

Chapitre 4 : Pathologies des Fondations

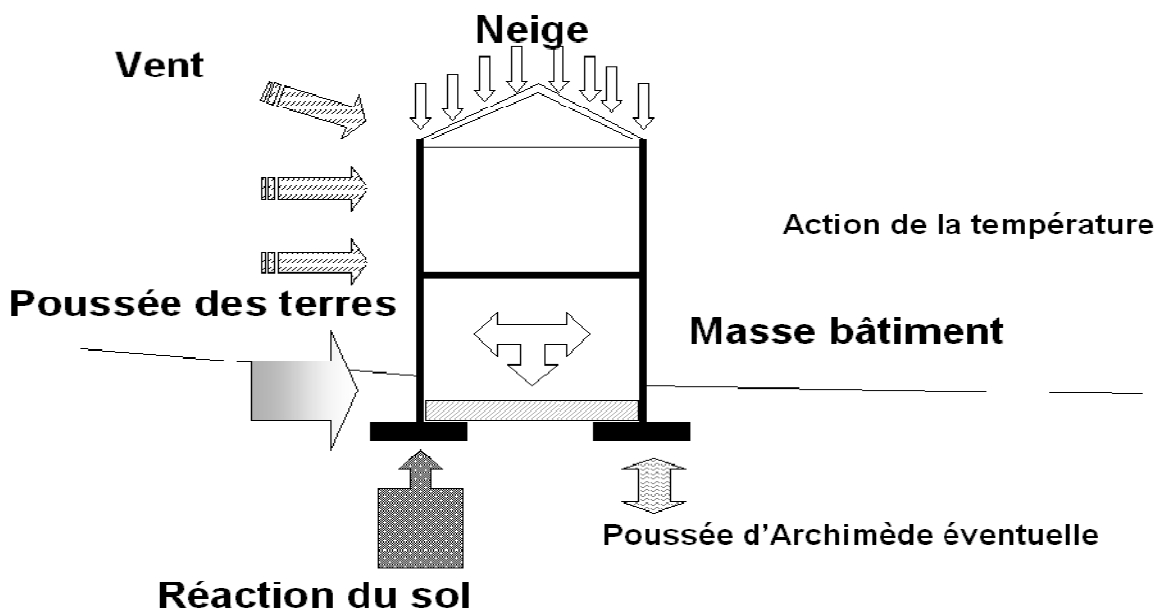
1. Introduction:

En général, les désordres dus à des problèmes de fondation entraînent des frais importants. Ils sont très variés et d'origines diverses. Leurs effets peuvent aller de la fissuration de la structure du bâtiment jusqu'à sa mise en péril, c'est à dire son abandon pur et simple, la construction devenant impropre à sa destination initiale.

2. Rôle des Fondations :

La fondation est un dispositif constructif faisant partie d'un ouvrage reposant sur un terrain d'assise et qui transmet au sol toutes les actions provenant de l'ouvrage dont elle fait partie (charges permanentes et variables).

Les forces qui s'exercent sur la construction sont: son poids, le vent, la neige, l'influence de la chaleur et de l'humidité, les forces de contact du sol sur la partie de maçonnerie qu'on nomme fondation.



En fait la fondation transmet au sol des charges descendantes (les charges du bâtiment et les actions climatiques); elle transmet par ailleurs au bâtiment les actions ascendantes du sol (comme la poussée d'Archimède).

Le rôle de la fondation est tout simplement le suivant :

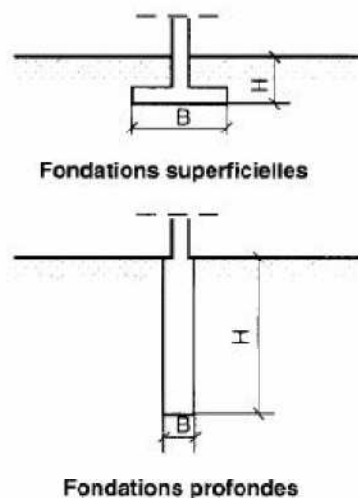
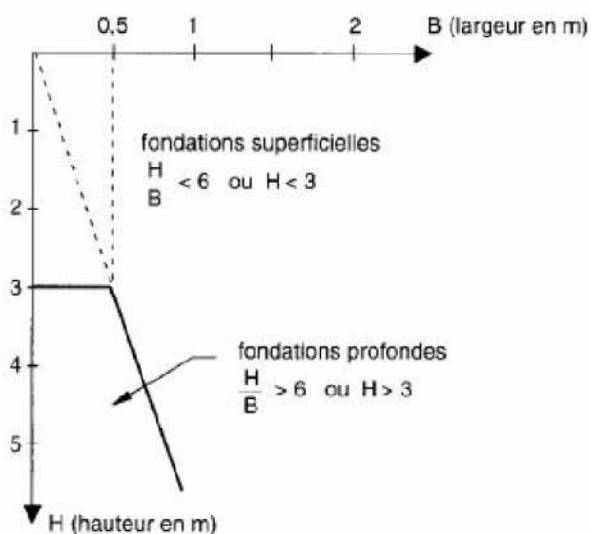
- La fondation doit **résister** elle-même aux charges et doit être calculée en conséquence.

- L'ensemble ouvrage – fondation - sol doit être en **équilibre stable**. Il ne doit pas y avoir possibilité de mouvement.
- **pas de glissement horizontal** : L'adhérence sol – fondation doit empêcher les forces horizontales (poussées du vent, des terres...) de pousser l'ouvrage horizontalement.
- **pas de basculement** : Les charges horizontales ont tendance à faire basculer l'ouvrage car elles créent un moment. Les forces verticales (poids) doivent les contrebalancer.
- **pas de déplacement vertical** : Le sol doit être suffisamment résistant pour éviter l'enfoncement du bâtiment de manière uniforme ou dissymétrique (tassements différentiels entre deux parties solidaires de l'ouvrage) et le bâtiment doit être suffisamment lourd pour éviter les soulèvements dus à l'action de l'eau contenue dans le sol (poussée d'Archimède).
- Une fondation doit être **durable**. Toutes les précautions devront être prises dans les dispositions constructives, le choix et l'emplacement des matériaux, ainsi que dans la mise en œuvre.
- Une fondation doit être **économique**. Le type de fondation, les matériaux employés et la mise en œuvre doivent être le moins coûteux possible.

3. TYPES DE FONDATIONS

Le transfert des charges, essentiellement celles verticales, de la structure au sol peut se faire de différentes manières, qui correspondent à deux grandes catégories des structures de fondation, qui à leur tour se composent de différentes typologies de fondation .

