

Approche des études géotechniques liées à la pathologie des ouvrages

Bertrand Hubert⁽¹⁾

Introduction

Que ce soit dans le cadre d'une expertise judiciaire ou du traitement d'un dossier d'assurances, lorsque les désordres affectant un bâtiment semblent trouver leur origine dans un problème de sol, le géotechnicien est fréquemment sollicité pour déterminer la cause du sinistre et préconiser des remèdes. Ces missions, qui ont notamment proliféré lors de la période de sécheresse de ces dernières années, si elles peuvent paraître comme une manne pour la profession des géotechniciens, nécessitent de la part de ces derniers un traitement et une rigueur bien spécifiques. S'il peut paraître plus facile de démontrer *a posteriori* la cause d'un sinistre que de prévenir son apparition, encore faut-il que le géotechnicien évite certains pièges. Pour ce dernier, le danger est de restreindre sa recherche à sa spécialité, ce qui, et ceci parfois malgré toutes les apparences, peut l'écarter complètement de la vérité, les problèmes de sol n'étant heureusement pas la seule source de désordres sur les ouvrages.

Une étude pathologique doit donc se concevoir comme une enquête et il convient, préalablement, de recueillir tous les indices disponibles pour les analyser avant de proposer une hypothèse sur la cause d'un sinistre, ceci en évitant toute idée préconçue. Les investigations viendront ensuite confirmer, ou infirmer, cette hypothèse et devront permettre la définition, et éventuellement le dimensionnement, des remèdes.

Les données

L'ouvrage et son contexte

L'ouvrage

A défaut d'avoir été communiquées par le demandeur, généralement l'expert, les données relatives à l'ouvrage sinistré doivent être récoltées sur place par le géotechnicien.

- L'examen visuel de la construction apporte des informations essentielles sur la nature du bâtiment, mais aussi sur sa conception, voire sur ses matériaux constitutifs.
- Les renseignements oraux peuvent être très importants et éclairer la recherche de la cause du sinistre : historique des travaux, incidents lors de la construction, modifications ultérieures... L'expérience montre, toutefois, que la fiabilité des informations recueillies peut

être sujette à caution, sans qu'il y ait obligatoirement volonté de tromperie.

- Les plans et documents établis lors de la construction fournissent des renseignements précieux sur la structure d'un ouvrage, mais on se gardera néanmoins de les considérer comme le reflet indiscutable de la réalité : ainsi la présence d'un chaînage sur un plan implique peut-être qu'il a été facturé au maître d'ouvrage mais pas qu'il a été effectivement mis en œuvre.
- La connaissance de la structure d'un ouvrage peut nécessiter des investigations sur certains éléments. Ces reconnaissances ne sont pas nécessairement destructives grâce à certaines techniques d'auscultation de mise en œuvre facile (ferroscan, pachomètre, ...).

Les fondations

Encore plus que la superstructure de l'ouvrage, qui présente l'avantage d'être visible, les fondations constituent une inconnue importante et il est généralement nécessaire d'effectuer des investigations pour avoir des informations, qui ne seront toujours que ponctuelles, sur les fondations d'un ouvrage : nature, niveau d'assise, géométrie. Cette connaissance est primordiale, compte tenu de l'implication fréquente des fondations dans l'origine des désordres ; elle reste malgré tout souvent l'objet d'imprécisions et ceci pour différentes raisons.

- Les plans et autres documents, établis lors du marché de travaux sont ici, encore plus que pour le reste de l'ouvrage, sujets à caution :
 - ils ne prennent pas en compte les adaptations effectuées en cours de travaux ;
 - il est facile de ne pas respecter les termes d'un marché, sur des éléments cachés.
- Les fondations superficielles, mode de fondation largement le plus répandu, sont fréquemment l'objet de malfaçons, pas toujours faciles à mettre en évidence :
 - encastrement insuffisant (vis à vis de la nature du sol, du gel, ...);
 - mauvaise qualité du béton ;
 - dimensionnement insuffisant en regard des charges et de la qualité du sol ;
 - absence ou mauvais positionnement des armatures, lorsqu'elles s'avèrent nécessaires ;
 - excentrement par rapport aux murs porteurs, ...

1. Solen

16, allée Prométhée - BP 169 - 28003 Chartres Cedex - Tél. 02 37 88 03 32 - Fax. 02 37 30 90 75
E-mail : bertrand.hubert@solen-fr.com

- En matière de fondations l'expérience montre qu'il est possible d'être confronté aux situations les plus improbables :
 - il n'est pas exclu de constater une absence totale de fondation, les murs reposant directement sur le sol d'assise ;
 - il est fréquent de rencontrer des "radiers" constitués d'une simple dalle de (mauvais) béton dépourvue de toute armature, si ce n'est, à la rigueur, un simple treillis soudé anti-fissuration ;
 - les puits de fondation, à la réalisation délicate, notamment lorsqu'ils sont mis en œuvre sous la nappe phréatique, peuvent présenter des formes et des constitutions étonnantes, reflétant les difficultés rencontrées par l'entrepreneur.
- Suite à des premiers désordres, des reprises en sous-œuvre ont pu être ponctuellement réalisées, souvent par le constructeur lui-même dans le cadre de sa garantie de parfait achèvement, travaux qui, lorsqu'ils sont inadaptés, s'avèrent généralement un remède pire que le mal.
- Les fondations profondes, qui ne sont justifiées que lorsque les solutions superficielles ne sont pas réalisables, bien que réalisées par des entreprises spécialisées, ne sont pas exemptes de problèmes :
 - défauts d'exécution : faux refus au battage, interruption de bétonnage, rupture consécutive à un choc en cours de travaux, mauvais recepage, ...
 - erreurs de conception : fiche insuffisante, non prise en compte de frottement négatif ou de poussées latérales générées par des remblais contigus, ...

