

186^e TABLE RONDE NATIONALE TECHNIQUE ET JURIDIQUE

SOUS-SOLS

Problèmes, conséquences & solutions

Vendredi 20 juin 2025

Société des architectes français

247 rue Saint-Jacques — 75005 Paris

Intervenants (de gauche à droite) :



- **Patrice Arnault**, ingénieur géologue (spécialités hydrogéologie & géotechnique), expert près la Cour d'appel d'Angers
- **Nicolas Bual**, architecte CNEAF, expert près les Cours administratives d'appel de Paris & Versailles
- **Romain Guinard**, ingénieur IGC Vincennes et dirigeant de l'entreprise EIBTF (spécialisée reprises en sous-œuvre)
- **Jérôme Mazenc**, ingénieur, entreprise EITBF
- **Anne-Sophie Puybaret**, avocate au barreau de Versailles

Sommaire :

Les sinistres liés au sous-sol: les appréhender et les traiter 4

Patrice ARNAULT	4
Géographie du vide et mécaniques de dégradation des sols.....	4
↳ Mines, carrières et oubli : le poids de l'héritage humain.....	4
↳ La spécificité des carrières de tuffeau en Val de Loire	4
↳ L'eau, catalyseur des désastres : mécanismes physiques et dégradation structurelle	5
↳ Méthodologies de diagnostic et stratégies de traitement	6
Le fléau du retrait-gonflement des argiles et le défi climatique.....	7
↳ Un risque majeur au coût explosif.....	7
↳ L'impact du changement climatique et les mécanismes de sinistralité	7
↳ Les facteurs aggravants liés à l'environnement et au bâti	7
↳ De la prévention à la réparation : les solutions techniques	8
Échanges avec la salle.....	8

Risques géologiques, méthodes de diagnostic et solutions techniques.....12

Romain GUINARD	12
Jérôme MAZENC	12
Analyse des risques géologiques et diagnostics préalables.....	12
↳ Identifier les facteurs de sinistralité et les problématiques de sol.....	12
↳ Les techniques de reprise superficielle (RSO) et semi-profonde disponibles	12
.....	13
Micropieux et fondations profondes.....	13
↳ Définition et domaines d'application.....	13
↳ Classification et principes d'exécution des micropieux	13
↳ La mécanique de la résistance externe et le dimensionnement.....	14
↳ Spécifications des composants et matériaux	14
↳ Protocoles de contrôle et moyens techniques	14
Le traitement des cavités et les réglementations spécifiques	15
↳ Typologie des carrières souterraines.....	15
↳ Le cadre réglementaire de l'Inspection Générale des Carrières	15
↳ Méthodologie des travaux d'injection	15
↳ Une alternative technique : l'injection de résine expansive	15
Échanges avec la salle.....	16

Instabilité des sous-sols : quelques retours d'expérience19

Nicolas BUAL	19
Défaillances des reprises en sous-œuvre.....	19
↳ La vulnérabilité du bâti ancien	19
↳ Les pathologies liées aux malfaçons de mise en œuvre des RSO.....	19
Phénomènes géoclimatiques et gestion des cavités souterraines	20
↳ L'instabilité des terrains et la formation de fontis	20
↳ La dynamique du retrait-gonflement des argiles.....	20
Les effondrements de terrains	21
↳ L'importance du butonnage à proximité d'avoisinants.....	21
↳ Des effondrements liés aux défauts de drainage et à la végétation	21
↳ La sinistralité induite par les réseaux enterrés	21
↳ Vigilance opérationnelle et méthodes d'investigation	22
Echanges avec la salle.....	22

Les juges, le droit et les mystères du tréfond24

Anne-Sophie PUYBARET	24
Souveraineté foncière et limites du domaine souterrain.....	24
↳ Un droit de propriété qui s'étend jusqu'au noyau terrestre	24
↳ Minéraux et vestiges : quand l'intérêt général dépossède le propriétaire	24
Servitudes et empiètements : le casse-tête des réseaux et des ancrages	25
↳ Détecter l'invisible : l'art d'identifier les servitudes de tréfonds	25
↳ Du droit sacré à la proportionnalité : les sanctions impitoyables de l'empiètement	25
↳ Obligations d'entretien et causes d'extinction des droits.....	25
L'architecte au défi du tréfonds : sinistres, copropriété et devoir de conseil	26
↳ La pelleteuse de l'imprudence : chronique d'un terrassement sauvage à Bougival	26
↳ Le drame de Châtillon : quand le ciel de carrière condamne une copropriété.....	26
↳ Creuser pour gagner de l'espace : le périlleux détournement des parties communes	26
↳ Vérité technique et intime conviction : l'arbitrage du juge face à l'expert.....	27

Sigles.....28

Accueil



Nicolas BUAL

Architecte expert, membre du CNEAF

Le thème de cette 186^e table ronde nationale technique et juridique, axée sur les problèmes, conséquences et solutions relatifs aux sous-sols, est directement inspiré par une expérience significative en tant qu'expert de justice : sur une centaine d'expertises en péril réalisées depuis 2018, environ un quart a concerné des désordres en sous-sols avec des caractères de gravité variables mais qui, pour beaucoup, résultaient de négligences humaines.

On peut ainsi se faire une idée assez inquiétante de la dangerosité de ces désordres liés aux sous-sols en étudiant quelques précédents marquants : un escalier d'accès à une gare, en pierre et large de quatre mètres, s'effondrant subitement sur dix mètres de profondeur. Un autre cas avait fortement marqué les Parisiens en 2003 ou 2004, avec l'effondrement en pleine nuit d'une cour d'école maternelle dans le XIII^e arrondissement, formant un trou de 400 m².