Les deux types de **fondations** sont :



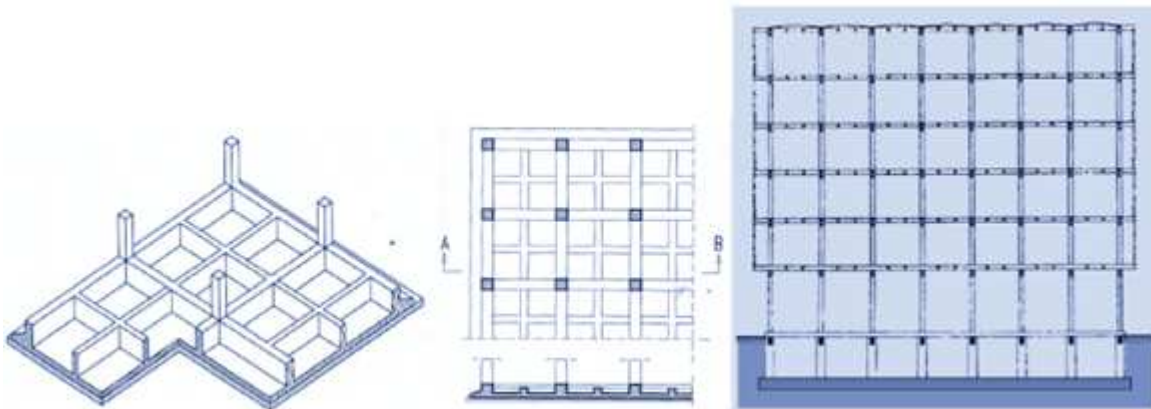
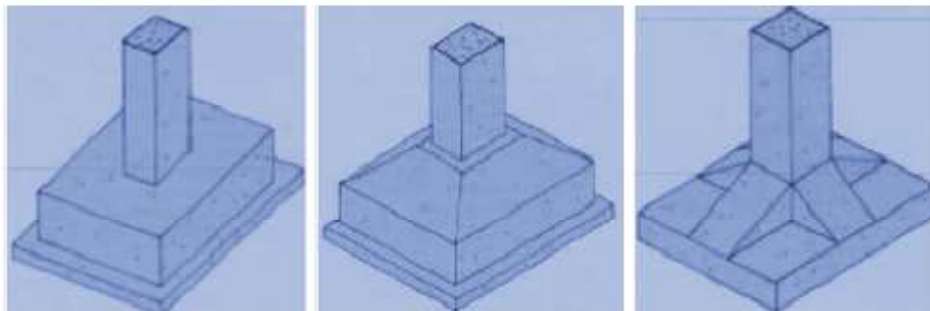
3.1. Les fondations superficielles,

Les fondations sont dites **superficielles** si une des deux conditions suivantes est respectée :

$$H/L < 6 \text{ ou } H < 3 \text{ m}$$

Avec H : profondeur de la fondation et L : largeur de la fondation.

- isolées : semelles
- linéaires : les semelles filantes (continues)
- surfaciques : radiers



3.2. Les fondations profondes et spéciales.

Les fondations sont dites **profondes** si une des deux conditions suivantes est respectée :

$$H/L > 6 \text{ ou } H > 3 \text{ m}$$

- pieux forés
- pieux battus
- micropieux
- puits

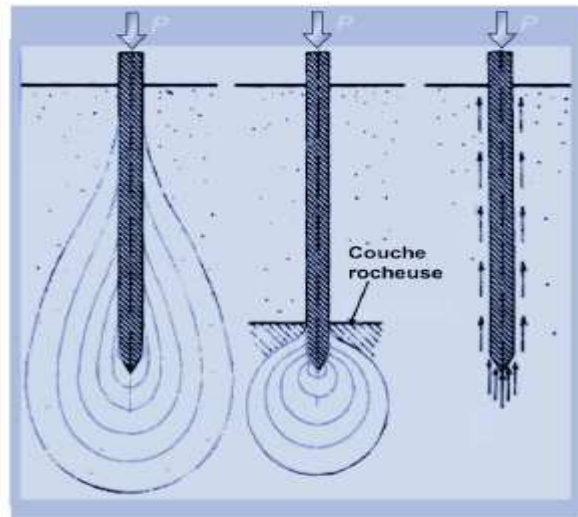


Figure: Modèles de fonctionnement des pieux

4. Statistiques sur la rupture des fondations :

Tout d'abord voici la statistique dite « de Logeais » (SOCOTEC 1976) :

Concernant les accidents de fondations superficielles sur 20 ans :

- 25% sont dus à des fondations sur remblais récents ou insuffisamment compacts
- 20% proviennent de venues d'eau intempestives
- 20% sont dus à des fondations hétérogènes
- 10% sont dus à un encastrement insuffisant (gel, affouillement)
- 10% dus aux tassements provoqués par une construction voisine
- 10% dus à des fondations sur sols très compressibles (tourbes, argiles molles)
- 5% proviennent de constructions sur sols instables (pentes, mines, carrières)

Concernant les fondations profondes :

- 40% dus à une absence de reconnaissance géotechnique
- 35% dus à une mauvaise interprétation des sondages et à des erreurs calcul
- 15% dus à des fautes d'exécution
- 10% dus à des agressions du milieu

5. FONCTIONNEMENT GENERAL D'UNE FONDATION

5.1. Modèle théorique

Lorsqu'un élément rigide s'appuie ou s'enfonce dans le sol sous l'effet d'une charge verticale, le sol se déforme alors que la partie rigide s'enfonce. Ce phénomène s'arrête (ou alors se prolonge de façon imperceptible pendant plusieurs mois) de façon visible. Cette déformation se traduit par une remontée

de sol autour de la fondation, qu'on appelle un refoulement. Tant qu'il y a équilibre, la déformation du sol s'arrête (ou continue de façon asymptotique) sans qu'il y ait une cassure dans le sol.

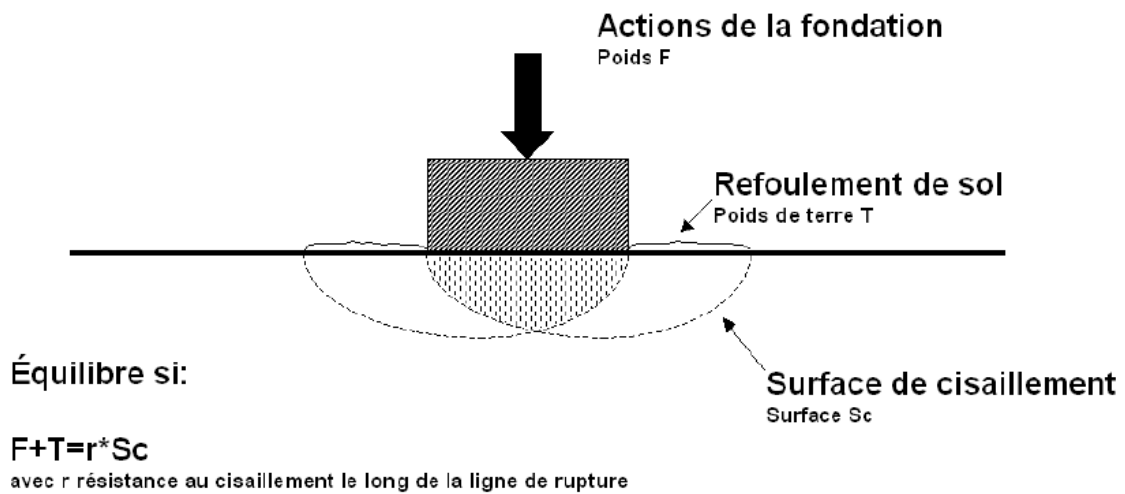
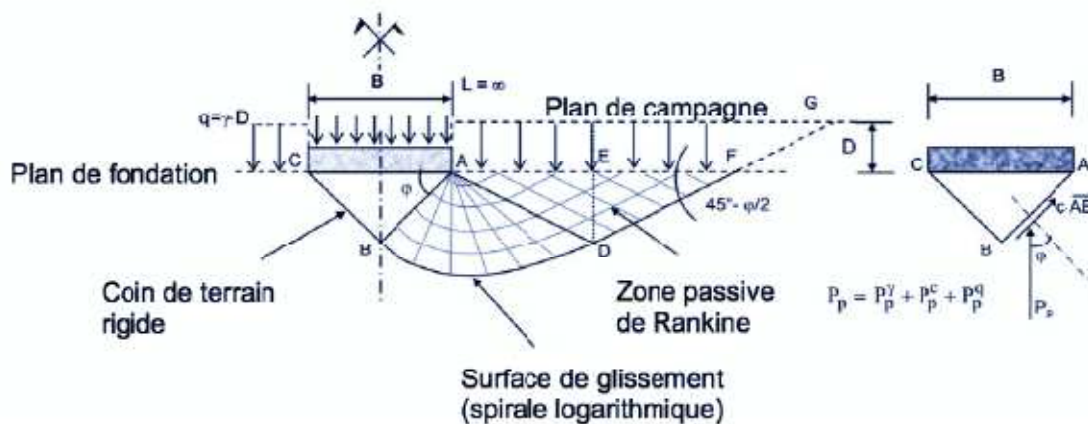