L'environnement

La visite du site permet également de placer l'ouvrage dans son environnement, dont il est indissociable.

- Il est bien connu que l'eau, au moins comme facteur aggravant, est impliquée dans la plupart des sinistres liés au sol. Tout ce qui concerne les relations entre l'ouvrage et cet élément doit donc être répertorié : circulations des eaux de ruissellement, recueillement des eaux pluviales, existence d'un système de drainage, manifestations de la présence d'une nappe phréatique, ...
- La pente peut être directement impliquée dans l'origine d'un sinistre, comme facteur d'instabilité, mais aussi, plus indirectement, en favorisant l'infiltration préférentielle des eaux de ruissellement, et en étant la cause des variations d'encastrement des fondations.
- Vis à vis de la dessiccation des sols, le rayon d'influence des arbres est très important, notamment en période de déficit pluviométrique. Par ailleurs, les racines peuvent s'insinuer sous les structures ou dans les cana-

lisations avec une force destructrice considérable. Il n'est donc pas possible d'ignorer la végétation dans une étude pathologique.

- L'étude des sinistres liés à la sécheresse a montré l'influence de l'imperméabilité des abords des bâtiments sur l'évaporation et donc la dessiccation des sols ; ainsi, sur certains sinistres, la simple présence d'une terrasse a permis d'expliquer l'hétérogénéité constatée sur l'humidité des sols d'assise et donc la localisation de désordres.

La géologie

La connaissance de la nature présumée des sols d'assise est indispensable à l'identification des vices du sous-sol pouvant être à l'origine du sinistre. Parmi les plus courants il est possible de citer :

- les dépôts alluviaux comportant des niveaux éminemment compressibles (vases, tourbes, ...);
- les anciennes zones d'extraction de matériaux (gravières, carrières, ...) actuellement remblayées ;
- les horizons susceptibles d'être affectés par des phénomènes de dissolution (gypse, anhydrite, ...);
- les niveaux ayant pu faire l'objet d'exploitation en carrière souterraine (calcaires, gypse, charbon, ...);
- les formations argileuses particulièrement sensibles aux variations hydriques (argiles sannoisiennes, molasse toulousaine, ...).

En première approche, avant toute investigation, le géotechnicien ne dispose que des cartes géologiques, de sa propre expérience et de ses qualités de géologue de terrain, le cas échéant. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que le sous-sol recèle souvent des anomalies difficilement prévisibles, qu'elles soient d'origine géologique ou artificielle.

Les phénomènes extérieurs

Il est toujours nécessaire de s'informer sur les éventuels agents extérieurs qui pourraient avoir déclenché les désordres et surtout d'obtenir précisément la date de l'événement, lorsqu'il s'agit d'un phénomène ponctuel, afin de la comparer avec la manifestation du sinistre. A ce propos, il convient d'être très prudent dans le crédit à accorder à la précision et la fiabilité des témoignages. De plus, on ne perdra pas de l'esprit qu'il peut exister un certain décalage entre la cause et ses conséquences. Les agents peuvent être d'origine naturelle ou artificielle.

- Les phénomènes climatiques sont les plus fréquemment mis en cause. Ce sont essentiellement des déficits de précipitations comme l'intense sécheresse de la dernière décennie, ou bien des excès comme la pluviosité exceptionnelle qu'a subie récemment la Picardie. Lorsqu'ils sont d'ampleur exceptionnelle, l'état de catas-

trophe naturelle est le plus souvent décrété pour les communes concernées, ce qui implique, du point de vue des assurances, un traitement particulier des sinistres. Les conséquences de ces phénomènes peuvent se traduire de diverses façons, directement sous la forme de crues ou de fluctuations des niveaux aquifères ou encore en ayant un effet sur l'état et les caractéristiques mécaniques des sols.

- Les séismes doivent également être signalés pour mémoire, étant exceptionnellement la cause de sinistres, bien qu'il y soit fait souvent allusion lorsqu'il n'apparaît pas d'explication à des désordres mystérieux.
- Les travaux peuvent avoir des conséquences directes sur les ouvrages avoisinants, en affectant les sols d'assise de leurs fondations ou encore, d'une façon plus pernicieuse, en ayant des effets sur le niveau de la nappe phréatique. Il faut également citer ici les vibrations que génèrent certains types de travaux, vibrations que les horizons rocheux peuvent transmettre aux structures ou encore auxquelles sont sensibles certains sols. L'implication de travaux qui sont terminés lors des opérations d'expertise est toujours très difficile à démontrer, les causes ayant généralement disparu et étant difficilement reproductibles.

Les désordres

Fissuration des murs

Soumise à des contraintes, la structure d'un ouvrage au comportement "fragile", ce qui est généralement le cas pour les maisons individuelles, est affectée de fissures que l'on peut ranger en 2 grandes familles.

