de la transformation	Caractère de la réaction	Potentiel de gonflement (%)
Anhydrite + eau	Gypse	Réversible	61
Calcaire + acide phosphorique	Phosphate tricalcique	Irréversible	15
Pyrite + chaux	Ettringite		200
Mâchefer + eau	Mâchefer passivé	irréversible	

Mehrez KHEMAKHEM 93

**Pathologie des sols et des fondations**

Définition des différents niveaux de prise en compte du gonflement

Niveau	Prise en compte du gonflement	Source d'information	Paramètres entrants	Paramètres sortants
Pré-étude	A	Forfaitaire	Cartographie spécifique ou géologique	Coefficients majorateurs
Etude classique	B	Forfaitaire	Paramètres déduits par corrélation	$I_p, V_{BS}, \sigma_g, \Delta V/V$
Etude avancée	C	Calculs spécifiques	Essais et recherche d'anciens cas localement	$\sigma_g, \Delta V/V, \sigma_g, \Delta V/V$
Construction	E	Dispositions constructives	Recommandations de la bibliographie	$\sigma_g, \Delta V/V$
Vie normale de l'ouvrage	F	Entretien	Maître d'oeuvre et entrepreneur	Suivi de l'ouvrage $\Delta V/V$
Vie de l'ouvrage avec pathologie	G	Réparations	Expertise	

Mehrez KHEMAKHEM 94

**Pathologie des sols et des fondations**

Critère de sélection des techniques d'essai suivant l'ouvrage

			Ouvrage				
			Pente, Remblai	Fondation superficielle	Fondation profonde	Soutènement	Ouvrage enterré
B	Identification	Granulométrie	1	1			
		Limites d'Atterberg	3	3	3	3	2
		Essai au Bleu	3	3	2	2	2
		Limite de retrait	3	3			
C	Caractérisation mécanique en laboratoire	Gonflement à l'œdomètre	2	3	3	3	
		œdomètre à gonflement libre	3				
	Caractérisation mécanique in situ	Essai de plaque	2	3			
		Suivi de l'ouvrage	3	3	2	3	3

Légende : 3 : Nécessaire - 2 : intéressant - 1 : facultatif

Mehrez KHEMAKHEM 95

**Pathologie des sols et des fondations**

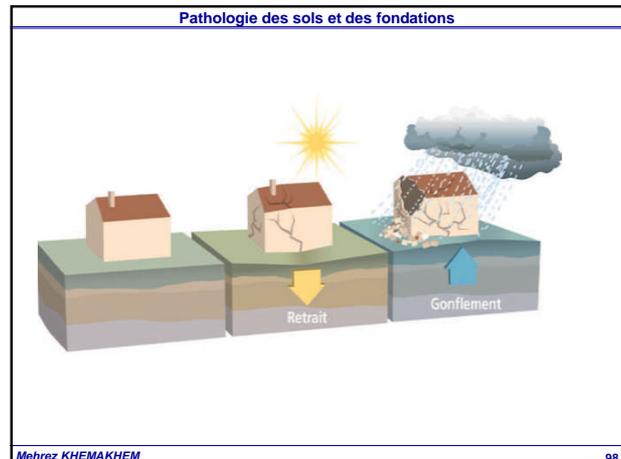
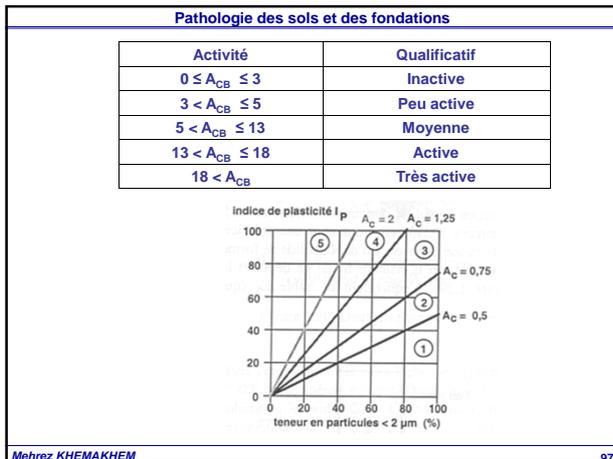
Les propriétés de plasticité des argiles sont dues presque exclusivement à l'interaction des particules de dimension "argileuse" ( $C_2$  de diamètre < 2  $\mu$ m) avec l'eau.

Si la composition minéralogique de l'argile est constante, l'indice de plasticité du sol est proportionnel à la quantité d'argile présente dans le sol.

L'activité  $A_{CB}$ , est le rapport de la valeur de bleu de méthylène du sol  $V_{BS}$  à sa teneur en particules argileuses  $C_2$ .

$$A_{CB} = \frac{V_{BS}}{C_2}$$

Mehrez KHEMAKHEM 96



**Pathologie des sols et des fondations**

**Le phénomène de gonflement :** l'augmentation de volume  
 → mobilisation d'une contrainte de soulèvement exercée à la base de la fondation  
 → la fondation subit des soulèvements pouvant disloquer la structure et provoquer des désordres apparents  
 → le soutènement des déplacements latéraux supplémentaires.

**Le phénomène de retrait :**  
 diminution de volume  
 → tassement du sol d'assise  
 → l'affaissement de la structure.

Mehrez KHEMAKHEM 99

**Pathologie des sols et des fondations**

**LE MÉCANISME DE GONFLEMENT ET DE RETRAIT :**  
 Les déformations volumiques des sols sont généralement attribuées à trois phénomènes principaux :

- l'effet mécanique
- L'effet hydrique
- L'effet physico mécanique

Auxquels s'ajoutent l'influence de la végétation éventuellement

Mehrez KHEMAKHEM 100

**Pathologie des sols et des fondations**

**L'effet mécanique :**  
 La modification de l'état de contraintes extérieures, du fait par exemple de l'adjonction ou de l'enlèvement de charges ou de surcharges conduit lorsque le nouvel équilibre s'établit, à une déformation du sol à sa périphérie, d'où par exemple un déplacement en surface (tassement, soulèvement). Cette déformation est constituée par la somme des déformations élémentaires créées en tous points de la masse du sol par la modification de l'état de contrainte effective mécanique en ces points.