figure: Mécanisme théorique

En fait, le sol est sollicité d'une façon qu'on peut modéliser avec des figures géométriques simples. La partie du sol qui résiste à l'enfoncement de la partie rigide est en fait deux demi disques (coupure verticale). Chaque demi-disque peut être considéré comme un élément rigide qui frotte contre le reste du sol selon le demi-cercle de contact. La capacité à s'accrocher au sol de contact détermine donc en partie la capacité de ne pas glisser le long de ce cercle. C'est ce qu'on appelle la résistance de cisaillement, le long de la surface de cisaillement .



5.2. Illustration de la surface de cisaillement

Lorsque la charge est excentrée, le sol est sollicité de façon dissymétrique. En fait, il va être sollicité selon deux arcs circulaires qui partent chacun d'une des deux extrémités de la base de la fondation. La dissymétrie de la sollicitation fera que les efforts de cisaillement le long de ces surfaces seront plus importants d'un côté que d'un autre. Si les efforts transmis par la fondation génèrent des forces surfaciques de contact supérieures à la résistance au cisaillement du sol, le cisaillement va se concrétiser, le sol va se déchirer selon la ligne circulaire, et va provoquer :

- un refoulement de terrain important
- la ruine de l'ouvrage due à son renversement (voir fig)

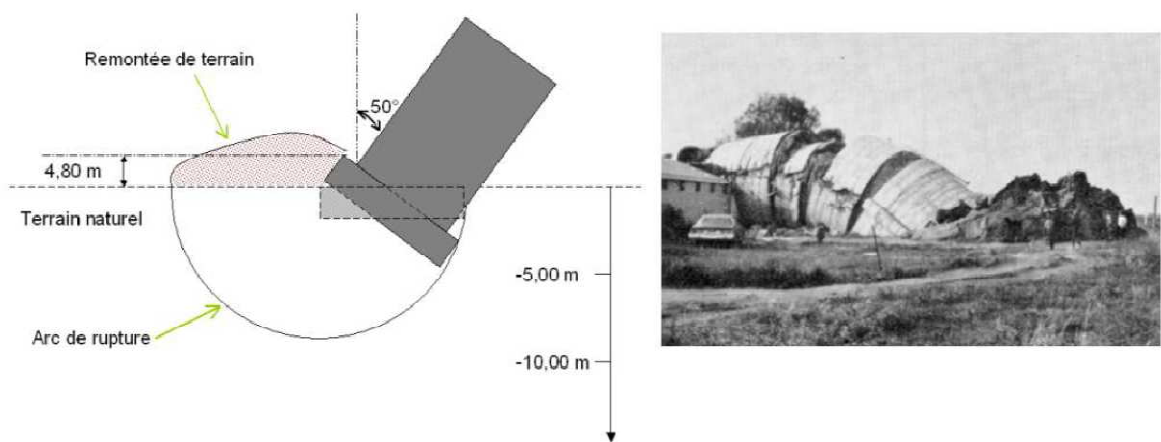


figure: Illustration du cercle de glissement



Figure: Le désastre du silo de Transcona, Canada

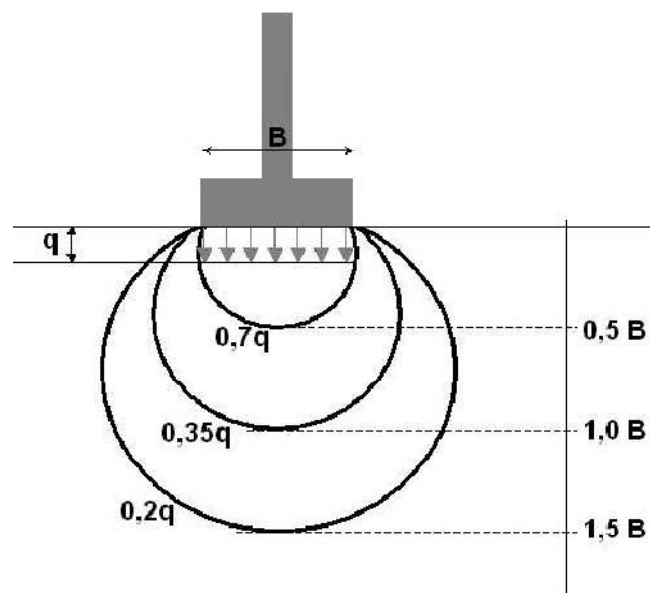
De son côté, la rupture d'une fondation est un phénomène totalement différent :

elle correspond à la rupture mécanique du sol sous la fondation, ce qui engendre un caractère mécanique de ruine qui se réalise par une rotation, souvent assez rapide (quelques heures), de la structure plus une partie du sol, sur une surface courbe qui en théorie est un arc de spirale logarithmique.

Ce phénomène est toujours causé par un excès de charge verticale, mais ce qui est important est aussi la rapidité de chargement : une trop grande rapidité de chargement ne permet pas à l'eau présente dans le sol de s'évacuer sous le poids appliqué et ceci favorise le phénomène de la rupture. De ce fait, certaines structures sont particulièrement sensibles à ce phénomène (typiquement, les réservoirs et les silos,).

5.3. Forme des contraintes dans le sol sous la fondation

Le bulbe des pressions (voir fig.) est aussi un élément de la théorie de fondation à connaître, et à ne pas confondre avec le cercle de cisaillement. Lorsque la fondation est à l'équilibre, il existe, sous son assise et dans l'environnement proche, des zones d'égale contrainte. Immédiatement sous la base, la contrainte (homogène à une pression) est celle calculée lors du dimensionnement de la fondation. Plus on va profond, plus la contrainte diminue. Cependant, la diminution suit un diagramme en forme de bulbe.



Répartition des pressions verticales dans le sol sous une semelle carrée en fonction de la pression de contact q

figure: Bulbe des contraintes

La figure ci dessus illustre la conséquence d'une zone subissant la compression de deux fondations trop rapprochées. La notion de bulbe de pression dans le sol nous permet alors de comprendre qu'une fondation, selon ses dimensions et dispositions, peut influencer sur une fondation voisine, et éventuellement créer des désordres à cause d'une surcompression du sol qui entraîne des tassements...

