
Impacts de l'extraction excessive d'eau souterraine sur l'infrastructure routière

Abdelmadjid Chabani* — **Abdelmalek Bekkouche**** — **Francisco Javier Álvarez Pulgar*****

* Université de Béchar, Faculté des sciences et de la Technologie, Département de Génie civil, madjchsah@yahoo.fr

** Université Abou Bekr Belkaïd1 Tlemcen, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, a_bekkouche@mail.univ-tlemcen.dz

*** Université d'Oviedo, Faculté de Géologie, Département de Géologie, Géodynamique, Oviedo, Espagne, pulgar@uniovi.es

RESUME. La subsidence ou tassement du sol causé par l'extraction excessive des eaux souterraines est un risque géotechnique qui affecte d'importantes surfaces causant de considérables dommages économiques et sociaux. Ce phénomène est dû à la consolidation du sol produite par la croissance de la contrainte effective qui résulte du rabattement du niveau piézométrique. Ce type de subsidence qui évolue graduellement est souvent accompagné de fissures et de failles qui endommagent les structures superficielles.

En effet le pompage excessif des eaux souterraines occasionne la réduction de la pression de pore et l'augmentation de la contrainte effective provoquant ainsi la consolidation du sol.

L'infrastructure routière qui joue un rôle primordial dans le développement économique et social de tout territoire n'a pas été épargnée par ce phénomène.

ABSTRACT. Ground subsidence or settlement of soil caused by intense extraction regimens of aquifer systems is a geotechnical hazard that affects wide areas, causing important economic damages. This phenomenon is due to soil consolidation produced by the increase of effective stress caused by piezometric depletion.

This type of subsidence is a gradual process that can affect very large areas and cause fractures and faults in terrains and may cause damage to surface structures or render them unserviceable.

The reason for this is that when the groundwater is withdrawn, the pore-water pressure reduces; also, the water table is lowered and so there is an increase in effective stress, causing consolidation of the layer of soil.

The roads are considered a key factor on the economic and social development in the territory of any country. This paper explains elaborately the whole process and its impact in the infrastructure of the transport.

MOTS CLES: Eau souterraine, surexploitation, niveau piézométrique, subsidence, dommage.

KEYWORDS: groundwater, overexploitation, piezometric level, subsidence, damage.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies l'importance des nappes d'eau souterraines s'est fortement accrue, leurs ressources sont de plus en plus mises à contribution pour l'alimentation des collectivités publiques, l'industrie et l'agriculture.

Les pompages des eaux souterraines pour l'alimentation des collectivités publiques, l'industrie et l'agriculture ou bien les pompages de nappes lors des grands travaux souterrains sont susceptibles d'engendrer des déformations en surface. Leur détection apparaît comme étant un paramètre essentiel pour l'Aménagement et la gestion des Risques (affaissements ou effondrements), notamment en contexte urbain où les enjeux sont importants.

En effet de nombreuses recherches en mécanique de sol et en hydrogéologie s'attachent depuis plusieurs années à étudier le phénomène de subsidence causé par la surexploitation des eaux souterraines.

2. L'eau sur la planète: disponibilité et consommation

2.1 Disponibilité

L'eau de la planète bleue est à 97,2 % salée. Cette eau salée se retrouve dans les océans, les mers intérieures, mais aussi dans certaines nappes souterraines. L'eau douce, elle, représente donc 2,8 % de l'eau totale du globe. Dans ce faible pourcentage, les glaces polaires représentent 2,15 %, les eaux souterraines 0,63 %, les eaux de surface (lacs, fleuves et rivières) seulement 0,019 %. Reste 0,001 % pour l'atmosphère.

Ces chiffres reflètent l'importance des eaux souterraines et montrent que ces eaux constituent une ressource considérable d'eau douce.

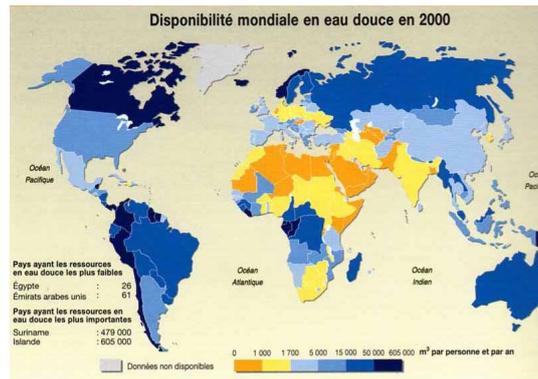


Figure 1. Disponibilité mondiale en eau douce en 2000

1.2 Consommation

Seule une très faible quantité de l'eau douce de la terre est actuellement utilisée par l'homme. Cette quantité est répartie entre l'agriculture 64.9%, l'industrie 23.6%, la consommation domestique 7.3% et autres activités 4.2%. En tenant compte du développement économique et social ainsi que de la croissance démographique, la demande en eau douce va augmenter rapidement dans l'avenir.