Si des phénomènes naturels tels que les fontis (trous coniques qui ont peut-être inspiré la structure de l'Enfer décrite dans *La Divine Comédie* de Dante Alighieri) ou le Retrait-gonflement des argiles (RGA) figurent parmi les causes possibles, ils restent relativement rares en expertise. Dans la majorité des cas recensés (au moins 90 %), les désordres proviennent d'une négligence humaine, souvent liée à des fuites de réseaux enterrés non traitées, parfois pendant trente ans.

Cette négligence est fréquemment observée, à l'instar de ce trou de 50 centimètres de diamètre par 50 centimètres de profondeur constaté sur une rue passante parisienne, marqué uniquement par une bombe de peinture, sans aucun barriérage ni plot. Trou qui révélait une cavité probablement beaucoup plus étendue et profonde sous l'enrobé déjà fissuré, ce qui évoque un risque imminent d'effondrement, certainement lié à une fuite de réseaux d'eau enterrés.

Bien que les données chiffrées sur ces effondrements variés soient limitées, la sinistralité liée au RGA est quant à elle bien documentée. Depuis 1982, 34666 communes ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour divers aléas, dont le RGA. En 2022, plus de 6800 communes, soit environ une sur cinq en France, ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour des dommages liés au RGA. Certaines régions ont été particulièrement impactées cette année-là, comme la Moselle (292 communes), la Gironde (235 communes) et le Gers (233 communes). Ces phénomènes devraient s'intensifier avec l'évolution climatique actuelle, marquée par des fortes pluies suivies de l'assèchement des sols.

La table ronde abordera donc les différents types de sinistres au-delà du RGA. **Patrice Arnault**, ingénieur géologue, dressera un panorama des divers types de sinistres liés aux sous-sols, et détaillera leurs causes et la marche à suivre pour leur traitement. **Romain Guinard** et **Jérôme Mazenc**, de l'entreprise EIBTF spécialisée en Reprises en sous-œuvre (RSO), présenteront ensuite l'état des traitements curatifs selon les cas rencontrés. Enfin, une présentation par **Nicolas Bual** de cas concrets rencontrés en expertise sera suivie d'une mise en perspective juridique par **Maître Anne-Sophie Puybaret**.

Les sinistres liés au sous-sol : les appréhender et les traiter



Patrice ARNAULT

Ingénieur géologue (spécialités hydrogéologie & géotechnique), expert près la Cour d'appel d'Angers

L'instabilité du sous-sol, qu'elle résulte de cavités anthropiques ou de phénomènes géoclimatiques comme le retrait-gonflement des argiles, constitue un risque majeur pour l'intégrité des structures bâties. Examiner les mécanismes physiques de dégradation des cavités souterraines et du phénomène de retrait-gonflement des argiles conduit à détailler les méthodes de reconnaissance géotechnique, les facteurs de sinistralité et les solutions de confortement structurel adaptées.

Géographie du vide et mécaniques de dégradation des sols

→ Mines, carrières et oubli : le poids de l'héritage humain

Le territoire national présente une grande diversité de cavités souterraines, dont l'origine est majoritairement anthropique. Les cavités naturelles, bien que présentes dans les massifs calcaires du sud de la France ou les Causses, restent minoritaires en milieu urbanisé, ce qui limite globalement le risque pour les personnes et les biens dans ces zones. À l'inverse, les anciennes exploitations minières de fer, de charbon, de sel ou de potasse, principalement localisées dans le Nord et l'Est, engendrent des zones sinistrées importantes. Des risques plus localisés concernent les ouvrages défensifs, tels que les souterrains-refuges très anciens — plus de 1000 ans ! — fréquents dans l'Ouest (Maine-et-Loire), créés lors des invasions normandes, qui s'affaissent régulièrement en raison de leur profondeur et de leur ancienneté.

Les carrières de pierre constituent la menace la plus sérieuse en raison de leurs larges emprises sous des secteurs urbains denses, notamment à Paris, où l'exploitation souterraine permettait historiquement de conserver l'agriculture en surface. Enfin, les marnières et les carrières de gypse, spécifiques à la Normandie, au Nord et à l'Île-de-France, s'avèrent particulièrement insidieuses lorsqu'elles ont été remblayées sans précaution à la fin de leur exploitation. Leur présence est souvent découverte lors d'effondrements soudains. La région parisienne fait l'objet d'un suivi spécifique par l'Inspection générale des carrières (IGC), institution créée en 1777 suite à des effondrements majeurs tels celui survenu dans la rue d'Enfer (*devenue l'avenue Denfert-Rochereau*).

→ La spécificité des carrières de tuffeau en Val de Loire

La région du Val de Loire se distingue par l'exploitation intensive du tuffeau, une calcarénite composée de grains siliceux, de restes d'organismes marins calcaires et de fines. Vieille de 90 millions d'années, cette roche sédimentaire comprimée est issue d'anciennes boues marines. Elle présente des propriétés architecturales intéressantes par sa facilité de taille (roche sciable) et son caractère isotherme, mais demeure sensible à l'eau en raison de sa porosité. L'exploitation massive entre le XI^e et le XX^e siècle, avec un pic entre le XVII^e et le XIX^e siècle, a laissé un héritage de 15 000 caves dans le Saumurois et autant en Touraine.

Ces cavités ont connu une forte réutilisation comme habitats troglodytiques, fermes, champignonnières ou caves viticoles. Tant que ces lieux étaient habités ou exploités



Figure 1 – Effondrement du sous-sol près d'une maison à Brézé

commerciallement, ils bénéficiaient d'un entretien régulier ainsi que d'un renforcement des parois.

Cependant, la déprise observée à la fin du XX^e siècle a entraîné un abandon de cet entretien, ce qui a entraîné une dégradation rapide de la roche sous l'action des infiltrations d'eau. On constate aujourd'hui une forte augmentation des sinistres liés à ce phénomène, tel ce fontis apparu subitement près d'une maison, entraînant son évacuation (*fig. 1*).