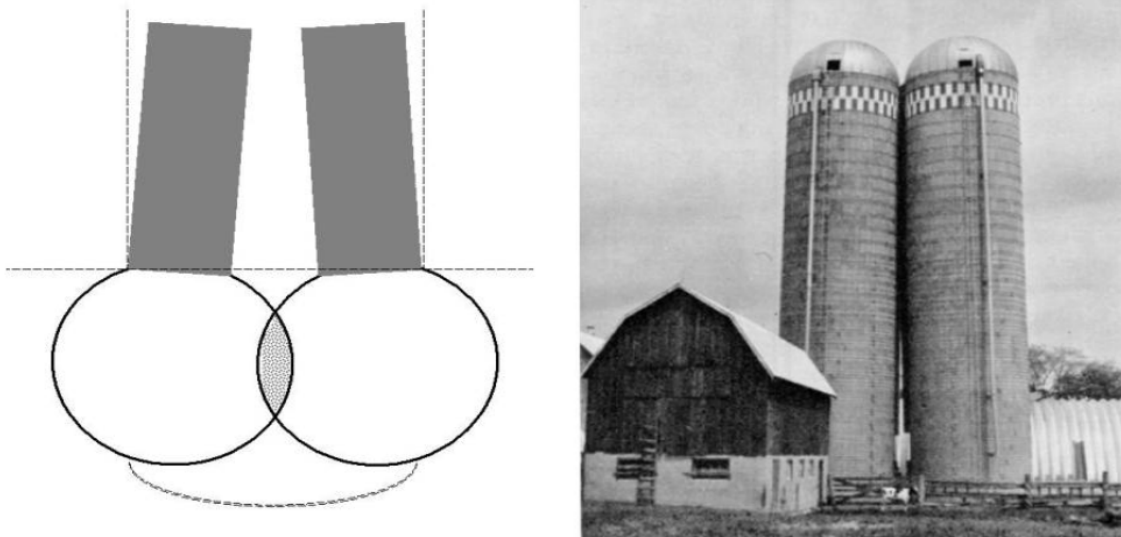


figure: Illustration pratique de l'influence des bulbes des contraintes

6. ORIGINE DES TASSEMENTS

Le sol est un matériau comme les autres, il a aussi une limite élastique, et une certaine aptitude à la plasticité. Ceci nous permet de donner des explications du phénomène des tassements.

Le sol porteur se déforme sous l'action d'une charge. Il y a une différence de niveau, un tassement par rapport au niveau initial. Si lorsque les charges sont enlevées, le sol revient à son niveau initial au bout d'un certain temps, on parle de tassement élastique.

S'il reste un tassement résiduel après levée des charges, on parle de tassement plastique

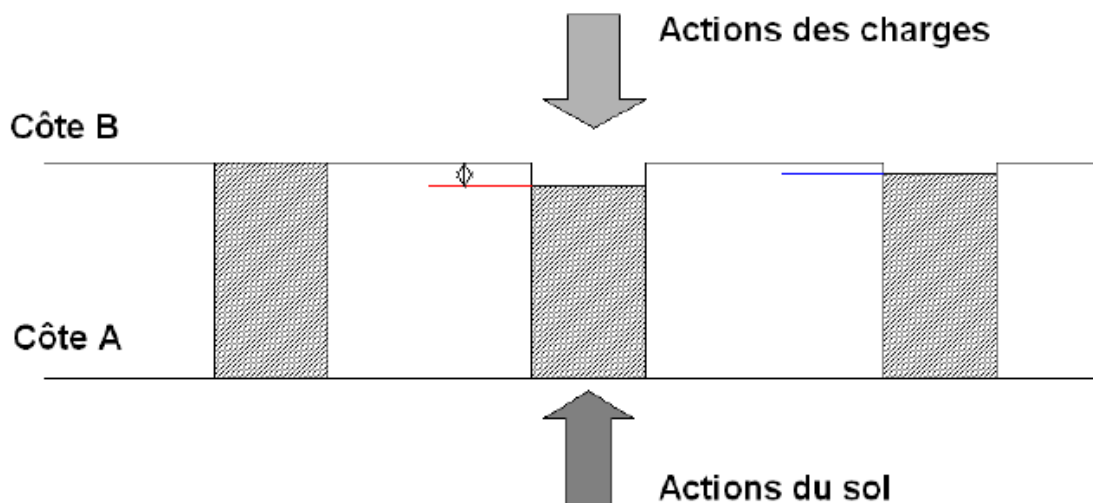


figure: Tassement élastique, tassement plastique

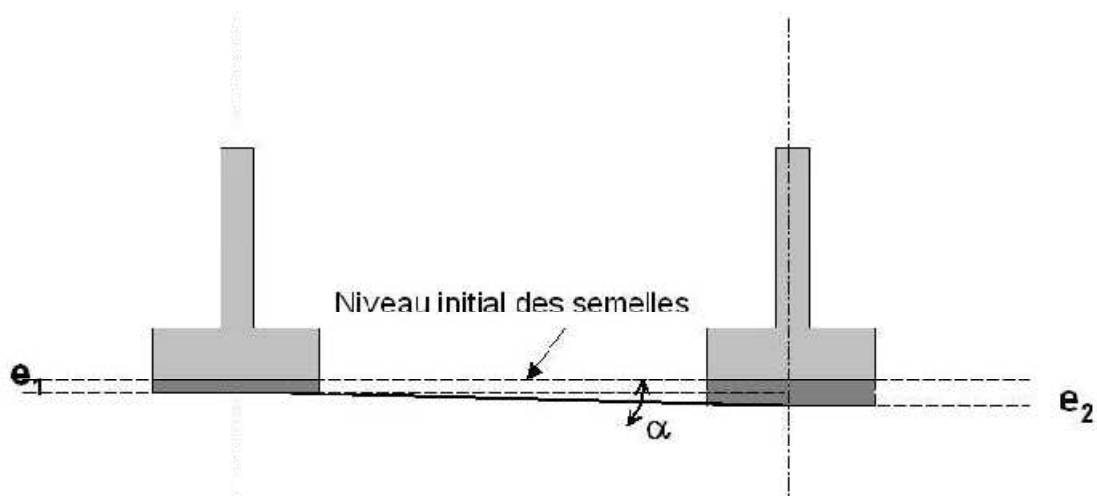
Ces phénomènes de tassement ne peuvent être évités. Lorsqu'un bâtiment est construit, il y a d'abord un tassement immédiat (qualifié d'absolu), puis le sol réagit en fonction de ses caractéristiques singulières sous une fondation précise. La différence entre les tassements de fondations voisines est appelée « tassement différentiel ». Ces différences ne doivent pas excéder certaines valeurs sous peine de générer des désordres dans les constructions.

6.1. Pathologies liées aux tassements

Le tassement désigne l'enfoncement graduel que subit une structure à mesure que le sol sous les fondations se consolide sous l'action des charges. La durée d'un tassement peut prendre plusieurs mois, voire plusieurs années. On doit concevoir les fondations de façon à ce que le tassement demeure minime, et soit uniforme.

6.2. LES TASSEMENTS DIFFERENTIELS

Quand on parle de tassement différentiel, on désigne le mouvement relatif de différentes parties de la structure qui résulte d'une consolidation inégale du sol d'appui. Cela peut parfois entraîner la ruine de l'ouvrage.



Le tassement différentiel peut être responsable de dégradations pouvant mener jusqu'à la ruine d'une construction. Le fonctionnement est le suivant : en fonction de la constitution du sol d'assise, des différences de comportement peuvent apparaître sous des semelles, de sorte que le tassement absolu e_1 soit dépassé pour une semelle. Dans la figure 3.2, $e_2 > e_1$. Le tassement de la semelle 2 dépasse le tassement absolu prévu de l'ensemble du sol sous les semelles du bâtiment. Il en résulte un tassement $e_2 - e_1$ appelé « tassement différentiel », avec une déflexion angulaire du sol α .