Mehrez KHEMAKHEM 101

**Pathologie des sols et des fondations**

**L'effet hydrique :**  
 Un changement dans les conditions hydriques du sol conduit à une modification des pressions interstitielles qui y règnent. La variation du niveau de la nappe phréatique éventuelle présente dans un sol modifie l'état du champ de pression interstitielle de ce dernier aussi bien au dessous qu'au dessus du niveau de la nappe.

Dans un sol, le principe général de la contrainte effective  $\sigma'$  peut s'écrire sous la forme de fonctions de la contrainte totale et des pressions interstitielles :

$$\sigma' = F(\sigma - u_a) + G(u_a - u_w)$$

$u_a$  : pression interstitielle de l'air  
 $u_w$  : pression interstitielle

Mehrez KHEMAKHEM 102

**Pathologie des sols et des fondations**

Divers facteurs entraînant une diminution de la teneur en eau du sol, provoquent une augmentation de la succion. On peut citer l'exemple d'une dessiccation due à la sécheresse (évaporation de surface, baisse du niveau de la nappe phréatique, succion de l'eau du sol par les végétaux, ...).

Dans le cas d'une telle dessiccation l'augmentation de succion reste généralement concentrée sur la tranche superficielle du sol et conduit à un retrait qui peut en outre provoquer une fissuration du sol.

Mehrez KHEMAKHEM

103

**Pathologie des sols et des fondations**

**L'effet physico-chimique**

L'apport d'eau et sa fixation au niveau de certaines particules de l'argile conduisent à des phénomènes d'hydratation de ces particules entraînant une augmentation de volume. Ce mécanisme d'hydratation est largement conditionné par :

- Le type et la nature des minéraux argileux
- La structure du matériau
- La pression interstitielle ou la succion
- La concentration ionique du fluide interstitiel
- L'histoire du matériau et en particulier les liaisons issues des processus de cimentation.

L'étude de ces phénomènes est complexe VBS et limites : suffisants

Mehrez KHEMAKHEM

104

**Pathologie des sols et des fondations**

**L'influence de la végétation :**

Les racines des végétations soutirent l'eau du sol par succion. L'eau pompée par les racines crée dans le sol une dépression locale.

En considérant l'arbre au centre de prélèvement d'eau dans les périodes de bilan hydrique négatif (où le départ est supérieur à l'apport), le sol tasse comme une cuvette centrée sur l'arbre

Lorsque le bilan hydrique redevient positif, les mécanismes inverses peuvent se manifester.

La zone d'influence des racines d'un arbre est fonction de la nature de la végétation et de l'âge. En profondeur, les racines peuvent atteindre 1 à 1.5 fois la hauteur de l'arbre. Horizontalement, les désordres observés et causés par les arbres ont atteint des distances minimales de 10 m.

Mehrez KHEMAKHEM

105

**Pathologie des sols et des fondations**



	Chêne	Pin	Peuplier	Alisier	Frêne	Orme	Chêne	Alisier	Frêne	Orme	Chêne	Alisier	Frêne	Orme	Chêne	Alisier	Frêne	Orme	Chêne	Alisier	Frêne	Orme	
Hauteur maximale en zone urbaine (mètres)	10-23	25-28	14-23	10-20	12-15	10-24	15-25	10	20	25-30	8-12	10-24	6-12	12-14	15-25	8-12	17-25						
Distance maximale de désordre (mètres)	30	30	21	12,4	23	20	40	11,5	15	15	10	20	11	10	20	11	25						
Distance en dessous de laquelle 50 % des désordres ont été constatés (mètres)	9,5	11	6	7	7,5	6	7	5	6	5,5	4	6	3	4	2,5	5	8						
% de désordres liés à l'essence considérée	11,5	8,7	7,5	3	3	8,2	5,7	4,6	1	11	5,7	8,3	6	2	3	2	2	0,8	0,7	0,35			
% de l'essence dans la population	2,1	3	3	1,8	2,2	6,4	4,5	3,5	1	13,7	7,1	13,9	14,7	4,9	10	9,4	-						
Coefficient d'agressivité *	5,5	2,9	2,5	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1	0,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	-						

\* Le coefficient d'agressivité est le rapport du % de désordres liés à l'essence sur le % de l'essence dans la population globale.

Mehrez KHEMAKHEM

106

**Pathologie des sols et des fondations**

**Les matériaux non argileux :**

Certains types de gonflement tirent leurs origines suite à des réactions chimiques avec certains sols.

Composants	Produits de la transformation	Caractère de la réaction	Potentiel de gonflement (%)
Anhydrite + eau	Gypse	Réversible	61
Calcaire + acide phosphorique	Phosphate tricalcique	Irréversible	15
Pyrite + chaux (calcaire + sulfure de fer)	Ettringite		200
Mâchefer + eau	Mâchefer passivé	Irréversible	

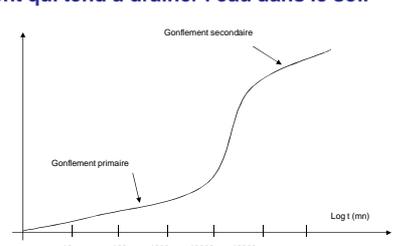
Mehrez KHEMAKHEM

107

**Pathologie des sols et des fondations**

**Cinétique du gonflement :**

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très long du fait de la faible perméabilité des argiles et de la diminution continue, en fonction du temps, du gradient qui tend à drainer l'eau dans le sol.