Ces sinistres, qui touchent souvent des caves mal remblayées, parfois associés à des fuites du réseau, sont généralement liés à l'humidité.

➔ L'eau, catalyseur des désastres : mécanismes physiques et dégradation structurelle

L'effondrement d'une cavité résulte d'un processus de rééquilibrage de la voûte qui remonte vers la surface par étapes successives, créant un phénomène de fontis (*fig.2*). La dégradation des niveaux tendres sous l'action de l'eau mène à la rupture finale du toit de la cavité. La géologie joue un rôle prépondérant, notamment à travers le taux de défruitement¹. Dans certaines carrières, ce taux atteint 80 %, ce qui implique que seuls 20 % de la roche initiale subsistent sous forme de piliers pour supporter l'intégralité de la charge du recouvrement. Un foudroyage se produit lorsque plusieurs piliers cèdent simultanément sous l'excès de contrainte, provoquant un effondrement radical en surface.

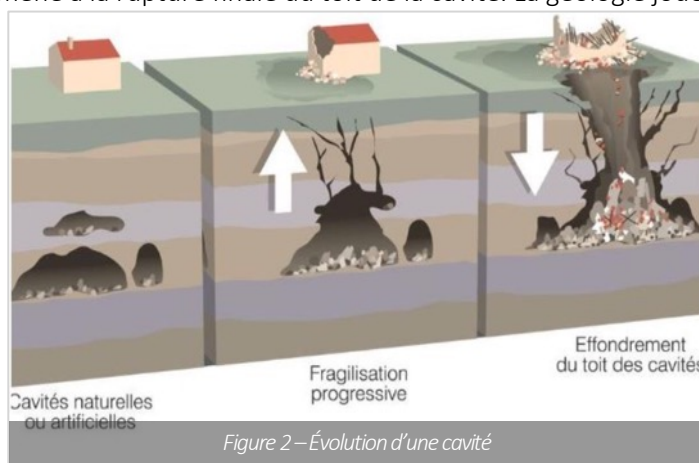


Figure 2 – Évolution d'une cavité

L'eau constitue le principal catalyseur des sinistres. Elle augmente la masse volumique des roches poreuses et diminue leur résistance mécanique par thixotropie, phénomène par lequel la capacité porteuse de la roche chute drastiquement selon son taux d'humidité. Si les facteurs aggravants découlent principalement d'une mauvaise évacuation des eaux de pluie, de fuites (réseaux, piscines) et de l'accumulation d'humidité provoquée par des fossés ou des tranchées mal entretenus, la disparition des fossés traditionnels au profit de pratiques agricoles intensives a accentué les infiltrations directes vers les fronts de coteaux. En outre, la végétation, dont les racines s'insinuent dans les fractures de la voûte, ainsi que les surcharges liées au bâti ou à la circulation d'engins lourds, précipitent les ruptures. Enfin, le confinement des caves fermées, en empêchant l'évacuation de l'humidité, constitue également un facteur de dégradation accélérée de la pierre.

¹ Défruitement : proportion de roche extraite lors de l'exploitation d'une carrière. Un taux élevé correspondant à une faible quantité de roche laissée en place pour assurer le soutènement.

➔ Méthodologies de diagnostic et stratégies de traitement

La gestion du risque repose sur une reconnaissance précise des vides. **La visite directe avec levé géométrique reste la méthode la plus fiable : elle permet d'établir un diagnostic de stabilité pilier par pilier tout en reportant la position exacte des cavités par rapport à la surface.** L'usage de nouvelles technologies, comme le scan laser 3D, autorise désormais des relevés rapides et exhaustifs de la géométrie interne.

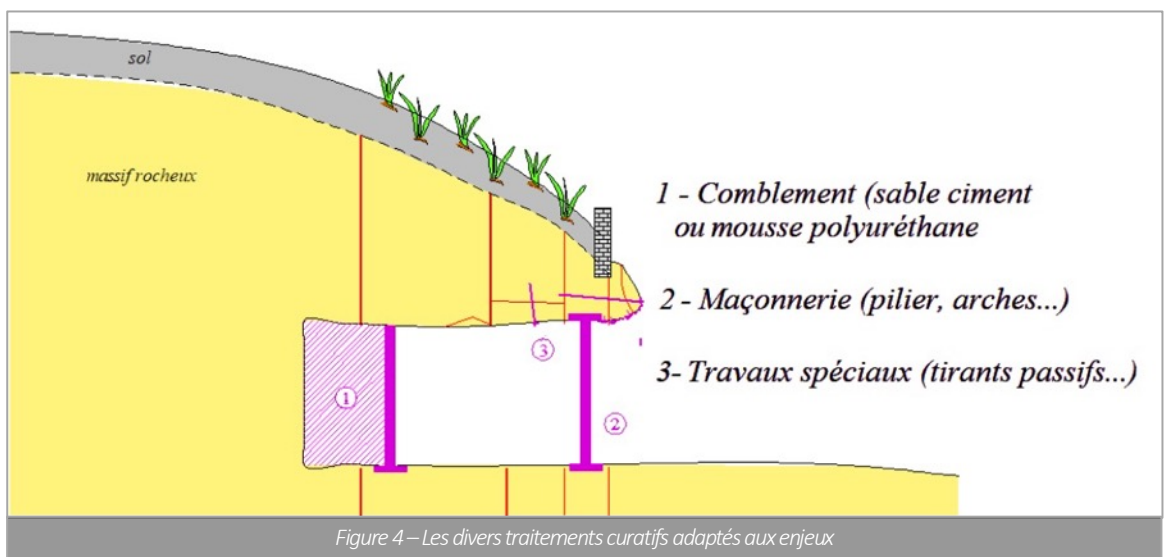
À défaut d'accès physique, on procède à des campagnes de sondages, en dépit d'un risque d'omission si le forage traverse un pilier plutôt qu'un vide ou s'il est de profondeur insuffisante. La microgravimétrie, qui mesure les variations infimes de gravité liées aux différences de densité du sous-sol, reste onéreuse et nécessite un calage systématique par forages pour être concluante. Enfin, la photo-interprétation, utilisée notamment pour les marnières, facilite des interventions sur de larges zones, mais s'avère assez fastidieuse.