Mouvement	Le tassement doit être limité pour assurer:	Tassement maximal
<i>Tassement total</i>	le drainage	15 à 30 cm
	la facilité d'accès	30 à 60 cm
	une certaine uniformité du tassement	
	* murs en maçonnerie	2 à 5 cm
	* poutres	5 à 10 cm
	* silos, cheminées, radiers	8 à 30 cm
<i>Renversement</i>	la stabilité des cheminées et des tours	0,004 fois B
	la circulation des engins	0,01 fois L
	la stabilité des empilages de marchandises	0,01 fois L
	le fonctionnement des machines	
	* métiers à tisser	0,003 fois L
	* turbo générateurs	0,0002 fois L
	le fonctionnement des grues sur rail	0,003 fois L
	l'écoulement des eaux dans les étages	0,01 à 0,02 L
<i>Tassement</i>	la sécurité à l'égard des fissurations	
	* grands murs de briques	0,0005 à 0,001 fois L
	* poutres en béton armé	0,0025 à 0,004 fois L
	* voiles en béton armé	0,003 fois L
	* poutres continues en acier	0,002 fois L
	* poutres sur appuis simples en acier	0,005 fois L
<i>B désigne ici le diamètre ou la largeur de la base d'un édifice très élancé L désigne ici la distance entre deux points soumis au tassement différentiel</i>		
Sources: Tassements admissibles, 1956, Londres, Polshin, Tokas, Skempton, Mac Donald.		

figure: Tolérances de tassements

Un cas célèbre de tassement différentiel, spectaculaire, est le cas de la tour de pise où une couche compressible a été sollicitée sous une partie de l'ouvrage, entraînant un basculement, mais pas la ruine (l'ouvrage ayant été consolidé en sous-sol au siècle dernier).

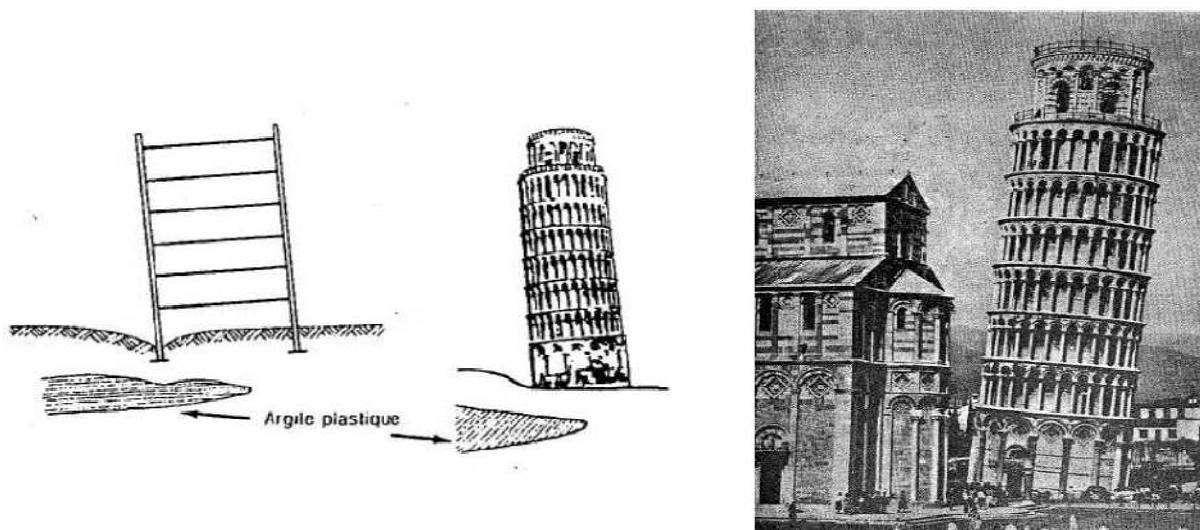
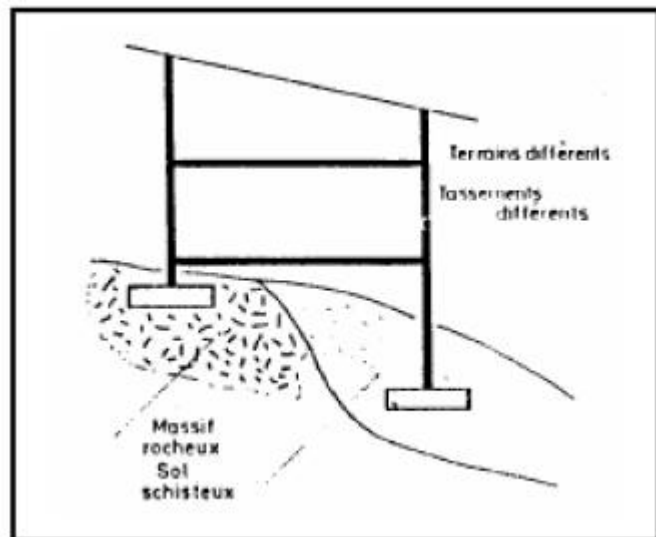
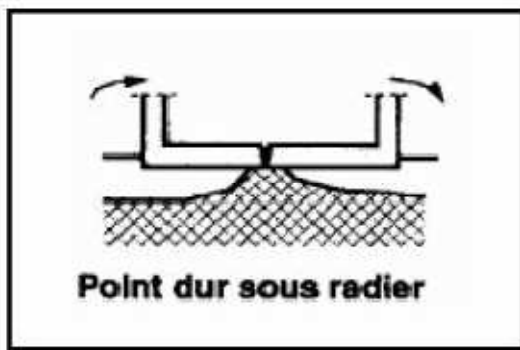


figure: Tassements différentiels : un cas connu de tous

7. Causes des Désordres des Fondation :

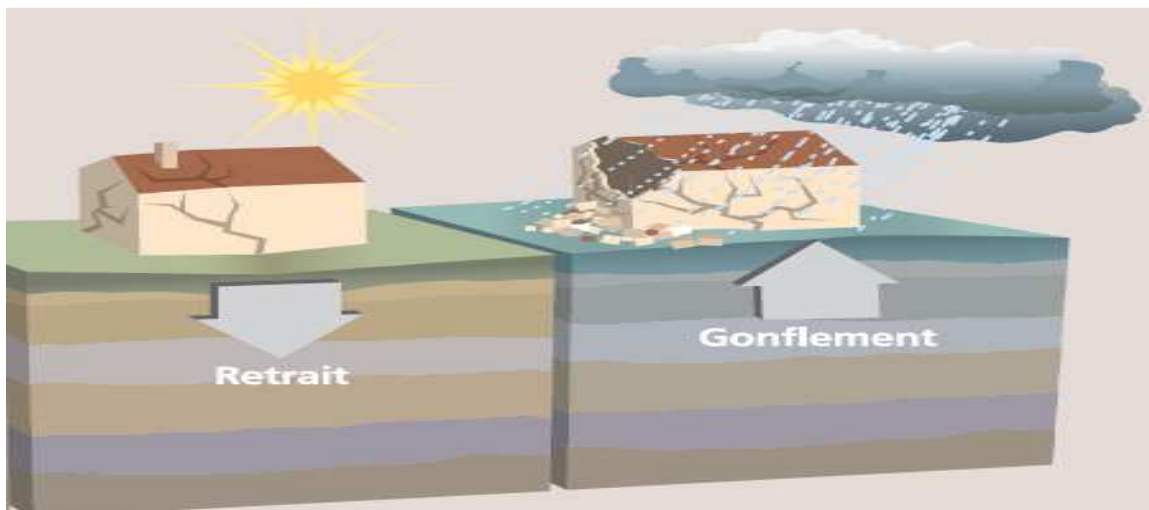
7.1. une reconnaissance de sol incomplète et donc souvent un sol mal adapté :

- profondeur insuffisante des sondages,
- présence de cavités non détectées,
- nappe d'eau insoupçonnée,
- agressivité de l'eau,
- point dur sous un radier,
- terrain d'assise non homogène ou peu résistant et très compressible,
- sol compressible d'épaisseur variable sous radier,
- sols différents sous un même bâtiment,



Les pathologies dus aux sols gonflant :

Il se manifeste dans les sols argileux et est lié aux variations en eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface : on parle de *retrait*. À l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de *gonflement*.



les sols de fondation argileux se rétractent progressivement de l'extérieur vers l'intérieur de l'ouvrage, jusqu'à se décoller de la sous-face des semelles ; il en résulte un porte-à-faux de la fondation qui, tassant de façon différentielle, provoque des fissures dans la structure. S'ensuivent des désordres progressifs conduisant parfois à la ruine de l'ouvrage .