- Les fissures de cisaillement résultent le plus souvent du gauchissement de la structure, suite à un tassement différentiel ; elles se présentent, le plus souvent, selon un schéma typique, en diagonale, en suivant éventuellement les joints de maçonnerie (parpaings, briques, ...). Elles peuvent se poursuivre par des fissures horizontales ou verticales au droit des changements de matériaux, par exemple à la jonction avec un chaînage. Au sein d'éléments homogènes, par exemple en béton, il est possible d'observer des fentes d'extension, comparables à celles observées sur des roches.
- Les fissures de traction apparaissent lorsque la structure, ou un de ses éléments, se rompt, sa résistance étant insuffisante pour s'opposer à des forces tendant à l'étiéner. C'est notamment le cas en partie haute des murs, en l'absence de chaînage horizontal, lorsque l'ensemble de l'ouvrage est soumis à une déformation.

Ces fissures affectent généralement l'intégralité de l'épaisseur des maçonneries et sont dites traversantes;

elles peuvent être la cause d'infiltrations et rendre un ouvrage impropre à sa destination.

De l'analyse de ces fissures va dépendre toute la conduite de l'étude et il est essentiel de distinguer les désordres résultant de mouvements de fondation de ceux qui n'affectent que l'enduit superficiel, ce qui est relativement facile, et surtout de ceux qui ont une origine typiquement structurelle : rotation de dalle, poussée de charpente, chocs thermiques. Il convient de bien savoir identifier ces différents types de fissures, toute confusion pouvant avoir des conséquences préjudiciables à la poursuite de l'étude. Ce type d'erreur est malheureusement fréquent et confirme la nécessité pour le géotechnicien de posséder de sérieuses notions dans le domaine du bâtiment, en gros œuvre comme en second œuvre.

Ouverture de joints de rupture

La réalisation d'un joint de rupture est nécessaire, et imposée par les règles de l'art, à la jonction entre deux parties d'ouvrage qui présentent une différence de niveau de fondation ou une grande hétérogénéité de charge (par exemple dans le cas d'un nombre d'étages différents), lorsque la structure n'est pas suffisamment rigide pour accepter des tassements différentiels importants. Les joints de rupture se comportent comme des "fusibles" et s'avèrent être un bon indice sur la nature des mouvements en cause. Dans certains cas l'ampleur des tassements différentiels peut être suffisamment importante pour que le désaffleurement créé constitue une gêne dans l'usage des locaux. Il convient de signaler également que lorsqu'un joint n'a pas été initialement projeté, il peut se créer à son emplacement une fissuration importante et généralement inesthétique.

Phénomènes de distorsion

Lorsque la structure d'un ouvrage est relativement souple, la déformation de son ossature peut se traduire, à défaut d'une fissuration des murs porteurs, par un déséquerrage des huisseries, une inclinaison des planchers, ou encore par des désordres ne concernant que les remplissages fragiles et les plafonds. Ce type de manifestation ne facilite pas la tâche du géotechnicien dans la mesure où elle rend problématique l'identification des mouvements en question.

Basculement de l'ouvrage

Si l'ouvrage est suffisamment rigide et le mouvement de sol de grande ampleur, l'ouvrage peut être l'objet d'un basculement général, éventuellement perceptible par les usagers, et que des relevés sont susceptibles de révéler. Ces

relevés peuvent porter, selon leur commodité de mise en œuvre, sur l'horizontalité des sols ou la verticalité des murs. Ils nécessitent des instruments de mesure suffisamment précis pour mettre en évidence des déformations significatives, non imputables à des défauts de construction : le centimètre en déplacement absolu et 1/500 en relatif. Il convient de signaler qu'il est relativement fréquent de constater, notamment sur des bâtiments ayant été exposés à des phénomènes de dessiccation, des mouvements d'une amplitude atteignant le 1/100.

Mouvements affectant les sols intérieurs (dallages sur terre plein)

Ces mouvements sont généralement liés à des phénomènes de tassement qui peuvent résulter soit du sol d'assise (compressible, rétractable, sensible à des venues d'eau parasites, ...) soit d'une mauvaise réalisation de la forme (matériaux impropres, insuffisance de compactage). Il est également possible d'assister à des gonflements [sols gonflants par humidification, réactions chimiques entre un constituant du sol (sulfates) et le ciment, ...]. Il convient d'insister sur le fait qu'en matière de pathologie d'ouvrage les mouvements constatés sont toujours relatifs. Tout particulièrement pour les dallages, il est indispensable de se poser la question, même si la réponse apparaît *a priori* évidente : est-ce le sol qui gonfle ou bien les murs périmétriques qui s'enfoncent ?

La localisation des désordres permet généralement d'avoir une première approche sur leur origine :

- en périmétrie et non au cœur de l'ouvrage (phénomènes de retrait dus à la sécheresse);
- à proximité de réseaux enterrés (fuites éventuelles);
- dans des zones de terrassement en remblai (insuffisance de compactage);
- à proximité des murs ou appuis (remblaiement des fouilles de fondation), ...

L'approche des causes

Analyse des désordres

Il est essentiel d'apprécier, à travers l'analyse des désordres, la nature des contraintes qui les ont occasionnés et, en conséquence, les éventuels mouvements de fondation qui en sont la cause. Il va ainsi être possible de mieux concentrer les investigations sur ces zones suspectes et ainsi vérifier les hypothèses émises.