La région parisienne est particulièrement concernée par la présence de cavités souterraines issues d'anciennes carrières, notamment de gypse, et par des effondrements parfois importants.

Un recensement ancien des cavités a été constitué, imparfait mais relativement complet pour l'ensemble du territoire parisien, la gestion relevant depuis 1868 de la Ville de Paris. Une fois les cavités identifiées, l'expertise consiste à en examiner l'état interne afin d'évaluer leur évolution et leur stabilité, en analysant notamment les fissures, les fractures et la capacité portante des piliers, afin de repérer les zones fragiles et de définir les mesures de contrôle appropriées.

Le traitement préventif s'organise autour des Plans de prévention des risques (PPR), mis en place suite à des sinistres majeurs comme celui de Marmoutier en 1985 ou du coteau d'Avron en 1974. Ces plans délimitent des zones en fonction de la force de l'aléa.

À Saumur, un *modus vivendi* autorise l'aménagement des habitations sous réserve d'un confortement préalable des coteaux et des caves par le propriétaire. Le traitement curatif s'adapte aux enjeux : le comblement par sable siliceux, coulis de béton ou mousse polyuréthane est utilisé pour les zones sans intérêt patrimonial, tandis que le confortement structurel privilégie les piliers maçonnés, les arches ou les techniques de travaux spéciaux comme les tirants d'ancrage passifs traversant le massif rocheux (fig.4).



Le fléau du retrait-gonflement des argiles et le défi climatique

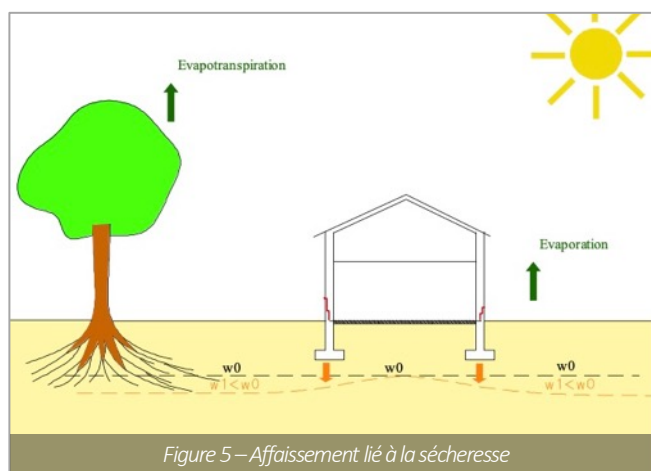
→ Un risque majeur au coût explosif

Le retrait-gonflement des argiles constitue le deuxième poste d'indemnisation en France après les inondations, avec un coût croissant atteignant 3,5 milliards d'euros en 2022 contre 1,9 milliard en 2003. Ce phénomène physique concerne les sols constitués de phyllosilicates, dont la structure en feuillets autorise l'absorption d'eau. La sensibilité du sol dépend de la nature minéralogique de l'argile : alors que les kaolinites sont stables, les smectites et les montmorillonites possèdent une distance entre feuillets variant de 14 à 17 angströms selon le taux d'hydratation, ce qui provoque des variations de volume macroscopiques. Les marnes sont également sujettes à ces mouvements lorsque leur fraction argileuse est composée de smectites.

Les massifs anciens (Bretagne, Massif central) sont globalement épargnés, contrairement aux bassins sédimentaires (Bassin parisien, Aquitaine). Le nombre de communes impactées est en forte hausse, passant de 5027 entre 1989 et 2002 à 14284 pour la période 2016-2022, avec un coût annuel moyen multiplié par trois.

→ L'impact du changement climatique et les mécanismes de sinistralité

Le réchauffement climatique intensifie le risque, avec une augmentation prévisible des sinistres de 20 à 35 % d'ici 2050. Les épisodes de sécheresse longue et violente, comme celui de 2022, impactent désormais des bâtiments autrefois considérés comme bien fondés. Le mécanisme de sinistralité repose sur une dessiccation différentielle du sol. En période de sécheresse, la teneur en eau diminue en périphérie du bâtiment exposée à l'évaporation et à l'évapotranspiration, alors qu'elle reste constante sous



l'emprise de l'ouvrage (fig.5). Ce gradient hydrique provoque un tassement périphérique et un basculement des fondations, lesquels génèrent des tensions insurmontables pour la structure.

Les désordres se manifestent alors par des fissurations structurelles caractéristiques, souvent localisées aux angles des ouvertures ou aux jonctions entre corps de bâtiments d'âges ou de conceptions hétérogènes. La rigidité des constructions modernes en parpaings les rend plus vulnérables aux tensions que les bâtisses anciennes en moellons, dont la souplesse relative et l'épaisseur des murs permettaient d'absorber certains mouvements modérés.

→ Les facteurs aggravants liés à l'environnement et au bâti

Le phénomène RGA est aggravé par la nature et la sensibilité des argiles, ainsi que par l'épaisseur de la couche argileuse active, dont l'importance accroît l'amplitude des mouvements. Les conditions climatiques, en particulier les sécheresses intenses, prolongées ou répétées, jouent un rôle déterminant, leur fréquence étant renforcée par le changement climatique.