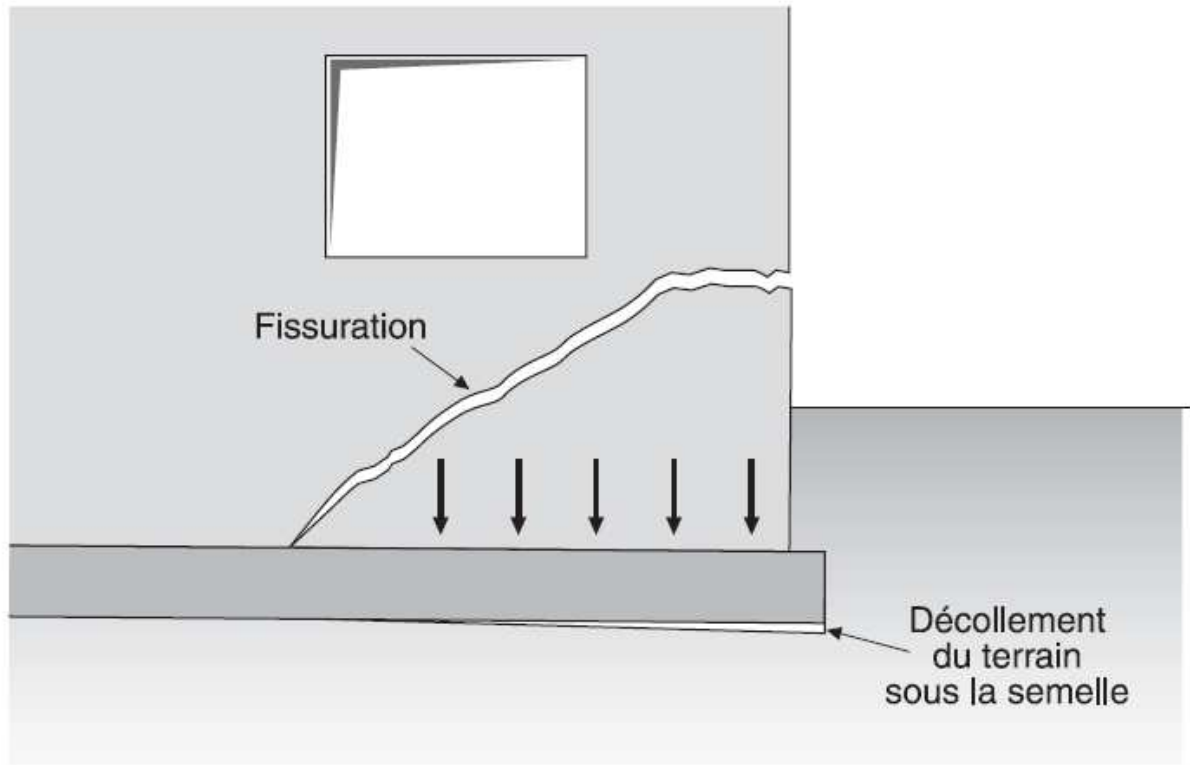


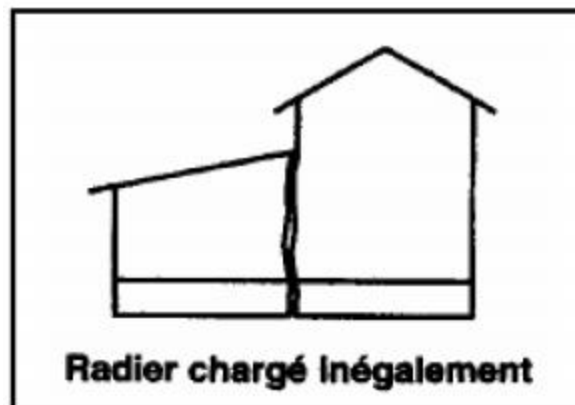
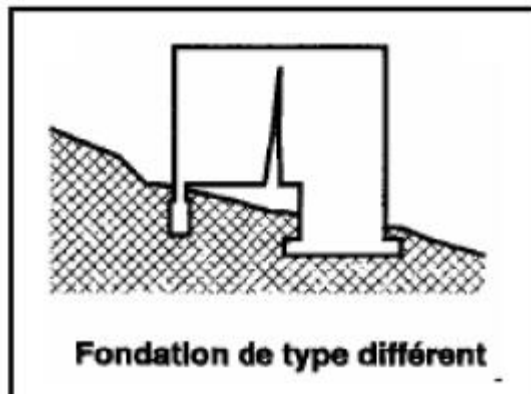
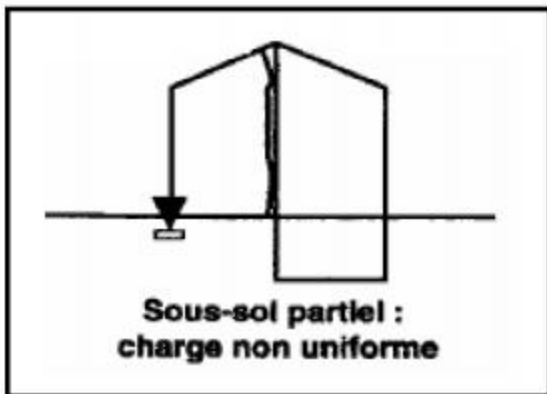
Figure: Tassement et fissurations liés à la sécheresse



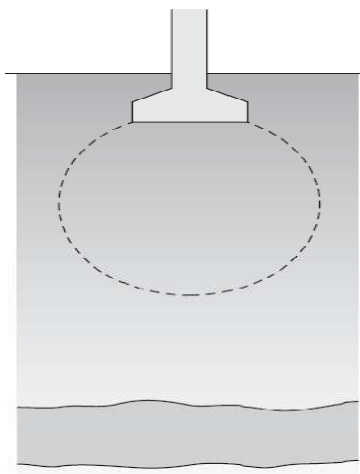
Figure : Vue des désordres provoqués par des marnes gonflantes

7.2. une erreur de calcul ou de conception :

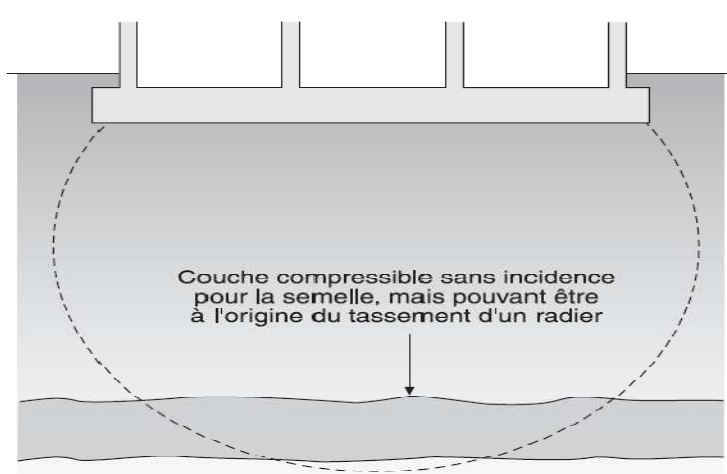
- fondations inadaptées ou mal calculées,
- fondations différentes sous un même ouvrage,
- radier chargé inégalement,
- fondations sur un remblai récent non stabilisé,
- chargement dissymétrique de l'ouvrage,