Mehrez KHEMAKHEM

108

**CARACTÉRISATION DES SOLS GONFLANTS**

Les effets précédents sont rarement dissociés. Il est difficile d'effectuer une séparation précise et quantifiée de chacun de ces effets.

L'abaissement du niveau de la nappe provoque une modification de l'état de contrainte effective, mais également et dans des proportions plus ou moins importantes selon la nature du sol, une modification des conditions physico-chimiques et donc des phénomènes d'interaction entre l'eau et les particules de sol.

Afin d'évaluer ces effets : procéder à la détermination de divers paramètres caractéristiques facilement mesurables, intervenant dans ces effets, puis de les prendre en compte dans des modèles de comportement.

**Essais d'identification :**

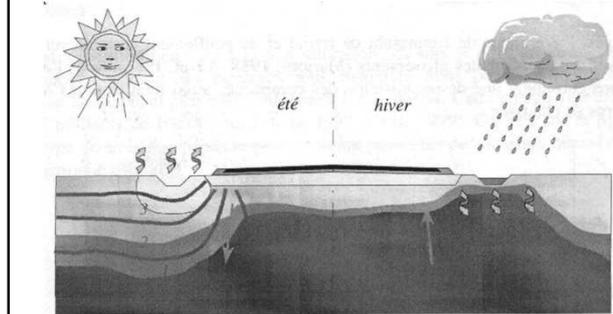
Les paramètres d'identification d'un sol varient suivant sa nature. Ainsi, identifier un sable, une marne ou une argile ne se fait pas de la même manière.

Dans la classification LCPC, un sol fin peut être identifié à partir de l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg ( $w_L$  et  $I_p$ ).

Pour un sol argileux susceptible de gonfler, d'autres essais sont nécessaires.

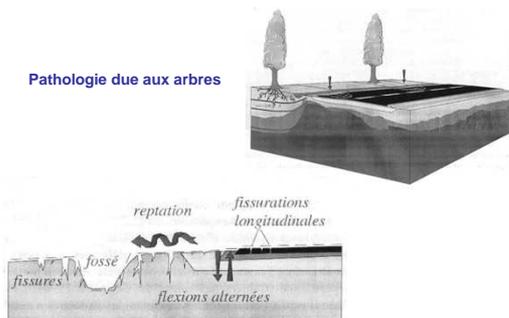
**Autres structures concernées par le gonflement :****Les ouvrages en terre :**

- les déblais : suite à un déblai dans un sol gonflant, il y aura décompression et déconsolidation du fond de fouille puis des coulées et glissements des talus non revêtus.
- les remblais : l'utilisation de remblai en sol gonflant suivi d'un compactage inférieur à 95 % de l'OPN provoquera des pathologies certaines dans le sol.
- les chaussées : La présence de sol gonflant ou rétractant provoquera des désordres au niveau du corps de la chaussée ou sur les accotements



Influence saisonnière pour une chaussée

Pathologie due aux arbres



Reptation due à l'influence saisonnière

**Les bâtiments :**

Le phénomène de gonflement conduit :

- à une libération ou à un développement très différentiel du gonflement
- à des contraintes parasites de flexion dans la structure et à des contraintes parasites dans le sol.

La présence d'un bâtiment vient perturber ce gradient d'évaporation. Les remontées capillaires vont se poursuivre par succion mais, au lieu de s'évaporer, elles vont augmenter la teneur en eau des couches expansives. Un apport externe accidentel ne peut qu'aggraver la situation.

**Pathologie des sols et des fondations**

a) b)

pathologie sous une construction due à la succion

Mehrez KHEMAKHEM 115

**Pathologie des sols et des fondations**

Pour les fondations profondes, les pathologies proviennent souvent suite à un soulèvement.

Si le potentiel de gonflement se libère, le sol se soulève suite à l'adhérence sol-pieu.

La contrainte de rupture d'adhérence sol-pieu peut être atteinte et il y aura développement des efforts de traction dans le pieu.

Si le pieu est fiché dans le sol gonflant, il y aura soulèvement. Le pieu résistera soit par la présence d'une surcharge, soit par une hauteur minimale de fiche dans un bon sol.

Mehrez KHEMAKHEM 116

**Pathologie des sols et des fondations**

**Les ouvrages d'art et enterrés**

Derrière un mur de soutènement, généralement le matériau est drainant pour éviter les poussées dues à l'eau. S'il y aura pathologie suite à un gonflement, cela peut être dû à une défaillance du système de drainage ou à un gonflement localisé.

Mehrez KHEMAKHEM 117

**Pathologie des sols et des fondations**

Pour les ouvrages enterrés, et particulièrement les réseaux, l'infiltration d'eau localisée serait la cause du gonflement inégal de l'argile sous-jacente

pathologie affectant une conduite enterrée

Mehrez KHEMAKHEM 118

**Pathologie des sols et des fondations**

Mehrez KHEMAKHEM 119

**Pathologie des sols et des fondations**

Mehrez KHEMAKHEM 120



Pathologie des sols et des fondations

### SYNTHÈSE POUR LES SOLS GONFLANTS

Le risque naturel d'un sol gonflant doit être pris en compte le plus en amont possible dans un projet de Génie Civil.

Cette prise en compte peut se faire à plusieurs niveaux de la pré-étude jusqu'à le suivi de l'ouvrage ou l'apparition d'une pathologie.

