

Sécheresse et fondations de bâtiments : retour d'expérience

Georges-Henri Ducreux⁽¹⁾

A partir des années 1989-1990, des sécheresses successives ont sévi en France, occasionnant de nombreux dégâts sur les bâtiments, notamment sur ceux qui étaient fondés sur des argiles. Un grand nombre de communes ont bénéficié d'arrêtés de catastrophe naturelle relatifs aux "mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols". La publication de ces arrêtés a entraîné une avalanche de déclarations de sinistres, suivis d'expertises intégrant des études de sols.

La principale difficulté de ces expertises est de diagnostiquer les causes exactes des désordres : sont-ils dus à des défauts de construction, aux variations saisonnières ordinaires, ou à des sécheresses exceptionnelles ? Le choix des tests et mesures effectués est primordial pour un bon diagnostic. Sont, de plus, essentielles la représentativité des points où les essais sont réalisés et la saison à laquelle a lieu le diagnostic. C'est pourquoi de nombreuses erreurs peuvent survenir en expertise : mauvaise appréciation des caractéristiques du sol, mauvaise modélisation du phénomène, mauvaise attribution des causes.

Sondages et essais réalisés lors d'expertises

Lors d'une expertise d'un bâtiment fissuré, il est intéressant de pouvoir réaliser les prestations suivantes :

- mises à jour des fondations avec prélèvements d'échantillons (intacts si possibles) ;
- forage carotté et/ou puits à la pelle mécanique, avec profils de teneur en eau et prélèvements d'échantillons intacts ;
- forage destructif avec essais pressiométriques ;
- sondages au pénétromètre statique ou dynamique au moins aux quatre coins du bâtiment ;
- limites d'Atterberg ;
- essai au bleu ;
- essai de dessiccation (limite de retrait conventionnelle ou effective) ;
- essai de gonflement (pression-amplitude) ;
- identification des argiles par diffractométrie aux rayons X.

Sondages et essais réalisés lors d'une construction de villa

Dans la réalité, le budget est souvent très limité et on doit se contenter des prestations suivantes :

- puits à la pelle mécanique ;
- sondages au pénétromètre dynamique ;
- si possible, valeur de bleu, limites d'Atterberg et teneur en eau naturelle afin de caractériser la sensibilité des argiles à l'aléa retrait-gonflement.

Représentativité et limites des prestations réalisées

Les limites d'Atterberg et les valeurs de bleu sont souvent utilisées seules pour caractériser le caractère gonflant ou non des argiles. Des erreurs d'interprétation peuvent cependant avoir lieu si on méconnaît la nature des argiles.

Citons le cas d'un site sur *Manosque*, formé de colluvions sur des marnes de Viens (Oligocène) où les résultats des essais ont été les suivants :

- limites d'Atterberg : $W_L=44.8$; $W_p=25$; $I_p=19.8$; ces résultats seuls auraient pu conduire à un diagnostic de type argiles moyennement gonflantes, et donc impact possible de la sécheresse retenu ;
- la valeur de bleu obtenue sur le même échantillon est de 1,5, ce qui correspond à un matériau faiblement gonflant.

Les deux types d'essais réalisés aboutissent donc à des résultats contradictoires.

Un essai de diffractométrie aux rayons X vient éclairer la question : le matériau testé comprend 65 % de calcite et 25 % d'argiles dont 69 % de smectiques. L'indice de plasticité de 19 porte donc sur les argiles au sens granulométrique et non au sens minéralogique. Le risque de gonflement par réhumectation du sol est en fait faible.

Citons également le cas sur *Mirabeau* (04) d'une villa construite à cheval sur un banc de grès et des marnes. Lors d'une expertise par un bureau d'études, il fut prélevé un échantillon dans la frange altérée, sableuse, des grès. Le sol fut considéré comme non gonflant, et il fut

1. Sol Concept, Le Village, 04510 Le Chaffaut. Tél. 04 92 34 77 80. Fax. 04 92 34 74 30. E-mail : solconcept@wanadoo.fr

proposé des micropieux à 5 m seulement de profondeur, faute d'avoir vérifié la représentativité de l'échantillon.

Variations saisonnières

Si les limites d'Atterberg, les valeurs de bleu, les limites de retrait et la diffractométrie sont en théorie indépendants de la période d'étude, il n'en va pas de même des autres essais.