La vulnérabilité de l'ouvrage constitue un facteur majeur : fondations insuffisamment profondes ou hétérogènes, ancienneté du bâti, différences de fondation entre parties d'un même bâtiment ou avec des ouvrages annexes favorisent les tassements différentiels et les fissurations.

Enfin, des facteurs locaux aggravent le phénomène, notamment les fuites d'eau (eau potable, eaux pluviales, eaux usées) et la présence de végétation trop proche des constructions, qui accentuent les variations hydriques du sol.

Tout diagnostic de sinistre RGA nécessite une phase d'investigation rigoureuse passant par des reconnaissances de fondations (puits manuels ou mécaniques) pour vérifier leur profondeur d'assise et la nature du sol de contact. Des sondages pressiométriques *in situ* mesurent la résistance (pression limite) et la déformabilité (module élastique) du sol à différentes profondeurs afin de dimensionner d'éventuels renforcements.

Les analyses en laboratoire quantifient la sensibilité des argiles au gonflement. Ces mesures sont indispensables pour comprendre pourquoi des fondations de 70 ou 80 centimètres, autrefois jugées suffisantes, s'avèrent inadaptées face aux cycles climatiques actuels.

➔ De la prévention à la réparation : les solutions techniques

Dans la construction neuve, la loi ELAN² impose des études géotechniques préalables en zone d'aléa moyen à fort. Les dispositions constructives préventives visent à isoler le sol d'assise des variations hydriques : approfondissement des fondations (minimum 0,80 m en aléa faible et 1,20 m en aléa fort), mise en œuvre de chaînages horizontaux et verticaux, installation de trottoirs étanches ou de géomembranes périphériques d'une largeur supérieure à 1,50 m, et raccordements souples des réseaux pour absorber les mouvements.

La solution curative de référence pour stabiliser un bâtiment sinistré reste la reprise en sous-œuvre par fondations profondes. Le principe consiste à transférer les charges de l'ouvrage vers des horizons de sol stables, situés sous la zone active sujette aux variations de teneur en eau. Alors qu'une profondeur de 1,50 m était historiquement recommandée, les retours d'expérience et les pressions de gonflement préconisent désormais d'atteindre une zone neutre située vers 3 m de profondeur. Le recours aux micropieux, ancrés entre 10 et 12 mètres, est fréquent. Ces éléments travaillent principalement par frottement latéral dans les couches de sol profondes et compactes.

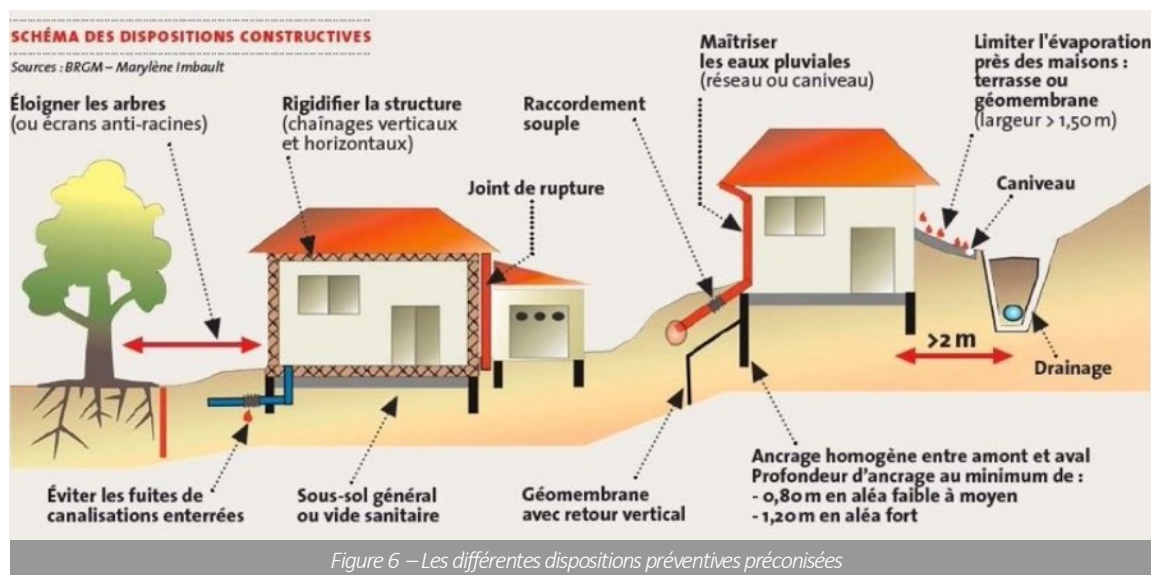


Figure 6 – Les différentes dispositions préventives préconisées

Échanges avec la salle

De Nicolas BUAL

Les cavités naturelles semblent peu présentes en milieu urbain. Quelles en sont les raisons ?

² Loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant Évolution du logement, de l'aménagement et du numérique

Patrice ARNAULT

Les cavités naturelles importantes sont rares en France. Les grandes cavités connues se situent principalement dans des terrains calcaires de type causses, qui sont peu urbanisés. On peut poser comme hypothèse que les villes se sont historiquement développées le long des fleuves, sur des terrains alluvionnaires ou remaniés, moins propices à la formation de cavités naturelles de grande ampleur.

De Nicolas BUAL

En quoi consiste la microgravimétrie ?

Patrice ARNAULT

La microgravimétrie repose sur la mesure de très faibles variations du champ de gravité. La présence de vides dans le sous-sol entraîne localement une diminution de la gravité mesurée. Cette méthode existe depuis longtemps, mais elle est délicate à mettre en œuvre et nécessite une grande précision. Les résultats doivent impérativement être corrélés à des sondages, car ils ne fournissent que des indications indirectes.