Mehrez KHEMAKHEM 122

Pathologie des sols et des fondations

### SYNTHÈSE POUR LES SOLS GONFLANTS

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

### DES FACTEURS DE DÉCLANCHEMENT

Mehrez KHEMAKHEM 123

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

**La nature du sol**  
La susceptibilité est fonction :

- De la lithologie
- De la composition minéralogique
- De la géométrie de l'horizon argileux
- De la continuité des niveaux argileux

Mehrez KHEMAKHEM 124

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

**Le contexte hydrogéologique**  
Les facteurs néfastes sont :

- La présence éventuelle de la nappe
- L'existence de circulation souterraine à faible profondeur

-Ces facteurs peuvent varier dans le temps en fonction :

- De l'évapotranspiration perceptibles à faible profondeur (2 m environ)
- De la fluctuation de la nappe

Mehrez KHEMAKHEM 125

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION

**La géomorphologie**  
Les facteurs conditionnant :

- Un terrain en pente entraîne une dissymétrie des fondations mais facilite le drainage
- Le terrain plat favorise la stagnation des eaux
- La variation de la nature du terrain
- L'orientation soumet les sols à des ensoleillements plus importants que d'autres

Mehrez KHEMAKHEM 126

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION



**La végétation**

L'aspiration de l'eau par les racines provoque une migration de l'eau qui se traduit (double distorsion verticale et horizontale):

- Un tassement centré sur l'arbre
- Un lent déplacement du sol vers l'arbre

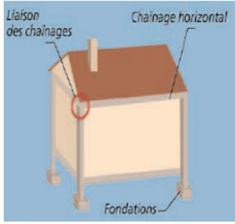
Les mécanismes sont inverses dans le cas d'un bilan inverse

**L'influence d'un arbre adulte peut se faire sentir jusqu'à une distance équivalente à une fois sa hauteur et jusqu'à une profondeur de 4 à 5 m**

Mehrez KHEMAKHEM 127

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION



**Les défauts de construction**

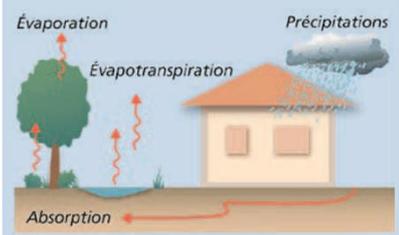
Elles concernent :

- Les défauts de conception : structure, fondation, absence de chainage,....
- Les défauts d'exécution

Mehrez KHEMAKHEM 128

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE DECLANCHEMENT



**Les conditions climatiques**

Se sont principalement :

- Sécheresse particulière
- Grandes précipitations

Mehrez KHEMAKHEM 129

Pathologie des sols et des fondations

### DES FACTEURS DE DECLANCHEMENT



**Les facteurs anthropiques**

1/ Des travaux peuvent :

- Perturber la répartition naturelle des écoulements superficiels et souterrains
- Bouleverser les conditions d'évaporation.

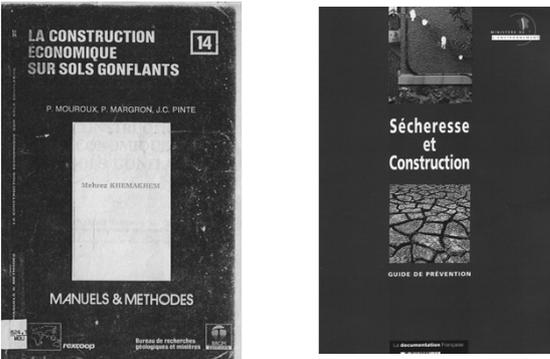
2/ Les fuites des canalisations changent l'état hydrique du sol

3/ Des sources de chaleur en sous-sol mal isolé peuvent provoquer la dessiccation

Mehrez KHEMAKHEM 130

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES



Mehrez KHEMAKHEM 131

## DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**UNE REGLE D'OR**

EVITER A TOUT PRIX LES VARIATIONS DIFFÉRENTIELLES DE LA TENEUR EN EAU SOUS LA CONSTRUCTION AINSI QU'À SON VOISINAGE IMMÉDIAT

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**ADAPTATION DES FONDATIONS :**

Plate-forme en déblais-remblais  
Caniveau d'évacuation des eaux de ruissellement  
Remblai  
Contrepente

Plate-forme en déblais

Mehrez KHEMAKHEM 133

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**RIGIDIFICATION DE LA STRUCTURE**

Chainage

Mehrez KHEMAKHEM 134

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**REALISATION D'UNE CEINTURE ETANCHE AUTOUR DU BATIMENT**

Trottoir périphérique largeur 1,50 m

Mehrez KHEMAKHEM 135

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**ELOIGNEMENT DES LA VAGATATION DU BÂTI**

1 fois minimum la hauteur de l'arbre à maturité

Mehrez KHEMAKHEM 136

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**CREATION D'UN ECRAN ANTI-RACINES :**

Écran anti-racines  
≥ 2 m

Mehrez KHEMAKHEM 137

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

**RACCORDEMENT DES RÉSEAUX D'EAUX AUX RÉSEAUX COLLECTIFS**

Eaux pluviales  
Raccordement collectif  
EP  
EU  
Eaux usées  
Fosse septique

Mehrez KHEMAKHEM 138

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

#### ÉTANCHEIFICATION DES CANALISATIONS ENTERRÉES

Les canalisations ne doivent pas être bloquées dans le gros-œuvre

Canalisation scellée dans le mur  
Mortier  
Canalisation encastrée dans la fondation

Mehrez KHEMAKHEM 139

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

#### LIMITER LES SOURCES DE CHALEUR EN SOUS-SOL

Dispositif d'isolation thermique des murs  
Isolation thermique  
Chaudière

Mehrez KHEMAKHEM 140

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

#### DÉSOLIDARISER LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DE STRUCTURE

Désolidarisation des constructions fondées différemment

Joint de rupture

Mehrez KHEMAKHEM 141

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

#### RÉALISATION D'UN DISPOSITIF DE DRAINAGE

Terre végétale  
Argile  
Revêtement étanche  
environ 2 m  
Géotextile  
Remplissage en granulats sans fines