Comme il a été dit précédemment, les mouvements observés sont malheureusement relatifs et il est souvent difficile d'apprécier quelle est la partie de la structure qui

est restée fixe. D'une façon générale, on a trop souvent tendance à se fier à ce qui paraît être une évidence. Par exemple, lorsque l'on constate un mouvement relatif entre deux parties d'ouvrage, il convient d'être très prudent avant de considérer que c'est la plus importante qui est stable, même si c'est souvent le cas; on a vu un bâtiment basculer dans son ensemble tandis que sa cage d'escalier extérieure, dont il s'était désolidarisé, n'avait pas bougé. C'est pour éviter ce genre de méprise qu'il est recommandé d'effectuer des mesures d'inclinaison dès qu'un doute existe.

De même, dans l'analyse des désordres, il faut toujours prendre en compte que le mouvement en cause peut être situé à l'opposé de la zone sinistrée, tout particulièrement lorsque l'on observe des fissures de traction.

Lorsque l'ouvrage affecté présente une structure très hétérogène, avec notamment une grande diversité dans les matériaux de construction, l'analyse peut s'avérer très délicate et il convient alors d'être très prudent dans ses conclusions, quitte à envisager plusieurs hypothèses qu'il conviendra de vérifier ultérieurement lors de la phase d'investigation.

Lorsque l'on suspecte l'intervention d'un phénomène extérieur, il convient de s'assurer de la concomitance entre la date de manifestation des désordres et cet événement. Il faut toutefois être vigilant sur la véracité des informations recueillies, le souci d'être indemnisé l'emportant souvent sur le sens moral des sinistrés.

Une fois acquis que les désordres sont bien liés à un mouvement des fondations de l'ouvrage, à partir de l'ensemble des informations recueillies, le géotechnicien doit logiquement avoir des soupçons sur le ou les facteurs qui sont la cause du sinistre.

Hypothèse sur les causes

Insuffisance de portance des sols

Lorsque le mode de fondation est inadapté ou insuffisamment dimensionné pour que la transmission des charges de l'ouvrage au sol d'assise puisse se faire correctement, les désordres surviennent généralement très tôt dans la vie de l'ouvrage. Cette cause est donc relativement facile à identifier. Néanmoins, on devra tenir compte d'éventuelles modifications, du sol ou de l'ouvrage, qui peuvent entraîner des désordres "tardifs". Vis à vis de l'ouvrage, on sera notamment attentif aux modifications qu'il a pu subir dans sa nature ou son usage (surcharge sur un plancher par exemple). Les processus d'évolution naturelle des sols sont généralement très lents en regard de la durée de vie d'un ouvrage. Cependant, sous les effets de l'eau par exemple, certains sols peuvent voir leurs caractéristiques méca-

niques se dégrader rapidement, phénomène qu'il convient éventuellement de prendre en compte.

Sensibilité des sols aux variations hydriques

Jusqu'à récemment, sous nos climats tempérés, les ouvrages avaient été peu exposés aux variations hydriques de leurs sols d'assise et, si l'on parlait des problèmes des sols gonflants, on faisait surtout référence à des phénomènes auxquels étaient confrontés les géotechniciens exerçant leurs talents outre-mer. La dernière décennie a montré que la dessiccation des sols consécutive à un déficit pluviométrique exceptionnel pouvait affecter la stabilité des ouvrages à un point tel qu'il a fallu avoir recours à un système d'indemnisation particulier pour gérer les milliers de sinistres apparus sur tout le territoire national.

A ce propos, il convient de signaler que, même si l'ampleur des tassements provoqués par la dessiccation des sols argileux a pu être très importante, de nombreux facteurs aggravants sont souvent en cause dans la manifestation des désordres :

- l'insuffisance des constructions, notamment en ce qui concerne leur rigidité ;
- le non respect de certaines règles de l'art élémentaires ;
- la présence de végétaux de taille importante à proximité des constructions.

Si l'on peut considérer que la sinistralité imputable à la dessiccation des sols est terminée on peut, par contre, être inquiet sur les conséquences de la réhumidification des sols.

Déstabilisation des assises par agent extérieur

Cet agent est le plus souvent l'eau qui peut s'être manifestée de multiples manières.

- Les fuites de réseaux constituent, principalement en site urbain, une cause fréquente de sinistre. L'eau peut agir de différentes façons :
 - lorsque le débit est important, en entraînant les éléments fins du sol d'assise des fondations et provoquant l'affaissement de l'ouvrage ;
 - en altérant la qualité des sols et diminuant leur portance en dessous du seuil de stabilité, voire provoquant un effondrement structurel (sols effondrables) ;
 - en générant des variations volumiques des sols, lorsque ces derniers sont gonflants et en état de succion ;
 - en provoquant la ruine de cavités souterraines sous-jacentes (caves, carrières souterraines).

Lorsque l'on a constaté la rupture d'une canalisation, il faut toutefois se garder de penser que l'on a identifié l'origine du sinistre, cette rupture pouvant être une conséquence du mouvement de sol et non la cause.