La **pression de gonflement** dépend entre autres de la teneur en eau initiale de l'échantillon, et donc de la saison à laquelle l'échantillon est prélevé. On peut ainsi, au laboratoire, obtenir des pressions de gonflement de 0,025 MPa (Mirabeau 04 - la Condamine) pour un sol sollicité à 0,08 MPa, ce qui est en contradiction avec l'observation d'ouvertures-fermetures des fissures. L'échantillon testé possédait en fait déjà une forte teneur en eau. À l'inverse, on peut obtenir des pressions très élevées sur des marnes, alors qu'elles ont été prélevées à un niveau où elles sont protégées des variations saisonnières. Cette pression n'aura donc aucun effet, puisqu'elle ne sera pas sollicitée. Une mauvaise appréciation de la pression de gonflement réel peut aboutir à des sous-dimensionnements ou à des surdimensionnements de reprises en sous-œuvre tels que plots ou micropieux. De plus, pour être complet, il faudrait tenir compte aussi de l'amplitude de gonflement.

Les **profils de teneur en eau** sont très variables dans le temps. En général, les expertises ont lieu bien après la fin de la sécheresse caractérisée, ce qui fait que ces profils ne sont plus représentatifs de ce qu'ils étaient au moment de l'apparition des désordres. Leur emploi est donc délicat... Exécutés en saison sèche "ordinaire," ils peuvent permettre d'avoir une connaissance approchée de la profondeur à partir de laquelle la teneur en eau est constante (en terrains homogènes), donc insensible aux humectations-dessiccations depuis la surface.

Les **essais pressiométriques** sont relativement fiables dans le temps à partir d'une certaine profondeur, s'il n'existe pas sur le site des circulations d'eau profondes et intermittentes en terrain argileux ou limoneux. En surface, en revanche, la pression limite en milieu argileux dépendra de la plage de teneur en eau du matériau (consistance solide, plastique ou liquide).

Mais les essais pressiométriques sont en général exécutés tous les mètres ou tous les mètres cinquante, et, même si on a la chance de disposer de deux séries d'essais sur le même site à des saisons différentes, le nombre de points sur les 3 premiers mètres est insuffisant. Il est cependant possible d'extrapoler vers la surface la ten-

dance observée en profondeur pour éliminer les effets climatiques superficiels en cas de terrain homogène, **comme le montre** le schéma ci-dessous.

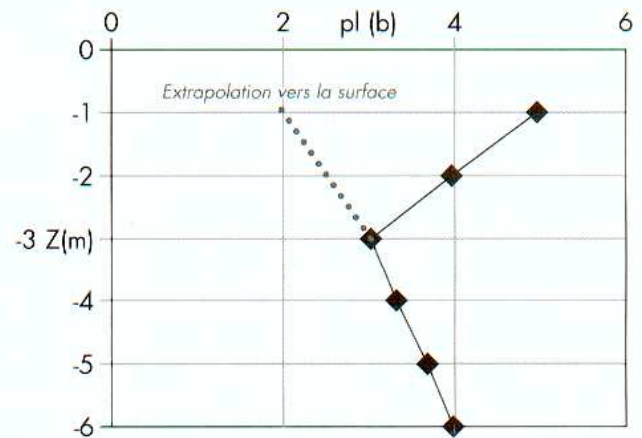


Figure 1: Extrapolation vers la surface de la profondeur.

Les **sondages au pénétromètre dynamique**, s'ils sont critiquables quant à la valeur absolue de leurs résultats, ont le mérite de donner des points tous les 10 ou 20 cm. Grâce à leur facilité d'exécution, ils sont en général réalisables autour d'un même bâtiment, ce qui permet d'effectuer des comparaisons et souvent de connaître la géométrie des différentes couches du terrain.

Dans la région de Digne (04), nous avons réalisé des sondages au pénétromètre dynamique sur les mêmes sites, à des périodes différentes. Le terrain était constitué d'un recouvrement argileux de type colluvial sur des marnes miocènes, altérées puis saines. Les résultats ont été très significatifs : alors que le sondage effectué en août 1997 présentait un ventre de Rd atteignant 10 à 20 MPa, un sondage effectué au même endroit en janvier 1998 possédait un profil radicalement différent de 1 à 3 m, puisque les résistances dynamiques oscillaient entre 0,6 et 2 MPa. Autrement dit, les résistances dynamiques étaient passées de 10 MPa à 0,6 MPa entre l'été et l'hiver. À noter qu'avec des essais pressiométriques, on aurait eu également de grandes variations.