Mehrez KHEMAKHEM 142

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Mise en place de protections périmétriques protégeant les fondations des infiltrations d'eau et accrossement de l'évaporation  
2 à 3 m  
Encasement des fondations d'une profondeur minimale de 1 m, avec bétonnage à pleine fouille et compactage soigné des remblais  
Éloignement des arbres ou mise en place d'écrans anti-racines  
Création de sous-sol  
Mise en place d'un système de drainage collectant les eaux de circulation  
Garantie de l'étanchéité des réseaux  
L > H

Mehrez KHEMAKHEM 143

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Permettre les mouvements des cloisons reposant sur les dallages  
Rigidifier de la structure: chaînages horizontaux au niveau des planchers et verticaux dans les angles  
Préférer un plancher porté à un dallage sur terre plein  
Rigidification des semelles  
Dans le cas de fondations isolées mise en place d'une protection sous les longrines

Mehrez KHEMAKHEM 144

**Pathologie des sols et des fondations**

a. On éloignera les eaux de ruissellement du bâtiment

b. On peut aussi utiliser des geomembranes

Mehrez KHEMAKHEM 145

**Pathologie des sols et des fondations**

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Les canalisations ne doivent pas être bloquées dans le gros-œuvre

Mehrez KHEMAKHEM 146

**Pathologie des sols et des fondations**

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 38 – Faux équilibre des pressions.

Fig. 39. – Drainage dangereux.

Mehrez KHEMAKHEM 147

**Pathologie des sols et des fondations**

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 42. – Importance du vide sanitaire.

Mehrez KHEMAKHEM 148

**Pathologie des sols et des fondations**

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

a. La meilleure solution est le drainage éloigné du bâtiment

b. A défaut, le drain sera implanté le long du bâtiment, sur le débord de la semelle, et sera réalisé conformément au D.T.U. 20.1

Mehrez KHEMAKHEM 149

**Pathologie des sols et des fondations**

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Remblai compacté, peu perméable et inerte à l'eau (voir ci-dessus)

SOL GONFLANT

Mehrez KHEMAKHEM 150

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 6-1 Eloignement des eaux de ruissellement de la chaussée

Fig. 6-4 Variation des paramètres de gonflement avec le dosage en chaux sur une bentonite (Derriche et al., 1997)

Mehrez KHEMAKHEM 151

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 6-2 Eloignement des eaux de ruissellement du bâtiment (CEBTP, 1991)

Mehrez KHEMAKHEM 152

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 6-3 Dispositions constructives de raccordement du bâtiment (CEBTP, 1991)

Mehrez KHEMAKHEM 153

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 56 - Dispositions constructives de raccordement souple des réseaux (JENI)

Mehrez KHEMAKHEM 154

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 61. - Solution anti-adhérence pour les pieux (MARI)

Mehrez KHEMAKHEM 155

Pathologie des sols et des fondations

### DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 6-14 Protection de fût de pieu

Mehrez KHEMAKHEM 156

Pathologie des sols et des fondations

## DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Fig. 6-15 Pieu en condition de non soulèvement
Fig. 6-16 Pieu à base élargie

Mehrez KHEMAKHEM
157

Pathologie des sols et des fondations

## Partie C : les sols mous

- problématique des sols mous
- comportement des sols mous
- caractérisation des sols mous
- instrumentation des sols mous
- Techniques d'amélioration

Mehrez KHEMAKHEM
158

Pathologie des sols et des fondations

### PROBLÉMATIQUE DES SOLS MOUS :

Les sols dits mous sont les sols jugés extrêmement compressibles.

Les dépôts des sols mous recouvrent une bonne partie de certaines villes dans le monde. Les constructions sur ces dépôts sont de plus en plus fréquentes vu que les sols « idéaux » se raréfient.

Les problèmes liés à ces sols sont nombreux et complexes. Ils peuvent être sommairement résumés aux :

- problèmes liés à la stabilité
- problèmes liés aux tassements
- problèmes d'interaction entre sol et ouvrages

Mehrez KHEMAKHEM
159

Pathologie des sols et des fondations

Les dépôts des sols compressibles sont d'origine géologique très récente. Ils sont formés depuis les dernières phases du pléistocène depuis moins de 20000 ans. Ces dépôts peuvent être déposés dans plusieurs milieux dont principalement :

- Les milieux marins,**
- Les milieux lacustres (dans des lacs) :** ces dépôts peuvent être très variables selon leur origine et localisation
- Les milieux deltaïques :** ce sont des milieux très actifs et complexes. Ces dépôts stratifiés et composés de couches d'argiles intercalés de couches de matériaux grossiers.
- Les milieux côtiers et lagunaires :** selon les conditions topographiques, ces milieux s'approprient à des milieux marins ou deltaïques. Les dépôts sont généralement récents et peu consolidés.

Mehrez KHEMAKHEM
160

Pathologie des sols et des fondations

### COMPORTEMENT DES SOLS MOUS :

Lorsque le sol est soumis à des forces, il a toujours tendance à subir une variation de volume. Lorsque le sol est saturé, et puisqu'il est incompressible, cette variation ne peut avoir lieu que s'il y a mouvement de l'eau (expulsion).

L'écoulement de l'eau dans un sol n'est jamais instantané et la vitesse d'écoulement dépend de la valeur du coefficient de perméabilité du sol.

Dans les sols grenus et sols fins chargés lentement : la perméabilité et résistance au cisaillement régis que par le comportement du squelette solide.

→ **comportement drainé ou à long terme**

→ L'eau ne joue aucun rôle.

Dans les sols fins, le coefficient de perméabilité est faible l'eau met un temps très lent pour s'écouler.

→ **comportement non drainé à court terme.**

→ Le sol se déforme alors à volume constant et l'eau joue un rôle important dans le comportement.