- Certains ouvrages d'assainissement implantés près des bâtiments et présentant des dysfonctionnements importants peuvent agir comme les fuites précédentes, bien que le phénomène soit plus lent. Il peut s'agir des dispositifs d'assainissement individuels, tranchées d'infiltration et puisards, et surtout des drainages périphériques, souvent mal conçus et mal réalisés.
- Les constructions elles-mêmes peuvent avoir une influence sur la circulation des eaux superficielles et souterraines, par exemple en y faisant obstacle, et subir les conséquences des modifications qu'elles entraînent.
- Lorsque les sols sont particulièrement compressibles et qu'ils baignent au sein d'une nappe phréatique, ce qui va souvent de pair, tout abaissement significatif du niveau de cette nappe entraîne une reprise de la consolidation des sols et, en conséquence, le tassement des ouvrages qui y sont fondés superficiellement. Les causes de l'abaissement d'une telle nappe peuvent être naturelles (sécheresse) ou artificielles (rabattement dans le cadre de travaux par exemple).
- Bien que le phénomène ne se rencontre que sur les rives de cours d'eau et en bordure du littoral maritime, il faut toutefois citer l'influence que l'eau peut avoir sur les assises des ouvrages édifiés dans ces zones :
 - par érosion, sous les effets des courants ou marées,
 - par influence sur la stabilité des pentes, lorsque celles ci sont raides.

Parmi tous les agents extérieurs, dont on ne saurait dresser une liste exhaustive, les travaux réalisés à proximité d'ouvrages existants constituent une cause de sinistre importante. Outre les rabattements de nappe qu'ils nécessitent fréquemment et dont il a été parlé plus haut, les fouilles de grande profondeur peuvent occasionner, lorsque toutes les précautions ne sont pas prises, une décompression des terres situées en arrière des soutènements et donc le tassement des constructions voisines. La réalisation de tranchées pour le passage de réseaux, notamment si elles sont laissées trop longtemps ouvertes, peut avoir des conséquences, certes de moindre ampleur, mais néanmoins suffisantes pour entraîner des désordres importants aux ouvrages situés à proximité.

Mouvements de terrains de grande ampleur (effondrements de cavités, pentes instables)

On trouve ici des phénomènes qui affectent généralement des masses de sols ou de roches telles que leur ampleur implique des études bien particulières :

- la cause des désordres est évidente,
- le sinistre n'est pas limité à l'ouvrage étudié,

- la garantie de la stabilité de l'ouvrage nécessite des moyens conséquents.

Néanmoins, il est relativement fréquent d'être confronté à des problèmes plus subtils qui méritent d'être mentionnés.

- Si les glissements en masse présentent des indices remarquables qui permettent d'identifier relativement facilement leur mécanisme, il existe également des phénomènes lents et d'ampleur limitée qui sont beaucoup plus difficiles à appréhender : solifluxion de sols argileux dans des pentes naturelles de faible inclinaison, fluage sous la surcharge apportée par un ouvrage, déplacement de masse rocheuse à la faveur de plans de fracture lubrifiés par des eaux d'infiltration, ... Seul le suivi d'une instrumentation, judicieusement installée, permet de statuer sur ces cas délicats.
- Qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, les cavités peuvent affecter la stabilité des ouvrages édifiés à leur aplomb. Leur présence, lorsqu'elle est avérée, entraîne généralement, pour les projets de construction concernés, des sujétions importantes : travaux de comblement, fondations particulières, renforcement de la structure, ... Néanmoins, il n'est pas exclu de rencontrer des bâtiments édifiés au dessus de tels vides, soit parce que leur existence est ignorée soit parce que le risque a été sous-estimé. Les effondrements qui peuvent affecter ces cavités, et plus particulièrement celles qui ont été creusées artificiellement, sont susceptibles d'avoir des répercussions jusqu'à la surface du sol et affecter gravement la stabilité des ouvrages qui y sont établis. Avant l'effondrement généralisé, qui entraîne le plus souvent la ruine de l'ouvrage, il est fréquent d'assister à des mouvements de sols ne provoquant que des désordres limités, mais évolutifs. *A contrario* la présence d'une cavité sous un bâtiment présentant des désordres n'implique pas obligatoirement que cette dernière soit la cause du sinistre et, comme toujours, il faut se garder ici encore de toute conclusion hâtive.

Déficience du système de fondation

Pour que les charges de l'ouvrage se transmettent correctement au sol encore faut-il que la fondation ait été correctement exécutée. Comme il a été dit plus haut il s'agit de la cause la plus difficile à suspecter a priori, les indices n'étant d'ordinaire pas évidents, sauf communication d'incidents de chantier. Elle s'impose le plus souvent par défaut d'une autre solution acceptable et implique nécessairement des investigations poussées pour être étayée. De plus, la découverte d'une imperfection du sys-

tème de fondation n'implique pas obligatoirement que ce soit la cause du sinistre ; dans certains cas, il peut s'agir tout au plus d'un facteur aggravant.

Si les fondations superficielles sont les plus sujettes aux imperfections, ces dernières sont par contre relativement faciles à mettre en évidence. Pour les fondations profondes, qui ne sont pas exemptes de malfaçons, cette recherche nécessite la mise en œuvre de moyens beaucoup plus conséquents, avec des résultats parfois aléatoires.