On devine les dangers de ce phénomène : dimensionner des fondations superficielles en terrain argileux à partir des seuls essais in situ estivaux aurait conduit à une pathologie quasi-certaine du bâtiment. Une expertise après construction menée en été aurait pu aboutir à un problème de tassement par dessiccation ou au moins à un problème d'argiles gonflantes, tandis qu'une expertise effectuée en hiver aurait sans doute conclu à une insuffisance de largeur de fondations.

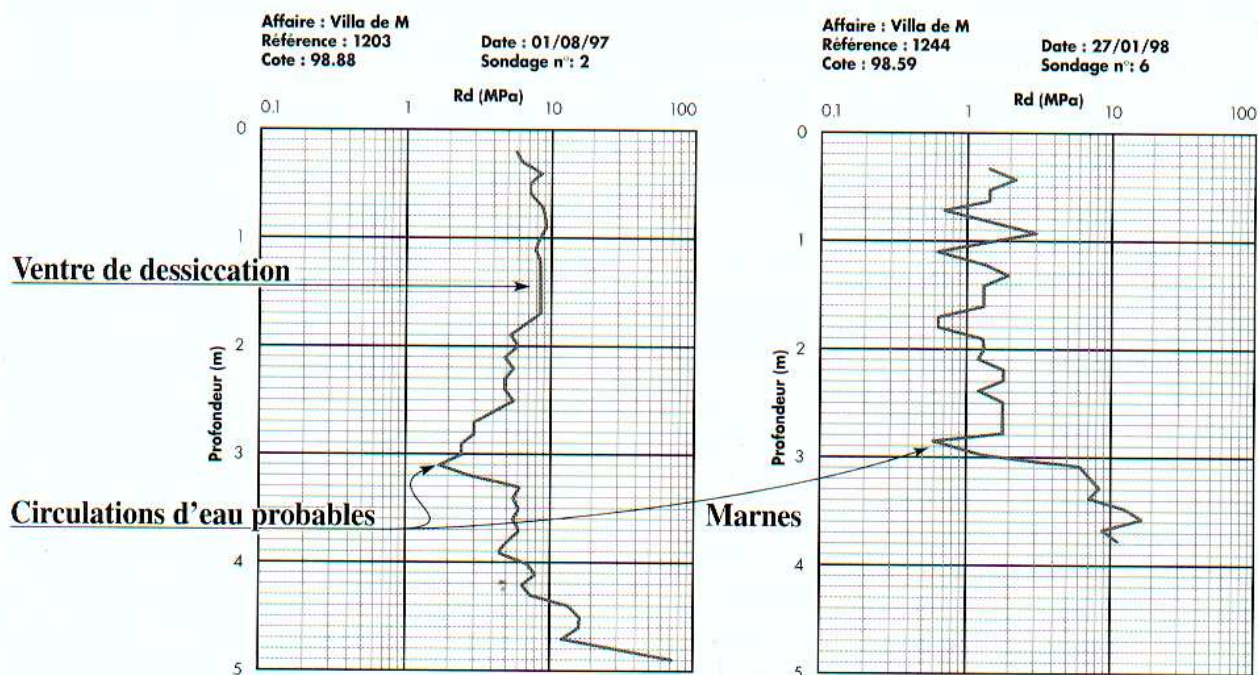


Figure 2: Courbes de résistance dynamique sur Aiglun (Les Grès).

Ce contraste saisonnier a aussi été observé sur la commune de *Champtercier* (04), où nous avons réalisé des sondages en mai 1997, préalables à la construction d'un lotissement, et où nous avons réalisé d'autres sondages au moment de la construction de certaines villas du même lotissement. Le même phénomène était observable: variations des résistances dynamiques sur la couche de couverture, avec des pics à 20 MPa en mai 1997 et seulement à 8 MPa en janvier 1999 (rapport 1 à 2.5).

Dès lors, il paraît indispensable de pouvoir anticiper sur ce problème, les études ou expertises ne pouvant être toutes réalisées en saison pluvieuse !

Critères de reconnaissances complémentaires

Qu'est-ce qui différencie la zone superficielle susceptible de changer de capacité portante de celle sous-jacente plus stable dans le temps ?