Mehrez KHEMAKHEM
161

Pathologie des sols et des fondations

A ces deux types de comportements correspondent deux résistances au cisaillement différentes pour un même sol fin.

Mehrez KHEMAKHEM
162

## Pathologie des sols et des fondations

Il y a lieu de considérer les deux état de comportement **non drainé** et comportement **drainé** en fonction de l'état d'avancement des travaux et de la cinétique d'application des charges. Pour des sols fins et de faible perméabilité, lorsque les charges sont appliquées dans un temps court, le comportement sera non drainé.

Pour un comportement non drainé, les caractéristiques du sol seront les caractéristiques non drainées. C'est par exemple le cas de la phase de construction des ouvrages. Après construction, il a consolidation du sol support avec diminution de la pression interstitielle  $u$  et augmentation correspondante des contraintes effectives  $\sigma'$  et des tassements.

Le tassement des sols sous les charges évolue en fonction du temps en fonction de la dissipation de la pression interstitielle.

Mehrez KHEMAKHEM

163

## Pathologie des sols et des fondations

**CARACTÉRISATION DES SOLS MOUS :**

Pour les sols mous, en plus des informations habituelles nécessaires pour identifier un sol, des essais spécifiques devront être réalisés pour donner des informations sur :

- la stabilité
- l'amplitude et la vitesse des tassements.
- l'état de la pression interstitielle

Les essais et méthodes spécifiques qui peuvent donner ces informations sont soit de laboratoire soit in situ.

**Méthodes géophysiques****Essais in situ****Essais de laboratoire**

Mehrez KHEMAKHEM

164

## Pathologie des sols et des fondations

**Méthodes géophysiques :**

Ces méthodes sont utilisées pour caractériser des zones étendues. Elles donnent une idée sommaire de la stratigraphie et la localisation des socles rocheux. Elles sont parfois utilisées au moment de la reconnaissance préliminaire.

**Essais in situ :**

Les essais de base pour les sols mous sont principalement :

- le **pénétromètre statique**,
- le **piézocône**,
- le **scissomètre de chantier**.

Mehrez KHEMAKHEM

165

## Pathologie des sols et des fondations

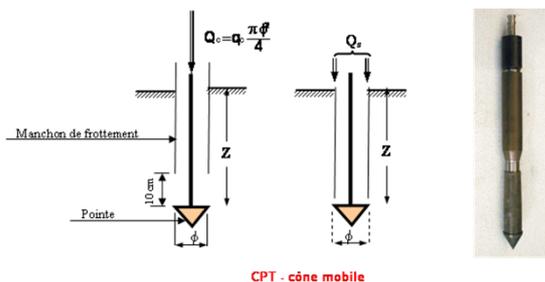
**L'essai de pénétration statique (CPT)**

donne la résistance à la pénétration d'un cône en fonction de la profondeur. Le principe de l'appareil de pénétration statique consiste à enfoncer verticalement dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, à vitesse constante imposée ( $2 \text{ cm/s}$ ), une pointe munie d'un cône en partie inférieure par l'intermédiaire d'un train de tiges qui lui est solidaire et à mesurer la résistance à la pénétration de ce cône. Les mesures se font de manière continue ou à intervalles de profondeur déterminés. On peut également mesurer l'effort total de pénétration  $Q_z$ , l'effort de frottement local  $Q_s$  sur un manchon de frottement (situé au dessus du cône) et la pression interstitielle développée au niveau d'un filtre au dessus du cône et de même diamètre. Il existe deux types de cônes

Mehrez KHEMAKHEM

166

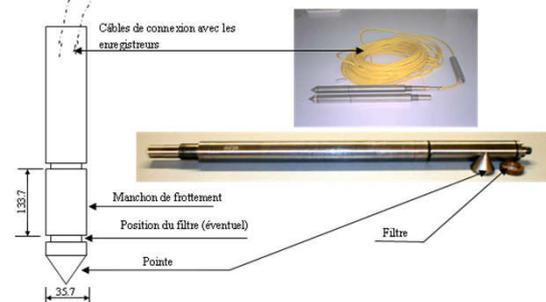
## Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM

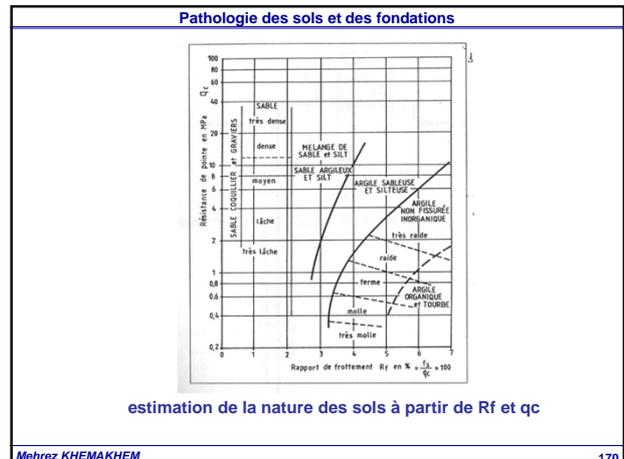
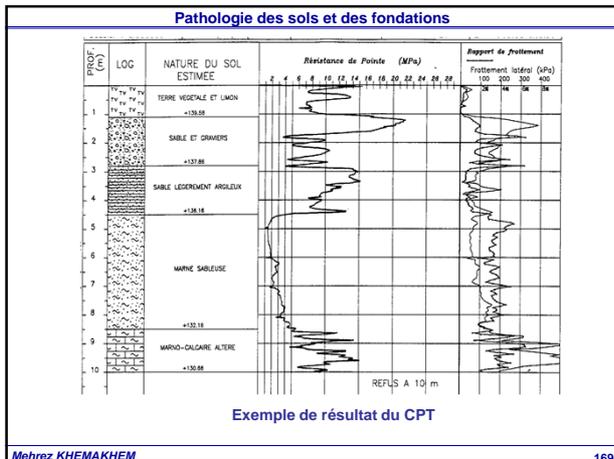
167