Usage d'eau	1970 km ³ /an	1975 km ³ /an	1980 km ³ /an	1990 km ³ /an	2000 km ³ /an
Agriculture	1850	2050	2290	2680	3250
Industrie	540	612	710	973	1280
publique	130	161	200	300	441
divers	66	103	120	170	220
total	2590	2930	3320	4130	5190

Tableau 1. Utilisation de l'eau par les activités humaines dans le monde (Document de l'O.M.S).

3. Cycle hydrologique

Dans l'atmosphère le mouvement continu de l'eau a pour origine l'arrivée au sol de l'énergie solaire. Cette énergie solaire permet l'évaporation de l'eau qui dans certaines conditions appropriées d'altitude, de température et de pression se condense pour donner des précipitations. Les eaux de précipitation lorsqu'elles atteignent la surface du sol, se déplacent sous l'action de la gravité des points les plus élevés vers les points les bas du terrain, une partie de ces eaux s'infiltré à travers le sol et les roches (zones non saturée) jusqu'à ce qu'elle rencontre la nappe souterraine. De cette manière les eaux souterraines peuvent être définies comme les eaux qui s'accumulent au cours du temps dans les pores et les fissures des sédiments et des roches. Ces eaux sont en mouvement continu et appartiennent au cycle hydrologique.

4. Surexploitation des eaux souterraines et Processus de déformation: affaissement et fissures.

Les vallées qui sont formées suite à un processus de plusieurs millions d'années sont constituées par des matériaux d'origine alluviale et lacustre et sont alors considérées comme un excellent milieu pour l'emmagasinement et l'approvisionnement en eau.

Lorsque la quantité d'eau extraite dépasse la quantité qui entre, on dit alors qu'il y'a surexploitation.

La surexploitation des aquifères constitués par des matériaux d'origine fluviale et lacustre a pour conséquence la génération de tassements, d'affaissements et de fissures à la surface du sol.

Les deux principaux risques liés à la subsidence sont la génération de fissures à la surface et le changement du niveau de drainage superficiel naturel.

En effet les voies ferrées, les routes, les autoroutes croisent les vallées; aussi de nombreuses villes sont situées dans ces vallées. La majorité de ces ouvrages sera alors exposée aux risques de déformation par tassements, fissures et affaissements. Le changement du niveau de drainage rend la zone inondable.

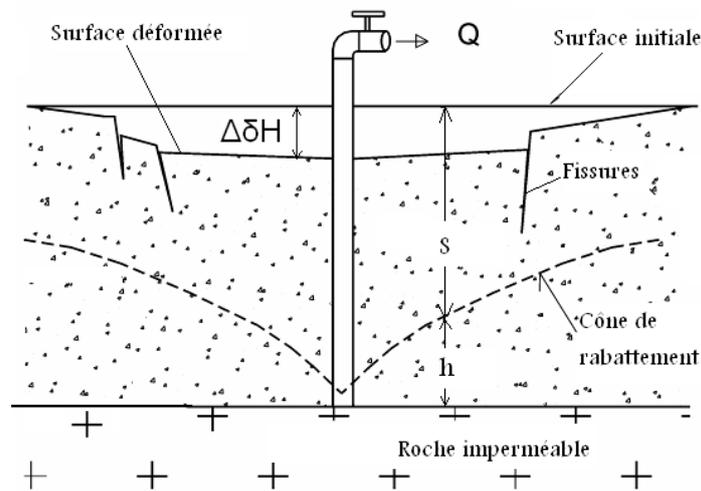


Figure 2. *Processus de déformation par écoulement hydrodynamique.*

5. Effets de l'exploitation excessive des eaux souterraines

Dans certaines régions du globe terrestre et de manière imperceptible les effets de l'exploitation excessive des nappes d'eau souterraines ont occasionné de sévères dommages au sol et aux ouvrages de génie civil.

En effet les prélèvements continuellement croissants d'eau souterraine dans un aquifère provoquent les processus de subsidence qui affectent la surface terrestre en produisant d'importantes modifications sur elle

Les cas d'affaissements de terrains régionaux dus à des prélèvements d'eaux souterraines sont récemment devenus de plus en plus nombreux dans le monde. Cela s'est produit aux Etats-Unis, au Mexique, en Espagne, en Chine

Etats-Unis.