Les observations menées lors des études citées plus haut, et lors de très nombreuses autres études sur des configurations similaires (recouvrement argileux sur marnes altérées puis saines), indiquent que la zonalité verticale de la structure du sol doit être retenue.

Les argiles soumises au phénomène de retrait-gonflement sont en effet déstructurées. Elles présentent, même sèches, une apparence massive, souvent rapide-

ment pulvérulente à la pression sous les doigts, et généralement, on peut observer de grandes surfaces verticales lisses délimitant des volumes de plusieurs décimètres d'argile massive. A l'inverse, la zone non soumise aux phénomènes de gonflement-retrait présente en général une structure plus organisée. Lorsqu'on casse un échantillon sous les doigts, il se détache des petits polyèdres de taille centimétrique, souvent individuellement compacts. Plus bas, dans les marnes, la structure est massive, mais non pulvérulente.

L'explication de ce phénomène est à rattacher à celle proposée par les pédologues concernant les vertisols ou les sols vertiques. En saison sèche, des fentes verticales apparaissent à la surface du sol; elles peuvent mesurer plusieurs centimètres de large et s'enfoncer profondément dans le sol (2-3 m ?). En période humide, des fines (pouvant provenir des parois des fentes) pénètrent dans ces fentes, modifiant le volume initial du sol au moment du regonflement. Il s'ensuit l'apparition de zones de faiblesse et un brassage sur une épaisseur d'autant plus importante que le terrain est sensible à la sécheresse, brassage conduisant à une déstructuration des argiles à l'échelle macroscopique.

Une absence de structure dans des argiles superficielles, même si elles possèdent des résistances dynamiques supérieures à 10 MPa lors de sondages, doit donc être, dans les régions soumises à de très fortes évaporations et réhumectations, un indice devant alerter le géotechnicien.

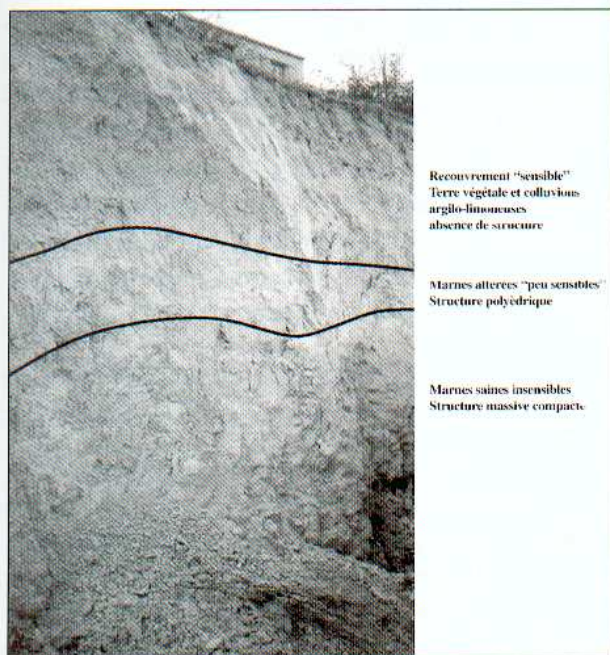


Figure 3 : Aiglun - Les Grès. Coupe du terrain lors du terrassement (03/98).

Remarque : un autre critère de différenciation pourrait être la vitesse sismique de la couche suspecte. On peut en effet s'attendre à ce que les vitesses soient anormalement faibles par rapport à la compacité mesurée au pénétromètre (par exemple 300 ou 400 m/s paraîtrait douteux sur un terrain de Rd 20 Mpa où on pourrait attendre au moins 800 m/s).

Vers une théorie du gonflement retrait

On connaît le modèle rhéologique de la consolidation : on peut comparer le sol à un ressort enfermé dans un piston possédant un orifice plus ou moins étroit. Le chargement entraîne immédiatement la mise en pression de l'eau. La consolidation primaire correspondrait à l'évacuation plus ou moins rapide de l'eau par l'orifice, avec chargement progressif du ressort, jusqu'à annulation de la pression de l'eau. La consolidation secondaire correspondrait à la poursuite de l'écrasement du ressort, symboliquement, à la réorganisation du squelette du sol (fluage) sous le poids de l'ouvrage.