Le programme de reconnaissance

Si le programme de reconnaissance est guidé par les résultats de l'analyse précédente et donc orienté sur la cause pressentie, il doit aussi permettre, le cas échéant, la mise en lumière d'une autre origine aux désordres que celle qui paraît évidente. Son but est donc multiple :

- vérifier ou infirmer les hypothèses émises et conclure sur la cause du sinistre ;
- préciser les facteurs déclenchants ;
- dans le cadre d'une expertise judiciaire, fournir à l'expert les éléments susceptibles de préciser les responsabilités ;
- apprécier le caractère évolutif du mouvement de sol et, à défaut de statuer, instrumenter ;
- fournir les solutions permettant de mettre un terme aux désordres.

Il n'est donc pas possible de définir *a priori* un programme de reconnaissance standard, chaque problème étant pratiquement un cas différent. Toutefois, ce programme est établi sur les bases suivantes :

- portance et compressibilité des sols : sondages pressiométriques, sondages au pénétromètre dynamique ou statique, prélèvement d'échantillons non remaniés pour essais de laboratoire (compressibilité à l'oedomètre, essai de cisaillement, ...);
- phénomènes de retrait-gonflement : sondages avec prélèvements d'échantillons remaniés pour profils de teneur en eau et essais d'identification et non remaniés pour essais de retrait et de gonflement ;
- déstructuration des sols ou entraînement de fines : sondages destructifs avec enregistrement de paramètres ou sondages au pénétromètre dynamique ou statique, avec prélèvements d'échantillons remaniés pour essais d'identification ;
- cavités souterraines : sondages destructifs avec enregistrement de paramètres et diagraphies RAN ;
- stabilité de pente : sondages répartis dans le sens de la pente avec prélèvements d'échantillons non remaniés pour essais de cisaillement.

Dans tous les cas la connaissance des fondations de l'ouvrage concerné est nécessaire, ce qui implique pratiquement toujours des investigations appropriées. Pour ce qui est de l'implantation des sondages, si les zones suspectes doivent être impérativement privilégiées, les zones réputées saines ne doivent pas être écartées, aux fins d'étalonnage.

Si le recours à une solution de confortement est à prévoir, il convient de se donner les moyens d'un éventuel prédimensionnement. La réalisation par exemple d'un (ou plusieurs) sondage(s) pressiométrique(s) suffisamment profond(s) permet de répondre à ce besoin.

Quelques exemples caractéristiques

Gonflement ou retrait?

Présentation

- **Ouvrage**: il s'agit d'une maison de retraite construite en 1990, c'est à dire durant une période de sécheresse exceptionnelle; l'ouvrage est composé d'un ensemble de plusieurs bâtiments R+1 accolés, en forme de U. Le niveau bas des bâtiments est conçu, pour certains, en plancher sur vide sanitaire et, pour d'autres, en dallages sur terre plein. Les murs porteurs, en parpaings, sont constitués par les refends perpendiculaires aux façades, ces dernières n'étant que des murs de remplissage. Les murs porteurs sont fondés sur des semelles continues ancrées dans des argiles.
- **Contexte**: l'ouvrage est localisé dans l'ouest de la région parisienne. Le site présente une légère pente naturelle d'environ 3%, en bordure de plateau. Les abords sont occupés par des espaces verts, à l'exception de l'accès au bâtiment central, en enrobé. Les sols d'assise sont constitués par les Argiles à Meulières de Montmorency, altération du Calcaire d'Etampes.

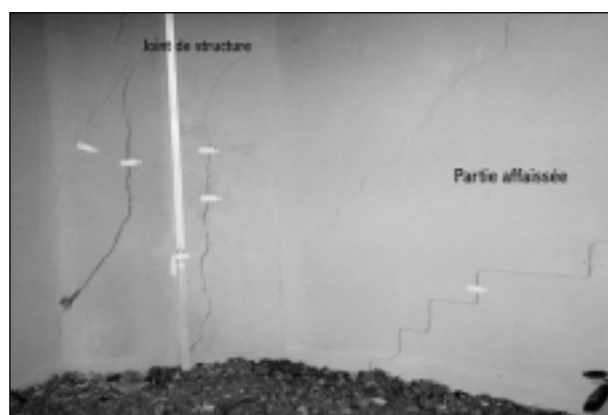


Figure 1: Fissures au voisinage du joint de structure qui s'est avéré insuffisant en regard du tassement différentiel.

- **Désordres**: ils sont apparus en 1995 et affectent principalement le bâtiment central, à sa jonction avec les bâtiments contigus. Ils se traduisent par un déplacement au droit des joints de structure et des fissures de cisaillement dans les maçonneries des façades. Plusieurs années après l'apparition des désordres les mouvements étaient toujours évolutifs et atteignaient une amplitude de 3 cm. L'étude a été réalisée dans le cadre d'une expertise Dommage-Ouvrage.