De Nicolas BUAL

Qu'entend-on par « foudroyage » dans les carrières ?

Patrice ARNAULT

Le foudroyage correspond à une rupture simultanée de plusieurs piliers, entraînant un effondrement brutal et généralisé de la cavité.

De Nicolas BUAL

Existe-t-il un accord tacite entre propriétaires et collectivités concernant l'entretien des caves et des coteaux ?

Patrice ARNAULT

La mise en place des PPR, notamment dans des secteurs comme Saumur, a suscité de fortes tensions, les fronts de coteaux étant occupés de longue date. À la suite de sinistres importants, un compromis a été trouvé : les propriétaires peuvent aménager ou agrandir, à condition de réaliser des travaux de confortement. Ces projets doivent être accompagnés d'études géologiques démontrant l'absence d'aggravation du risque.

De Nicolas BUAL

Pourquoi le phénomène de RGA n'est-il principalement identifié que depuis la fin des années 1970 ?

Patrice ARNAULT

La sécheresse de 1976 a marqué un tournant. Par ailleurs, les constructions anciennes, souvent en maçonnerie de moellons, présentaient une certaine souplesse. L'essor des constructions en parpaings, plus rigides et cassantes, a accentué la vulnérabilité. À partir de la fin des années 1980, même des bâtiments anciens, y compris des églises, ont été affectés, ce qui a révélé l'ampleur du phénomène.

De Anne-Sophie PUYBARET

Les nouvelles contraintes constructives liées à l'évolution des sols ne risquent-elles pas d'augmenter le coût de la construction, et dans quelles proportions ?

Patrice ARNAULT

Un surcoût est inévitable à la construction, mais il reste très inférieur au coût du traitement curatif. Une reprise en sous-œuvre représente en moyenne environ la moitié du prix d'une maison, alors qu'un surdimensionnement des fondations peut limiter ce surcoût à environ 10 %.

Jérôme MAZENC

Les interventions concernent de plus en plus des pavillons neufs, notamment en raison des études de sol désormais obligatoires. Les micropieux représentent un coût moyen compris entre 30000 et 60000 euros, ce qui peut compromettre certains projets, mais permet d'éviter des réparations ultérieures bien plus coûteuses.

De Huguette VERNAY, architecte experte à Herbeys (Isère)

L'Agence Qualité Construction (AQC) centralise les remontées de sinistres issues des compagnies d'assurance et dispose de données particulièrement précises, notamment sur le retrait-gonflement des argiles.

De Sylvie THIENOT, architecte experte à Paris (13^e)

Les diagrammes de carrières et les failles de fractionnement relevées sont-ils transmis à des organismes nationaux ?

Patrice ARNAULT

Les relevés effectués en terrain privé relèvent de la propriété du maître d'ouvrage. En cas de danger avéré, l'information est transmise au maire conformément à la loi Bachelot, lequel alerte ensuite les autorités compétentes. Dans ce type de situation, l'analyse porte sur les fissures, les fractures, la qualité de la roche, l'humidité et l'état des maçonneries.

De Christine TREBEL, architecte experte à Clamart (Hauts-de-Seine)

Le passage 1,50 m à 3 m de la profondeur des fondations pour éviter le retrait relève-t-il d'une obligation réglementaire sur laquelle les experts pourraient s'appuyer dans leurs conclusions ?

Patrice ARNAULT

Les textes ne fixent pas de seuils stricts. La loi ELAN fournit des orientations. La profondeur dite « neutre » a évolué avec les retours d'expérience : de 1 m à 1,50 m, puis désormais jusqu'à 3 m, selon la technique utilisée et les caractéristiques du sol.

Jérôme MAZENC

Les solutions constructives dépendent du comportement du sol, notamment en présence d'argiles très gonflantes. Les retours d'expérience et l'analyse de sinistres successifs ont montré que des profondeurs autrefois jugées suffisantes ne permettaient pas toujours de s'affranchir des effets du retrait-gonflement et des fortes pressions associées.

Les pratiques ont donc évolué vers des ancrages plus profonds, la profondeur neutre préconisée par un géotechnicien prudent correspondant au niveau à partir duquel le risque lié aux variations hydriques du sol est considéré comme négligeable.

De la salle [intervenant non identifié]

Existe-t-il des alternatives structurelles aux fondations profondes ?

Patrice ARNAULT

Le radier constitue une alternative possible, mais il présente des risques sur sols argileux en raison des variations différentielles de teneur en eau, notamment en périphérie, ce qui peut entraîner un basculement de l'ouvrage. Des solutions hybrides, combinant radier et micropieux localisés, peuvent être envisagées, sous réserve d'une conception adaptée.

Risques géologiques, méthodes de diagnostic et solutions techniques



Romain GUINARD
*Ingénieur géologue, expert près la Cour
d'appel d'Angers, EITBF*



Jérôme MAZENC
Ingénieur, EITBF

L'instabilité du sous-sol, qu'elle résulte de phénomènes climatiques comme la sécheresse ou de l'existence de cavités anthropiques, impose une approche rigoureuse en matière de diagnostic et de réparation structurelle. Il convient à cet égard de connaître les méthodologies de reconnaissance géotechnique, les techniques de reprise en sous-œuvre, ainsi que les protocoles de traitement des carrières et des dissolutions naturelles.