Le modèle de Terzaghi, explicatif des phénomènes de tassements par consolidation, ne l'est pas des tassements par dessiccation du sol lors de sécheresses importantes. Lors de telles périodes, la succion agirait sur le ressort, indépendamment du chargement : plus l'eau s'évapore par l'orifice, plus la succion est forte et plus le ressort se comprime (le squelette du sol se contracte). En période plu-

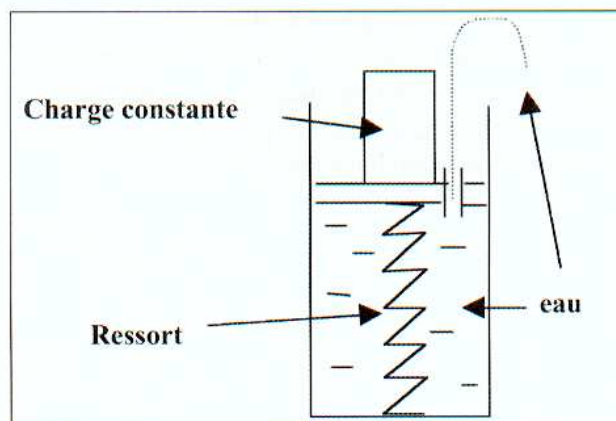


Figure 4 : Modèle rhéologique de la consolidation, d'après G. Terzaghi.

vieuse, la succion disparaît, mais le ressort se détend, éventuellement au delà de sa compression initiale, sous le chargement. Un nouveau tassement par consolidation ou dessiccation est possible.

Quelle est la part entre un tassement par dessiccation imputable à une sécheresse ordinaire et un tassement par dessiccation dû à une sécheresse exceptionnelle ? Lors d'une expertise, il est crucial de pouvoir différencier les deux causes. Les modèles suivants peuvent donner une idée de la question.

Modèle simple à deux éponges

Une couche située sous des fondations, sensible au gonflement-retrait, pourrait être modélisée par deux éponges superposées : une éponge 1, qui correspondrait à la couche située immédiatement sous les fondations, susceptible de tasser ou de gonfler en période ordinaire, et une éponge 2, qui correspondrait à une couche inférieure, soumise à des variations de teneur en eau négligeables en année ordinaire.

Remarque : dans le cas de la figure 5, l'éponge 1 serait située entre 0 et 2.9 m, et l'éponge 2, entre 2.9 et 4.3 m environ.

Ces deux éponges, superposées, pourraient soit être alimentées en eau, soit se dessécher par succion due à l'éva-

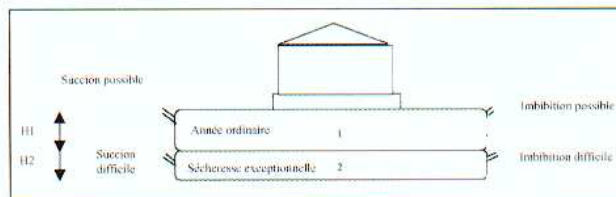


Figure 5 : Modèle concernant le gonflement retrait.

potranspiration. En période ordinaire, seule interviendrait l'éponge 1. En saison sèche, l'eau est aspirée et l'éponge se dégonfle sous la seule action de l'évapotranspiration extérieure. Une sécheresse ordinaire peut alors être cause de fissures dans le bâtiment, s'il est mal conçu.

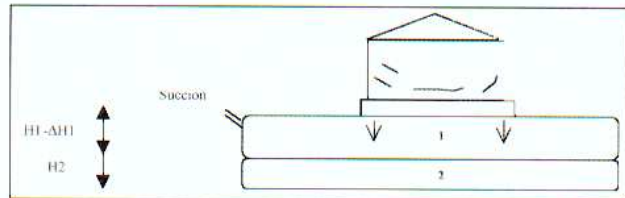


Figure 6: Modèle en période sèche ordinaire.

Si la saison devient humide, l'éponge se regonfle, pouvant éventuellement soulever le bâtiment. Le regonflement peut d'ailleurs être différé dans le temps.

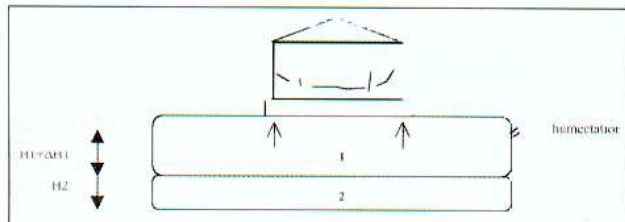


Figure 7: Modèle en période humide ordinaire.