Bulbe de pression
d'une semelle superficielle



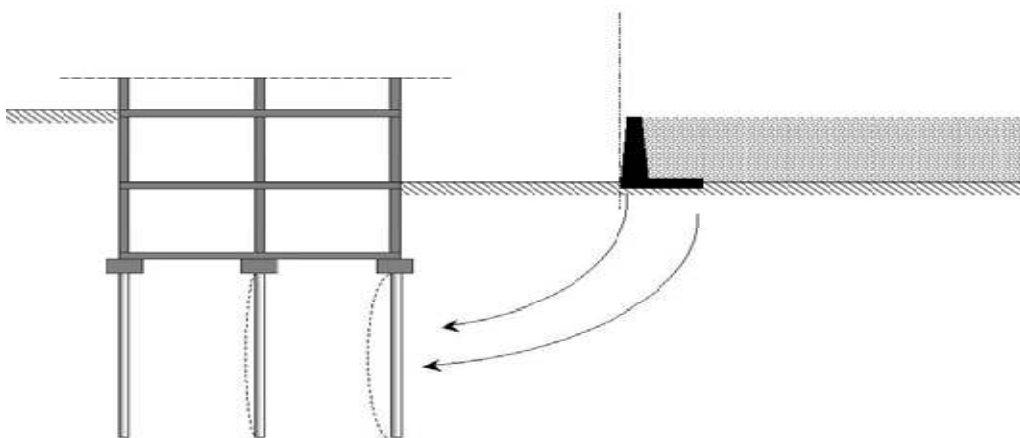
Bulbe de pression
d'un radier



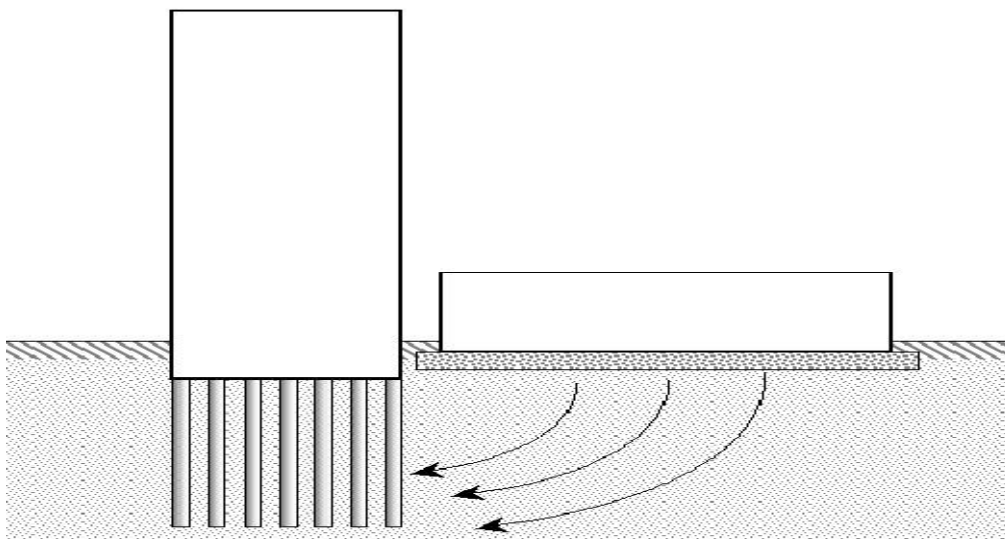
7.3. **une cause extérieure :**

- vibrations importantes lors du battage des pieux d'une construction voisine,
- pieux pouvant être endommagés par les charges apportées par une fondation superficielle à proximité,
- une modification des conditions existantes

L'exemple suivant illustre le cas d'une construction mitoyenne, avec un changement de fonction de l'espace attenant qui crée une surcompression du sol et donc des poussées latérales sur les pieux (le remblai équilibré par le mur poids est destiné à la création d'un terre plein de stockage).



L'exemple ci dessous est le cas de l'extension d'un bâtiment avec un parti de fondations différent. Le bâtiment de gauche est fondé sur pieux, celui de droite sur radier. Le radier comprime le sol et influe sur la stabilité des pieux. Dans ce cas la poussée des terres peut mener à la rupture des pieux.



Pathologies liées à la modification de l'environnement

Les modifications de l'environnement immédiat d'une construction peuvent avoir des conséquences sur ses fondations, conséquences pouvant parfois aller jusqu'à la ruine.

Dans l'exemple suivant, la création d'une route à proximité d'une construction a nécessité la modification du terrain naturel, et la création d'un talus. Ainsi, la nappe phréatique a été détournée de son cheminement initial, et sa variation décomprime le sol sous une partie de la construction existante. Il va y avoir tassement et apparition de fissures (modification de l'équilibre hydrique du site par re talutage).

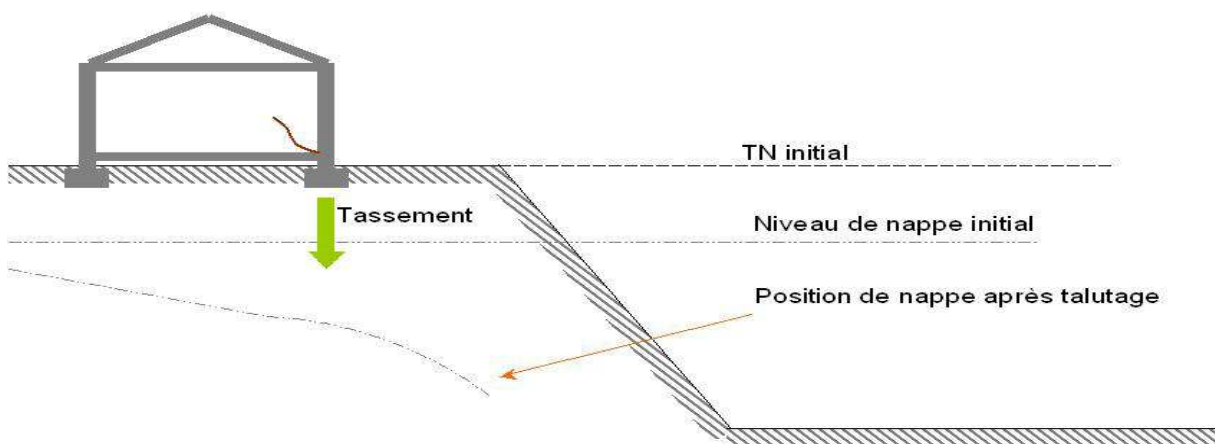
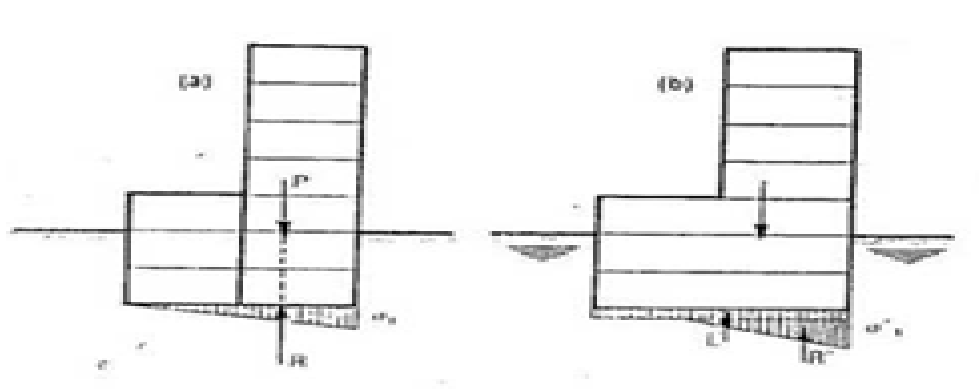