Analyse des risques géologiques et diagnostics préalables

- Identifier les facteurs de sinistralité et les problématiques de sol

Romain GUINARD

L'intégrité des structures bâties est soumise à divers risques d'origine géologique et anthropique. La sécheresse, par le biais du retrait-gonflement des sols argileux, ainsi que les dégâts des eaux entraînant des phénomènes de lessivage ou des fuites de réseaux, constituent des facteurs de sinistralité prédominants. Les cavités souterraines, qu'il s'agisse de carrières exploitées par l'homme ou de poches de dissolution naturelle, créent des vides critiques sous les fondations. Les dissolutions correspondent à la création naturelle de poches de vide résultant de la circulation d'eau dans des horizons géologiques spécifiques; contrairement aux carrières exploitées, ces cavités ne sont pas systématiquement répertoriées, bien que les zones à risque soient identifiées. À ces facteurs s'ajoutent les malfaçons lors de la construction initiale et les désordres provoqués par des travaux sur des parcelles voisines. La création de sous-sols par voiles par passes alternées sur un terrain adjacent est une source de sinistres de plus en plus fréquente pour les bâtiments existants. Toute stratégie de réparation repose sur des études préalables obligatoires visant à identifier un horizon de sol porteur. **La mission géotechnique, de type G2 ou G5, constitue l'étape fondamentale, incluant des sondages pressiométriques pour déterminer la portance et des relevés précis des strates de terrain.** En complément, un diagnostic structurel doit être réalisé par un bureau d'études spécialisé afin de modéliser les descentes de charges et l'état de l'ouvrage. En milieu urbain dense, la vérification de la mitoyenneté est un point critique pour s'assurer que les interventions sur les fondations n'impactent pas les structures voisines ou n'empiètent pas sur des propriétés tierces.

- Les techniques de reprise superficielle (RSO) et semi-profonde disponibles

La RSO superficielle consiste à reporter les charges de l'ouvrage sur un sol d'assise situé à proximité immédiate. Cette technique repose sur la création de longrines en béton armé installées sous les

fondations existantes par passes alternées. Pour des profondeurs d'assise atteignant environ 3 mètres, le recours aux puits blindés est préconisé afin de descendre les charges plus profondément par des voiles en béton.

Jérôme MAZENC

Le choix entre une reprise superficielle par puits et une solution plus profonde par micropieux est principalement dicté par des considérations financières. Le seuil de bascule économique entre ces deux techniques se situe généralement entre 2,50 et 3 mètres de profondeur.

Romain GUINARD

Les puits blindés peuvent être réalisés de manière continue pour former une enceinte ou être espacés et reliés par des longrines (*fig. 7*) pour reporter les charges de puits en puits. La réalisation de longrines en sous-œuvre permet un report d'assise efficace même pour de faibles profondeurs, par exemple 80 cm, si le sol porteur est atteint rapidement.



Figure 7 — Reprises en sous-œuvre par longrines

Micropieux et fondations profondes

➔ Définition et domaines d'application

Jérôme MAZENC

Le micropieu est l'outil polyvalent — le « couteau suisse » — de la reprise en sous-œuvre. Il est défini comme un pieu foré à moins de 300 mm de profondeur. Ses domaines d'application couvrent les fondations (report de charges), les soutènements (murs ancrés pour stabiliser des talus) et le renforcement d'ouvrages existants. La mise en œuvre comprend une phase de forage (par rotation, lançage, vibrage, battage ou fonçage par vérin), l'installation d'une armature et un scellement par injection de coulis de ciment.

➔ Classification et principes d'exécution des micropieux

Les micropieux sont classifiés en quatre types selon leur mode d'exécution. Le type I n'est plus utilisé dans le bâtiment. **Le type II constitue la technique la plus courante et la plus sûre face aux erreurs humaines** : elle consiste en un forage, la pose d'une armature et une injection gravitaire ou à faible pression de coulis. Une variante autoforée avec outil « perdu » est employée dans les sols meubles pour éviter l'effondrement du trou de forage.

Le type III suit la même procédure que le type II complétée par une injection sous pression supérieure à 10 bars via un tube à manchettes installé à côté ou sur l'armature. Cette pression améliore le scellement entre le fût et le terrain. Le type IV, enfin, utilise un tube à manchettes et un double bouchon pour injecter le coulis par paliers de 50 cm jusqu'à atteindre les pressions et volumes recherchés. Cette méthode complexe, principalement réservée aux ouvrages d'art, permet d'optimiser la longueur des pieux en augmentant significativement leur capacité portante.

par frottement latéral. L'avantage du type IV est de pouvoir réduire la profondeur de forage par rapport au type III pour une charge identique.

→ La mécanique de la résistance externe et le dimensionnement

La résistance externe d'un micropieu repose exclusivement sur le frottement latéral entre le sol et le fût. L'effort de pointe est négligé dans le dimensionnement pour les petits diamètres, contrairement aux pieux de gros gabarit où il peut représenter une part importante de la charge. Le dimensionnement s'appuie sur l'étude géotechnique (pressiomètre et pénétromètre statique) et les normes Eurocode 7. Les évolutions normatives récentes ont durci les coefficients de sécurité, augmentant parfois les longueurs de forage de 5 à 7 mètres entre un micropieu de type II et un micropieu de type III pour une même configuration de terrain.

→ Spécifications des composants et matériaux

Le coulis de scellement est composé de ciment et d'eau, dosé à 1200 kg/m^3 ($C/E = 2$)³. L'armature, pour sa part, constitue le corps principal du dispositif, qui se compose soit de barres, soit de tubes épais, soit d'un composite barres + tube. L'utilisation de tubes épais à haute limite élastique est privilégiée par rapport aux barres, simples à mettre en œuvre, mais qui présentent une inertie réduite et une forte sensibilité à la corrosion : une perte de section de quelques millimètres impacte lourdement leur capacité. En revanche, les barres sont adaptées aux efforts de traction pure.