## Pathologie des sols et des fondations



Mehrez KHEMAKHEM

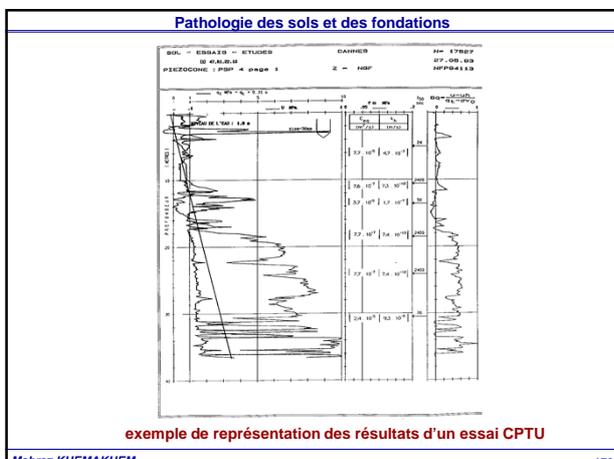
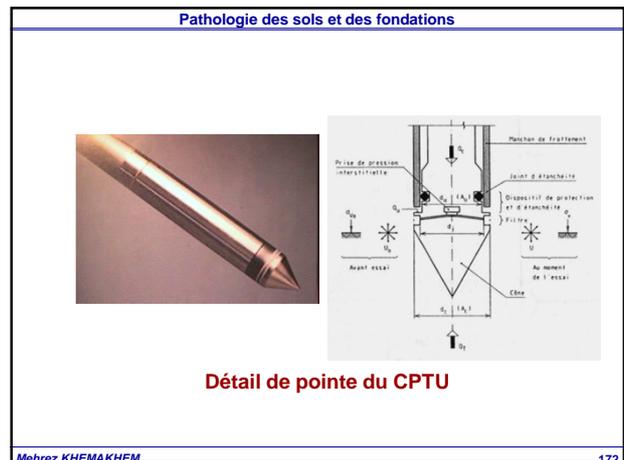
168



**Pathologie des sols et des fondations**

**l'essai au piézocône (NF P 94-119) :**  
 L'essai au piézocône (CPTU) est un essai effectué avec le même équipement que l'essai de pénétration statique avec le cône standard de référence auquel on a ajouté une prise de pression interstitielle annulaire de 3 à 5mm de hauteur dans les 10mm cylindriques qui suivent immédiatement le cône.  
 Cet essai s'applique à tous les sols fins ou grenus de dimension inférieure à 20 mm à condition qu'ils soient sous la nappe. En plus des mesures faites dans l'essai CPT, on mesure la pression interstitielle u. Cet essai demande une attention particulière quant à la préparation de la pointe et sa saturation ; c'est une opération fondamentale qui garantirait par la suite la fiabilité des résultats.

Mehrez KHEMAKHEM 171



**Pathologie des sols et des fondations**

Plusieurs interprétations sont possibles à partir des résultats du piézocône.  
 Les paramètres essentiels sont u, la dissipation de u,  $t_{50}$  et  $B_q$ .  
 Les principaux avantages du CPTU par rapport au CPT sont :

- possibilité de distinguer entre pénétration drainée, partiellement drainée et non drainée,
- possibilité de corriger la résistance pour tenir compte de la fraction reprise par la pression interstitielle u
- possibilité d'estimer les paramètres d'écoulement et de consolidation
- possibilité d'estimer les conditions hydrauliques à l'équilibre ;
- meilleure caractérisation du type et du profil de sol.

Mehrez KHEMAKHEM 174

Pathologie des sols et des fondations

**L'essai scissométrique en place (NF P 94-112) :**

L'essai au scissomètre de chantier peut être considéré comme l'essai de référence pour l'étude de la stabilité des ouvrages sur sols mous. Il permet de mesurer la **cohésion non drainée** (apparente) des sols fins saturés de faible résistance : tourbes, vases, argiles molles,... Un moulinet cruciforme de hauteur  $H$  et de diamètre  $D$  est introduit par fonçage dans le sol jusqu'au niveau où l'on veut exécuter la mesure. La rotation du moulinet, auquel on applique un moment de torsion, cisaille le sol (à la profondeur de l'essai) suivant une surface cylindrique circonscrite au moulinet. Le rapport des valeurs enregistrées permet de tracer un diagramme représentant les moments de torsion, mesurés par un couplemètre, en fonction de l'angle de rotation  $\theta$  du train de tiges.

Mehrez KHEMAKHEM 175

Pathologie des sols et des fondations

Les limitations de l'essai au scissomètre sont les suivantes:

- des précautions doivent être prises pour ne pas remanier le sol à essayer;
- la présence de pierres dans le voisinage du scissomètre influence les résultats. Il en est de même pour les limons et les sables, par couches ou par lentilles;
- la rupture se fait suivant une direction verticale et ne correspond pas nécessairement à une rupture oblique dans un sol anisotrope;

Mehrez KHEMAKHEM 176

Pathologie des sols et des fondations

Mehrez KHEMAKHEM 177

Pathologie des sols et des fondations

**résultats de l'essai scissométrique**

Mehrez KHEMAKHEM 178

Pathologie des sols et des fondations

**Essais de laboratoire :**

- les limites d'Atterberg
- la teneur en matières organiques
- la résistance au cisaillement
- les essais triaxiaux