Figure : Vue des dommages sur une maison individuelle située en crête de talus,

Dans la figure suivante, la charge globale P est excentrée. Dans (a) la réaction du sol se trouve sur la même verticale. Par contre, lors d'une remontée de nappe phréatique, la résultante des forces du sol sera encore plus excentrée (la résultante de la pression hydrostatatique est centrée). La construction peut donc prendre un faux aplomb, et le risque de sinistre, voire de ruine, est réel...



Implantation des arbres, grands consommateurs d'eau et à l'origine de nombreux désordres ; la règle est de respecter une distance minimale entre la plantation et les fondations égale à une fois et demie la hauteur de l'arbre adulte ; on peut conserver les vieux arbres en créant un écran antiracines vertical.

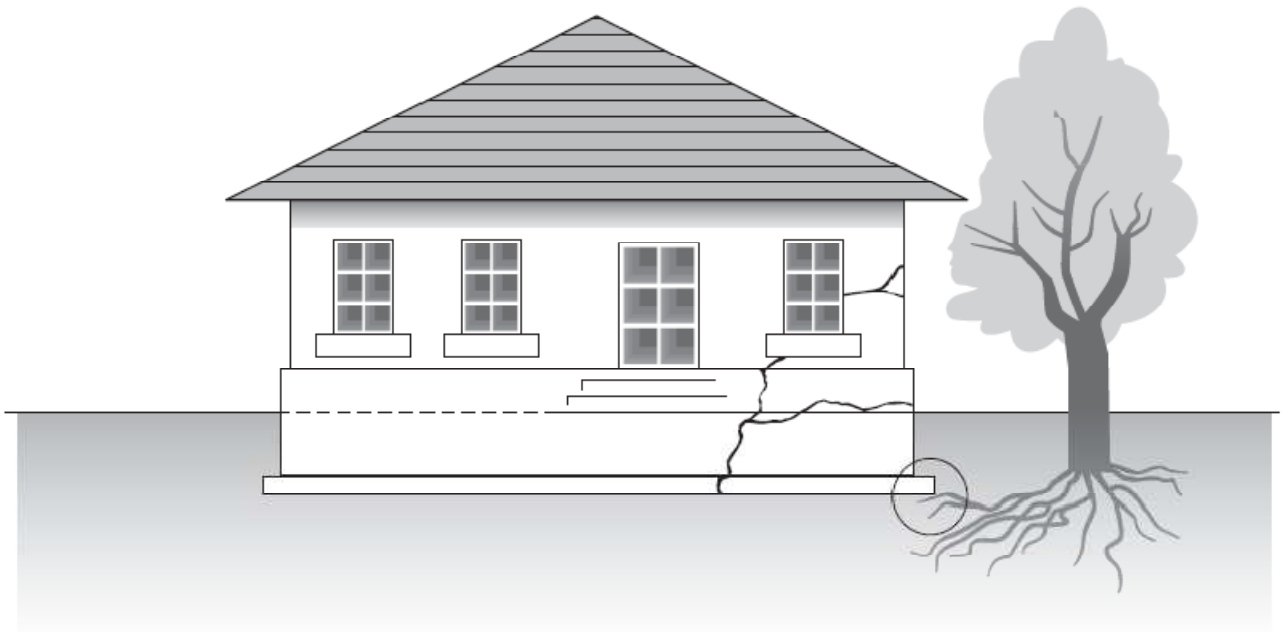


Figure: Incidence de la proximité des arbres sur les constructions

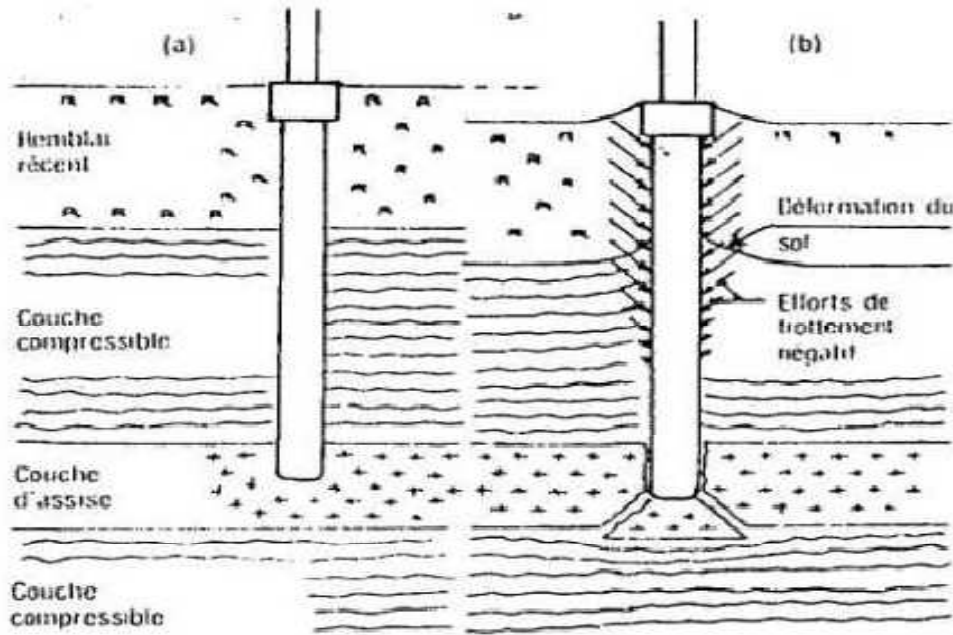
Les phénomènes d'érosion régressives naturelles constituent également, pour les constructions sur fondations superficielles, une menace d'une extrême gravité. Les moyens confortatifs qu'il faut déployer dans ces cas exigent des travaux à grande échelle.



7.4. Frottement négatif

Lors du dimensionnement du pieu, la nature des couches n'a pas été suffisamment appréciée. La présence d'une couche compressible sous le remblai récent n'a pas été considérée de façon suffisante.

Nous avons vu que la charge portante du pieu est la somme de 2 termes : la résistance de pointe, pression du pieu dans la couche résistante d'ancrage ; le frottement latéral du pieu, qui participe à la résistance à l'enfoncement aussi bien qu'à la résistance à l'arrachement (traction du pieu). Cependant, le remblai récent s'est tassé au cours du temps, entraînant une déformation des couches compressibles inférieures, de sorte que la consolidation du sol inverse le sens du frottement latéral. Au lieu d'être vers le haut (positif) la résultante des forces de frottement latéral sera vers le bas (sens négatif).



7.5. L'attaque des fondations par le milieu qui les enrobe:

comme les fondations sont des éléments à la plus part du temps réalisés par du béton armé dont celui-ci est l'objet des différentes attaques (chlorure, sulfate, eaux,...) qui sont une partie des sous-sols.