On peut citer l'exemple de la vallée de San Joaquin, qui est une des régions agricoles les plus productives des Etats-Unis. La vallée du centre de la Californie, qui comprend la vallée de San

Joaquin, produit environ 25 % de la nourriture consommée par les Américains, sur seulement 1 % des terres agricoles du pays. De 1900 aux années 1970, on a exploité les eaux souterraines afin d'irriguer les terres et de cultiver ces aliments. Mais, à un moment donné, les prélèvements d'eau ont été beaucoup plus rapides que la reconstitution des réserves, et les 75 ans de pompage de l'eau en vue de l'irrigation ont causé un affaissement des sols (subsidence) sur plus de huit mètres. Sur cette photo d'un site se trouvant près de Mendota, dans la vallée de San Joaquin, le signe en haut du poteau indique le niveau de la surface du sol en 1925, par rapport à ce même niveau quand la photo a été prise, vers 1977.

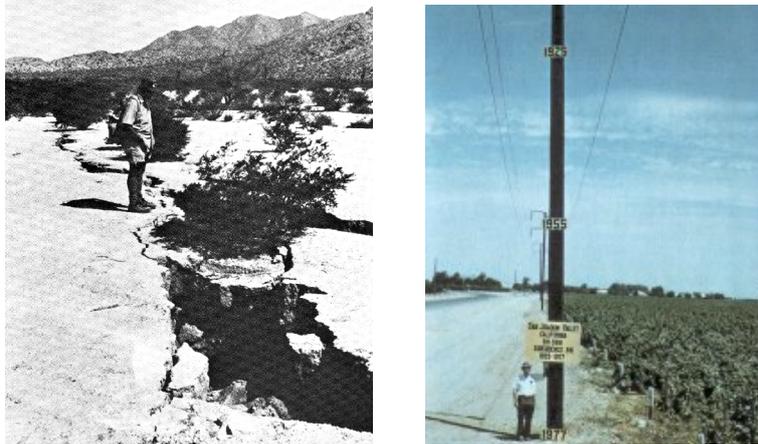


Figure 3. L'affaissement de la surface du sol résultant de l'extraction des eaux souterraines dans la vallée de San Joaquin, la photo indique les positions de la surface terrestre en 1925, 1955 et 1977. Un déplacement de 9 mètres en 52 ans



Figure 4. Méthode d'atténuation de fissures sur une chaussée, (photo par Ken Euge).

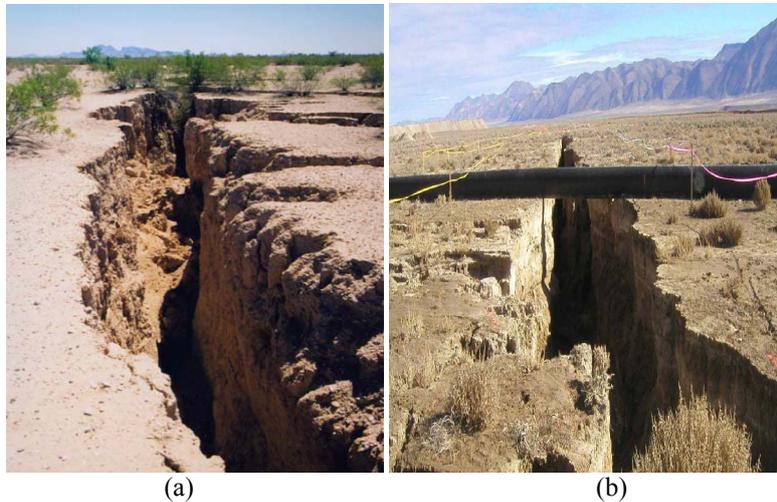


Figure 5. (a) Fissure dans la Plaine centrale Harquahala, Arizona (Photo par Ray Harris), (b) croisement d'une crevasse et un pipe (Photo par AMEC, présentée en 2004 à l'atelier ADOT)

Mexique

Dans la ville de Salamanca située dans l'état de Guanajuato, la croissance de la population et le développement agricole et industriel ont provoqué une surexploitation de l'aquifère local et par conséquent une subsidence de cette zone. Cette subsidence est à l'origine de nombreux dommages.



Figure 6. Rupture du sol causée par la subsidence à Guanajuato, México



Figure 7. Edifice avec fissures provoquées par subsidence, ville Mexico

Espagne

Le déclin du niveau piézométrique de l'aquifère de la ville de Murcia a occasionné des affaissements du sol qui ont provoqué des dégâts très importants en dimension et en extension.

Chine:

La ville de Suzhou située dans la province de Jiangsu, souffre cruellement de tassements du sol.

Des études géologiques et hydrogéologiques montrent qu'il existe un système aquifère multicouche constitué de trois niveaux distincts de limons non consolidés d'origine marine et lagunaire.

Un examen des historiques des prélèvements d'eau souterraine, des niveaux de nappe et des tassements de sol montre que la subsidence du sol est associée à des prélèvements continuellement croissants d'eau souterraine dans l'aquifère captif profond.