\*Cheminisation des niveaux de résistance au cisaillement

Mehrez KHEMAKHEM 179

Pathologie des sols et des fondations

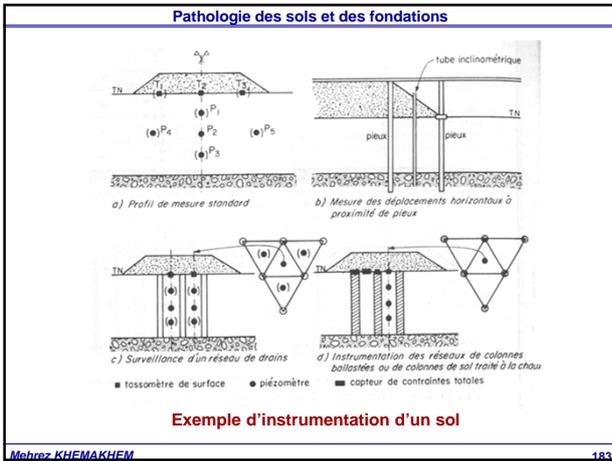
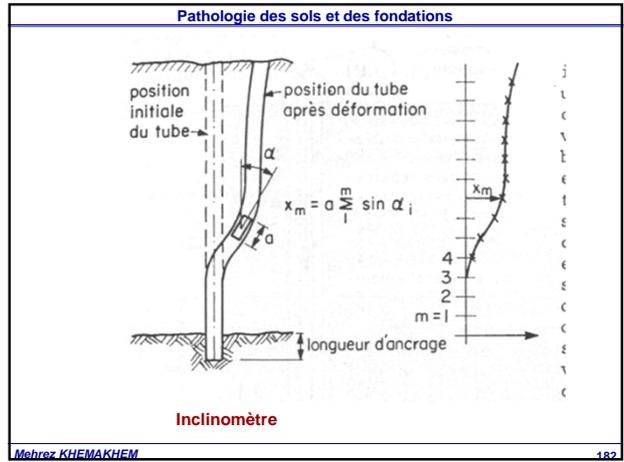
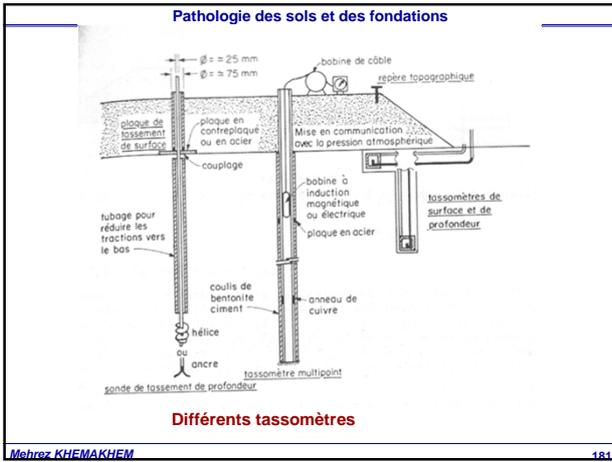
**Instrumentation des sols mous :**

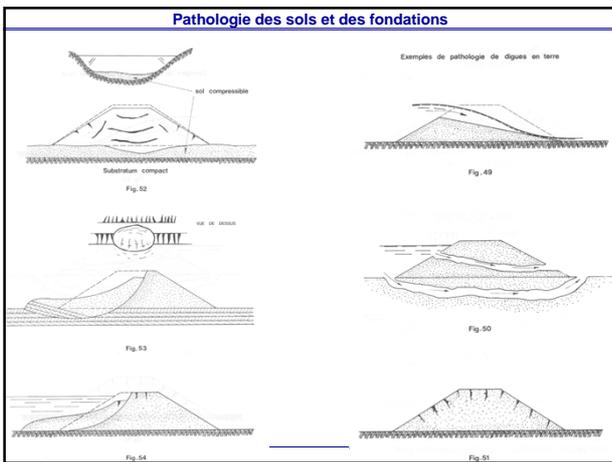
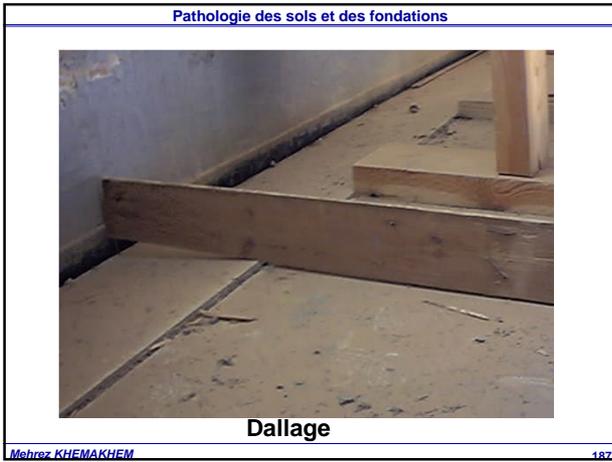
La mesure et le suivi des déformations et des pressions dans un sol mou demande une instrumentation spécifique. On utilise principalement :

- des mesures de pression interstitielle à différents niveaux dans le sol de fondation. On utilise principalement les piézomètres (hydrauliques, pneumatiques ou électriques).
- des mesures de tassement du sol à différentes profondeurs dans le massif de l'argile molle. Plusieurs types de tassomètres sont utilisés dont le tassomètre multipoint, le tassomètre ponctuel et la sonde de tassement de profondeur.
- des mesures de déplacements horizontaux dans le massif de l'argile molle. On utilise principalement l'inclinomètre.

Une campagne d'instrumentation peut être faite sur des planches d'essais pour suivre les différentes sollicitations dans le sol. Cette campagne regroupe en général tous les instruments nécessaires.

Mehrez KHEMAKHEM 180





Pathologie des sols et des fondations

**Séisme de Boumerdès**  
**21/05/2003**  
**M=6.8**



**Séisme d'El-Asnam**  
**10/10/1980**  
**M=7.3**