Etude

- **Observations**: l'analyse des désordres a montré un mouvement vertical relatif entre le bâtiment central et ses voisins, sans pouvoir statuer sur la nature exacte du déplacement. La visite d'un vide sanitaire a permis de constater que les semelles de fondation n'avaient pas été coulées pleine fouille sur toute leur hauteur, le volume restant étant laissé vide (comblé par le remblai support des dallages, le cas échéant); ces zones sont apparues relativement humides. De nombreuses fuites ont été détectées sur les réseaux, au droit de leur pénétration à l'intérieur de l'ouvrage. Il est également apparu que l'aménagement des abords de l'entrée du bâtiment central favorisait les venues d'eau en direction de l'ouvrage, les eaux pouvant pénétrer à l'intérieur de ce dernier, en l'absence de soubassement entre les refends.
- **Investigations**: elles ont principalement porté sur des sondages de reconnaissance effectués à l'intérieur de l'ouvrage, depuis le vide sanitaire ou à travers les dallages; sur les échantillons recueillis, il a été réalisé un grand nombre de teneurs en eau ainsi que des essais de dessiccation et de gonflement. Les mesures de teneur en eau ont confirmé que les zones les plus humides se situaient sous le bâtiment central. Le caractère particulièrement gonflant des sols, lorsqu'ils sont desséchés, a été également mis en évidence.

Conclusions

- **Origine du sinistre**: lors de la construction de l'ouvrage, les sols étaient particulièrement desséchés et dans un état de succion élevée. Les tranchées de fondation du bâtiment central ont joué le rôle de drains vis à vis des eaux de ruissellement venant de l'amont (les fuites de réseau ont été la conséquence et non la cause des mouvements); les argiles ont gonflé et soulevé la structure, la pression de gonflement étant supérieure à la contrainte transmise au sol par l'ouvrage. Le bâtiment principal, peu rigide dans le sens longitudinal, a été affecté par une fissuration importante, la structure ne pouvant pas encaisser les tassements différentiels.

- **Traitement** : la solution préconisée, outre les réparations de la structure, a consisté uniquement à supprimer le facteur à l'origine du sinistre, c'est à dire les venues d'eau ; pour ce faire, il a été prévu la réalisation d'une tranchée drainante à l'amont de l'ouvrage et une imperméabilisation des sols.

L'œuf ou la poule

Présentation

- **Ouvrage** : il s'agit d'une maison d'habitation ancienne du type R+combles aménagées, située en site urbain, en limite de voirie. Le niveau bas du bâtiment est conçu en dallage sur terre plein et il n'existe pas, sous l'ouvrage, de cave connue. Les murs porteurs en maçonnerie de moellons sont fondés sur des semelles continues.
- **Contexte** : l'ouvrage est localisé dans le sud de la région parisienne, en centre ville d'une cité ancienne. La rue présente une légère pente longitudinale d'environ 5 %. Divers réseaux sont présents à proximité de l'ouvrage : canalisation AEP sous trottoir et réseau d'assainissement sous chaussée. Les abords, cour de l'habitation et voirie, sont revêtus. Les sols d'assise sont constitués par les sables de Fontainebleau.
- **Désordres** : ils sont apparus soudainement sous la forme d'un fontis de plusieurs mètres de diamètre situé à cheval sur le trottoir et l'habitation. Bien que les désordres sur la structure aient été modérés, en regard de l'ampleur de l'effondrement, le bâtiment a été évacué et étayé. Au cœur de l'effondrement, la canalisation AEP était rompue. La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une expertise judiciaire.

Etude

- **Observations** : l'examen des lieux ne permettait pas de statuer a priori sur la nature exacte du phénomène à l'origine du fontis. La nature sableuse des sols, visible au cœur de l'effondrement, conjuguée à la rupture de la canalisation AEP permettait de formuler une première hypothèse : entraînement de fines suite à un envoi d'eau important dans les sols. Cependant l'ampleur du cône d'effondrement impliquait nécessairement le comblement d'un vide en profondeur. L'examen de plans anciens a montré que la construction est implantée au droit des remparts de la ville médiévale, le soubassement d'un mur perpendiculaire à la rue étant d'ailleurs visiblement constitué par l'ancienne muraille. Certains terrains avoisinants, en arrière du rempart présumé, étant à une altitude plus basse que celle de la rue, on peut estimer que l'ensemble du site a été remblayé lors de la



Figure 2 : l'effondrement a nécessité un sérieux étaiement de l'ouvrage.

destruction des fortifications. La présence d'une cavité en profondeur étant probable, il convenait de vérifier si c'est son effondrement qui a entraîné la rupture de la canalisation ou bien l'inverse. Le réseau d'assainissement pouvait également être mis en cause. Il convenait d'apporter, sur ce point, des éléments de réponse à l'expert qui devait déterminer les responsabilités des parties en présence.

- **Investigations** : elles ont consisté en des sondages destructifs avec enregistrement de paramètres, implantés autour du fontis, certains étant inclinés pour reconnaître les sols situés sous l'ouvrage. Des sondages pressiométriques ont permis d'apprécier les caractéristiques mécaniques des sols. Outre qu'ils ont montré l'extension des sols déstructurés affectés par l'effondrement, les sondages ont mis en évidence la présence d'une cavité s'étendant à la fois sous l'habitation et sous le domaine public. Il s'agit d'un substruction de 2 m de hauteur environ, située au sein des sables, quelques mètres sous le niveau du sol ancien, obligatoirement maçonnée et vraisemblablement en relation avec l'ancienne enceinte. Pour ce qui était de la mise en cause de la canalisation AEP, l'existence d'autres accidents sur cet ouvrage dans la même rue jouait beaucoup en sa défaveur.