La conductivité hydraulique de la troisième couche de limon non consolidé au voisinage du centre du tassement de sol a été réduite de plus de 30% au cours des 14 dernières années. La dégradation progressive de la conductivité hydraulique du limon peut avoir un effet significatif néfaste sur la pérennité de la ressource en eau souterraine dans l'aquifère captif profond, puisque la recharge à partir des aquifères superficiels au travers de la couche de limon est la seule alimentation de l'aquifère profond.

6. Etudes de la subsidence

De nombreuses recherches en mécanique du sol et en hydrogéologie s'attachent depuis plusieurs années à étudier le phénomène de subsidence causé par la surexploitation des eaux souterraines.

5.1. Nécessité d'établir un modèle:

Le développement d'un modèle valide et réalisable a été le défi pour tout travail d'investigation dans ce domaine, il représente un effort continu de puis 1908, quand Fuller relie pour la première fois la subsidence avec le pompage d'eau souterraine. En effet un modèle approprié pour prédire la subsidence est un instrument qui permet l'évaluation à long terme du risque de déformation du sol et aussi l'optimisation de l'usage des eaux souterraines.

La modélisation du phénomène est basée sur les variations de la pression interstitielle et la pression effective décrites à partir de la relation.

$$\sigma = P - u$$

σ : contrainte effective

P : Contrainte totale

u : Pression interstitielle

Le rabattement du niveau piézométrique réduit la pression interstitielle de l'eau dans les pores du sol et, par conséquent, augmente la pression effective σ . Cette contrainte effective contrôle la rigidité et les variations de volume du sol. L'augmentation de σ provoque la consolidation du sol qui se manifeste comme déformation superficielle dont l'étude est d'une grande importance dans le domaine du génie civil, de la géologie et de la géotechnique..

Cette modélisation est aussi basée sur l'équation qui gouverne l'écoulement des eaux dans les aquifères.

5.2. Méthodes de mesure de la déformation du terrain

Les pompages de nappes d'eau souterraines sont susceptibles d'engendrer des déformations en surface. Leur détection apparaît comme étant un paramètre essentiel pour l'Aménagement et la gestion des Risques (affaissements ou effondrements), notamment en contexte urbain où les enjeux sont importants.

Les méthodes de mesure de la déformation due à la subsidence ont pour but de déterminer l'extension de la zone touchée, les vitesses de déplacement, les mécanismes qui régissent le phénomène, les moments critiques de rupture ou l'accélération, ainsi qu'évaluer l'efficacité des mesures de correction qui ont pu être adoptées.

Plusieurs techniques sont aujourd'hui employées pour quantifier les déformations causées par la subsidence terrestre. Entre ces méthodes on trouve les méthodes topographiques conventionnelles, les méthodes géodésiques, les méthodes photogrammétriques, et les méthodes de télédétection.

L'interférométrie radar (DinSar) qui appartient aux méthodes de télédétection permet notamment de détecter et quantifier des déformations du sol avec une précision centimétrique, voire millimétrique, sur des zones de plusieurs dizaines de kilomètres de large.

6. Conclusion

Le phénomène de subsidence causé par la surexploitation des eaux souterraines est devenu un problème environnemental qui nécessite une prise en charge. En effet ce type de subsidence a causé d'importants dommages économiques, sociaux et culturels à un nombre importants de régions. Cette subsidence caractérisée par le tassement, la fissuration et l'effondrement du sol a provoqué des dommages considérables aux différents ouvrages (édifices, routes, autoroutes, voies ferrées, et d'autres installations...). Aujourd'hui il est devenu nécessaire de prendre des mesures pour contrôler ce phénomène. Ce contrôle peut être réalisé grâce à une méthodologie basée sur la prédiction, la prévention et la protection.

7. Bibliographie

- Anton S, Ryszard H, « subsidence prediction caused by the oil and gas development », 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.
- Chongxi C, Shunping P, Jiu J, «Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China», *Hydrogeology Journal* (2003) 11:275–287.
- Damien C et al, «< Subsidence et effondrements le long du littoral jordanien de la mer Morte : apports de la gravimétrie et de l'interférométrie radar différentielle >>, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 869–879.
- Jesús P, Jorge A, Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, núm. 3, 2007, p. 389-402.
- Jesus P, Modelo de subsidencia del valle de querretaro y prediccion de agrietamientos superficiales, Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2007.
- Oscar M (1), Vicenç P (), Roman A (1), Albert A., Marga Torre «Medidas de deformación del terreno a vista de satélite», XI Congreso Nacional de Teledetección, 21-23 septiembre 2005.
- Puerto de la Cruz. Tenerife.
- Ramiro R., Isaías R., « Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia », *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Número Especial de Geología Urbana Tomo LVIII*, núm. 2, 2006, p. 265-269.
- R. Tomás et al., « Monitorización de la subsidencia del terreno en la Vega Media del río Segura mediante Interferometría SAR diferencial (DInSAR) », *Geogaceta*. 39. 2006.