Si la saison humide cesse, l'expulsion de l'eau de l'éponge commence, sous le poids du bâtiment accompagné éventuellement de la succion du sol due à l'évapotranspiration.

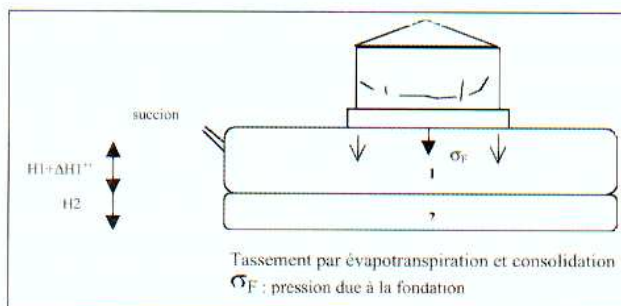


Figure 8: Modèle en fin de saison humide.

Le tassement principal dans lequel intervient le poids du bâtiment s'arrête lorsque la pression interstitielle s'annule. Un tassement supplémentaire par dessiccation peut intervenir sous la seule action de l'évapotranspiration et un nouveau cycle peut recommencer, les désordres dans

le bâtiment n'étant évidemment pas réversibles en raison des dissymétries inévitables du site (ne serait-ce que par la présence de la construction). Le sol argileux continue alors à se déstructurer.

En moyenne la tranche de sol correspondant à l'éponge 1 peut être évaluée à 1,5 m d'épaisseur dans le Sud-Est de la France. En période sèche exceptionnelle, la deuxième éponge, en équilibre en temps normal, entre en action et se dégonfle par le jeu d'une évapotranspiration hors norme.

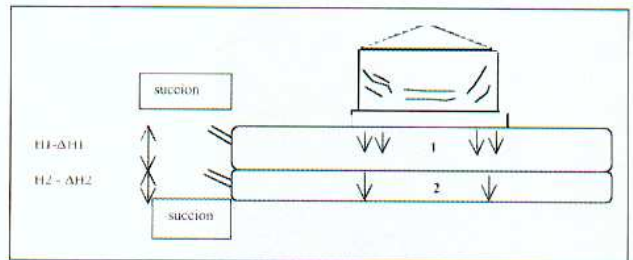


Figure 9: Modèle en période sèche exceptionnelle.

L'éponge 2 pourra éventuellement mettre de longues années avant de retrouver son état initial, ou pourra même ne jamais le retrouver. L'épaisseur globale des éponges 1 et 2 peut être évaluée à 3 à 4 m dans le Sud-Est de la France.

Généralisation

Ce modèle à deux éponges peut bien sûr s'étendre à 3, 4 ou davantage d'éponges. Il se complique dans le cas où le terrain est en pente. Une configuration fréquente dans le Sud-Est de la France est en effet la suivante : couverture sur substratum, avec toit du substratum sain localement parallèle à la pente, quel que soit le pendage des couches, comme l'illustre la figure 10.

Cette configuration est très souvent la cause de pathologies dans les bâtiments lorsque les argiles de la couverture sont de types gonflantes. La zone sensible aux variations de teneur en eau fonctionne comme une série

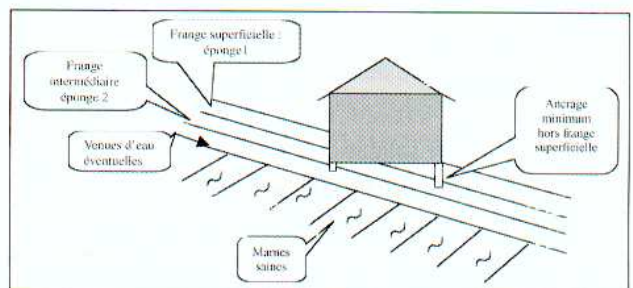


Figure 10: Construction sur terrain en pente.

d'éponges obliques qui se gonfleraient puis dégonfleraient de façon hétérogène, entraînant le bâtiment dans leurs mouvements. On observe alors des phénomènes lents de reptation de la couverture aboutissant à long terme à des tensions trop importantes dans la structure du bâtiment, et des désordres par franchissement de seuil de résistance de la structure apparaissent.