Conclusions

- **Origine du sinistre** : on peut donc penser qu'une fuite sur le réseau AEP, fût elle faible, a provoqué la dégradation de la cavité située à son aplomb, puis son éboulement. La canalisation s'est alors rompue, entraînant l'effondrement en masse.
- **Traitement** : la solution préconisée a été un comblement gravitaire des vides résiduels accompagné d'injections de traitement des sols déstructurés. Pour le

bâtiment d'habitation, la garantie de sa stabilité nécessitait une reprise en sous-œuvre par micropieux.

Un vice pas si caché que ça

Présentation

- **Ouvrage** : il s'agit d'une maison d'habitation traditionnelle du type R+1, construite vers 1985. Le niveau bas du bâtiment est conçu en dallage sur terre plein. Les murs porteurs, en parpaings, ainsi que les refends transversaux, sont fondés sur des semelles continues ancrées dans des argiles à meulière, d'après les recommandations du rapport de sol établi préalablement à la construction.
- **Contexte** : l'ouvrage est localisé dans le sud-ouest de la région parisienne. Le terrain est rigoureusement plat, situé sur un plateau. Les abords sont occupés par des pelouses, avec de nombreux arbres, à distance respectable de l'ouvrage. Les sols d'assise sont constitués par les Argiles à Meulière de Montmorency, altération du Calcaire d'Etampes. Si une étude de sol avait été réalisée, c'était principalement pour délimiter une ancienne exploitation de meulière, connue mais plus visible parce que remblayée ; les investigations avaient permis de cerner les contours de cette exploitation.
- **Désordres** : ils sont apparus vers 1991, c'est à dire durant la première période de sécheresse importante, et affectaient uniquement la partie avant de la construction, le reste étant épargné. Ils se sont traduits principalement par des fissures de cisaillement affectant les maçonneries des murs périphériques. Dans cette zone avant, le dallage était marqué par un affaissement, en rive des murs extérieurs. La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une expertise d'indemnisation des catastrophes naturelles.

Etude

- **Observations** : l'analyse des désordres a montré un mouvement d'affaissement de la partie avant de la construction, l'arrière de l'ouvrage n'étant pas affecté. Si la mise en cause de la sécheresse paraissait *a priori* acceptable, par contre, rien ne permettait d'expliquer la localisation des désordres.
- **Investigations** : il a été réalisé, au pourtour de l'ouvrage, des sondages de reconnaissance semi-destructifs à la tarière continue, complétés par une reconnaissance des fondations en deux points, dans la zone sinistrée et dans celle présumée saine. De nombreux échantillons ont été recueillis, sur lesquels ont été réalisées un grand nombre de teneurs en eau ainsi que des essais de des-

siccation et de gonflement. Les fondations sont apparues homogènes, de qualité acceptable et effectivement ancrées dans les argiles à meulière. Par contre les mesures de teneur en eau montraient une beaucoup plus grande humidité des argiles à meulière dans la partie sinistrée (10 % de différence environ), alors que logiquement, si l'hypothèse de la sécheresse était la bonne, ils auraient dû être plus secs. En fait, comme l'ont confirmé les essais pressiométriques réalisés, les argiles à meulière situées sur l'avant de la construction sont en fait des remblais. Il convient de signaler que, visuellement, sur des échantillons remaniés, la différence avec les sols en place n'est pas évidente.

Conclusions

- **Origine du sinistre** : lors de la construction de l'ouvrage, la matérialisation de l'ancienne exploitation remblayée n'a pas été faite correctement et le bâtiment a été implanté à cheval sur cette dernière. Bien que les remblais ne soient pas consolidés, les charges transmises par l'ouvrage n'ont pas été suffisantes pour entraîner rapidement des tassements différentiels préjudiciables à la structure. Par contre, les remblais étaient initialement très humides et leur diminution de teneur en eau due à la sécheresse a été beaucoup plus importante que celle des sols en place. Les tassements différentiels ont été alors trop importants et les désordres sont apparus.
- **Traitement** : en matière d'indemnisation de catastrophe naturelle, les remèdes proposés doivent mettre un terme à l'évolution des désordres et non pas réparer des erreurs anciennes (la garantie décennale était forclosée) ; les désordres n'étant plus évolutifs, la solution préconisée, outre les réparations de la structure, a donc consisté à prendre des dispositions permettant d'améliorer l'équilibre hydrique des sols sous l'ouvrage (protection périmétrique) et suppression des végétaux importants. Par contre, il a été suggéré au maître d'ouvrage de faire réaliser des travaux de reprise en sous-œuvre afin d'homogénéiser l'assise des fondations (micropieux avec longrines de répartition).

Conclusion

Dans les études géotechniques réalisées pour les projets de construction, il est fréquent de constater que l'approche "géologique" du contexte du projet a été insuffisamment utilisée dans l'établissement de la synthèse préalable à tout calcul, ce qui peut remettre en cause la validité des solutions préconisées. En matière d'études pathologiques, l'observation et l'expérience prennent

encore plus d'importance, car la tâche préliminaire, et essentielle, consiste à interpréter les informations disponibles et émettre des hypothèses qu'il conviendra ensuite de confirmer ou de réfuter. Le sens de l'observation inhérent à la culture du géologue est donc un sérieux atout pour aborder ce type d'études où l'intuition est sou-

vent plus importante que les calculs théoriques. Il ne faut toutefois pas oublier que l'ouvrage, et plus exactement sa structure, est un facteur déterminant dans la manifestation des désordres et qu'un minimum de formation dans ce domaine est indispensable pour mener à bien ces études.