Conclusion méthodologie proposée au niveau d'une expertise

Le diagnostic sur les causes des désordres d'un bâtiment sinistré imputables éventuellement à des sécheresses exceptionnelles comporte de nombreux pièges. Il est indispensable que les essais et mesures effectués soient représentatifs du site dans l'espace et dans le temps. A la suite des exemples et considérations exposés plus haut, on peut proposer la méthodologie suivante, l'existence d'une sécheresse climatique ayant été prouvée au préalable :

- réalisation de sondages mécaniques permettant de modéliser le site en trois dimensions, faute de quoi il sera impossible de juger de la représentativité des essais effectués ;
- mises à jour des fondations du bâtiment, en fonction de son architecture, chaque mise à jour devant être représentative d'une zone bien définie ;
- réalisation de puits à la pelle mécanique permettant d'apprécier l'état de la structure du sol dans les zones argileuses et le gradient de teneur en eau ;
- réalisation d'essais de laboratoire du type essai au bleu, limites d'Atterberg et diffractométrie aux rayons X, permettant d'apprécier les facteurs de prédisposition du site aux effets d'une sécheresse exceptionnelle. La prise d'échantillons doit être effectuée dans les zones *a priori* suspectes modélisées en première phase.

Bibliographie

Agence qualité construction.
Fiche 02 - Pathologie du bâtiment.
Adresse : 9 boulevard Malesherbes - 75008 Paris.

Bonneau M., Souchier B., 1979 :
Constituants et propriétés du sol.
Editions Masson, pp. 38 à 57 et 266 à 312.

CEBTP, Guide pratique, 1991 :
Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse.

Chassagneux D., Stieltjes L., Mouroux P., Ducreux G. H., 1995 :
Cartographie de l'aléa "retrait/gonflement" des sols dans la région de Manosque.
Rapport BRGM n°R 38695 - novembre 1995.

Chassagneux D., Stieltjes L., Mouroux P., Ducreux G. H., 1996 :
Cartographie de l'aléa "retrait/gonflement" des sols à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute Provence.
Rapport BRGM n°R 39218 - Décembre 1996.

Costet J., Sanglerat G., 1983 :
Cours pratique de mécanique des sols.
Editions Dunod, T. 1, pp.151 à 157.

Duchaufour P., 1983 :
Pédogénèse et classification.
Editions Masson, pp. 260 à 297.

Ducreux G. H., 1991 :
Effets de la sécheresse 1989-1990 sur les bâtiments dans les Alpes de Haute Provence.
In Sécheresse, décembre, pp. 265 à 271.

Ducreux G. H., 1991 :
Cartographie des terrains sensibles à la sécheresse - Peipin (04)
Rapport SOL CONCEPT n°908.

Ducreux G. H., 1991 :
Cartographie des terrains sensibles à la sécheresse - Pierrevet (04)
Rapport SOL CONCEPT n°950-1.

Ducreux G. H., 1991 :
Cartographie des terrains sensibles à la sécheresse - Sainte Tulle (04)
Rapport SOL CONCEPT n°950-2.

Ducreux G. H., 1998 :
Diagnostic climatique et géologique - commune de Mirabeau.
Rapport SOL CONCEPT n°1240.

Ducreux G. H., 1998 :
Diagnostic climatique et géologique - commune d'Aiglun.
Rapport SOL CONCEPT n°1248.

Ducreux G. H., 1998 :
Diagnostic climatique et géologique - commune de Champserrier.
Rapport SOL CONCEPT n°1249.

Ducreux G. H., 1998 :
Diagnostic climatique et géologique - commune de Mallemoisson.
Rapport SOL CONCEPT n°1250.

Ducreux G. H., 1998 :
Diagnostic climatique et géologique - commune de Digne.
Rapport SOL CONCEPT n°1254.

Ministère de l'Environnement, 1993 :
Sécheresse et construction.
Guide de prévention.

Mouroux P., 1998 :
La construction économique sur sol gonflant.
Editions du BRGM.

Philipponnat G., 1987 :
Sols expansifs en France.
6th International Conference on Expansive Soils, New Delhi, 1-4 December.

Philipponnat G., 1991 :
Retrait - gonflement des argiles, proposition de méthodologie.
Revue française de Géotechnique n°57, pp. 5-22.