Figure 8 – Plaques d'ancrage sur micropieux à tubes

La liaison entre les éléments d'armature s'effectue par des manchons filetés dont la hauteur dépend de la profondeur du micropieu; la qualité du filetage et du vissage est alors capitale pour assurer la continuité de l'effort structural, particulièrement en milieu exigu où l'assemblage se fait par sections courtes. L'interface avec l'ouvrage est assurée par une platine ou plaque d'ancrage intégrée dans la longrine ou le radier (fig. 8).

→ Protocoles de contrôle et moyens techniques

Les contrôles de portance sont réglementaires : un essai tous les 200 micropieux en compression et tous les 50 en traction, avec un minimum de deux par chantier. L'essai statique dure environ 5 heures pour un contrôle de conformité et 10 heures pour un essai à l'arrachement. L'essai en traction est plus simple, car il s'appuie sur la structure existante (dalle ou fondation) pour faire réaction au vérin. L'essai en compression, pour sa part, implique la mise en œuvre de micropieux de part et d'autre du micropieu testé pour solidariser le châssis du vérin et le terrain. Lors d'une expertise, il est important de récupérer les paramètres de contrôle suivants :

- La profondeur de forage avec enregistrement des paramètres de forage;
- Le positionnement du micropieu
- L'enregistrement des paramètres d'injection (pression et quantité)
- Les essais sur éprouvettes du coulis de scellement (ou mortier)
- Les essais de contrôles sur micropieux (essais de chargement)

³ Une analyse du coulis est systématiquement requise pour s'assurer du respect des normes de mise en œuvre

Le choix du matériel de forage est dicté par l'accessibilité. Les foreuses à mât déporté, démontables, permettent de travailler dans des sous-sols de 1,80 m de haut, mais nécessitent un étayage au plafond pour compenser leur légèreté. Les machines de gabarit moyen (80 cm de large) sont l'outil standard pour les pavillons et immeubles (diamètre max 200 mm). Les foreuses de grand gabarit (10 tonnes) sont réservées aux travaux extérieurs pour des diamètres allant jusqu'à 300 mm.

Le traitement des cavités et les réglementations spécifiques

➔ Typologie des carrières souterraines

Romain GUINARD

Le traitement des cavités souterraines varie selon leur nature géologique. Les carrières de calcaire grossier (Paris, Bagneux, Clamart) présentent des galeries d'environ 1,70 m de haut exploitées par découpage de la roche puis bourrage des cavités créées. Les carrières de gypse sont plus vastes (4 à 5 m de haut) et ont été exploitées par « piliers tournés » avant d'être parfois remblayées par des déblais de construction. Les dissolutions de gypse sont des cavités naturelles non répertoriées créées par la circulation d'eau. **Le risque majeur est le fontis : un effondrement localisé du ciel de carrière qui remonte vers la surface en forme de sablier, en créant des cratères soudains.** Les circulations d'eau aggravent ces risques, ce qui rend dangereux tout apport d'eau lors des sondages de reconnaissance.

➔ Le cadre réglementaire de l'Inspection générale des carrières (IGC)

La réglementation est assurée par l'Inspection générale des Carrières pour Paris et la petite couronne. L'IGC s'appuie sur un atlas précis répertoriant les galeries, les parcelles traitées et les profondeurs de recouvrement. Lors de toute déclaration de travaux, l'IGC émet une « fiche navette » indiquant les risques et imposant des prescriptions de mise en sécurité, de confortement ou de type de fondations. Les travaux doivent respecter trois notices techniques : celle du 15 juillet 2004 pour les piliers maçonnés, celle du 15 janvier 2003 pour les injections de consolidation et celle du 31 janvier 2016 pour les dissolutions de gypse. Trois contrôleurs se déplacent en permanence sur les chantiers pour s'assurer de leur respect en communiquant avec les entreprises par le biais de la fiche navette qui indique les obligations fixées par l'IGC.

➔ Méthodologie des travaux d'injection

La méthodologie d'injection repose sur la réalisation de barrages périphériques (forages resserrés à 2,50 m) pour confiner le matériau injecté dans la parcelle. Le traitement comprend trois phases : le comblement, le clavage qui assure le contact avec le ciel de carrière et le traitement sous pression des remblais ou terrains décomprimés. Une attention particulière doit être portée aux mitoyens (caves, sous-sols) et aux réseaux de voirie. En zone de gypse, la création de murs maçonnés dans la carrière peut être requise pour éviter les déperditions. Un délai de 28 jours de séchage est impératif avant les contrôles géotechniques finaux (mission G5 à la charge du maître d'ouvrage).

➔ Une alternative technique : l'injection de résine expansive

L'injection de résine expansive constitue une alternative moderne pour le renforcement des sols superficiels. Cette technique commence généralement par la création d'une longrine en béton armé équipée de canules d'injection de résine pour consolider et recomacter les sols. Cependant, ses domaines d'application sont restreints : elle nécessite une validation de l'indice de plasticité des matériaux du sol, de l'absence de matières organiques et ne convient pas à proximité de talus, car elle ne reprend pas d'efforts horizontaux. Elle présente l'avantage de ne pas créer de « points durs » vis-à-vis des mitoyens.

Échanges avec la salle

De Philippe RIVOIRARD (architecte expert à Paris (11^e))

Les micropieux fonctionnant par frottement doivent-ils nécessairement être ancrés dans une assise saine ?

Jérôme MAZENC

Le fonctionnement par frottement repose sur le calcul d'une longueur d'ancrage suffisante, déterminée en fonction de la charge à reprendre et de la qualité des terrains traversés. Il n'est pas question d'un simple ancrage ponctuel dans une couche saine, mais d'une mobilisation progressive des efforts le long du fût du micropieu. Les paramètres géotechniques, fournis par l'étude de sol, permettent d'évaluer la portance linéaire du terrain, qui varie fortement selon la nature des sols. Ces données servent ensuite à un calcul relativement simple fondé sur la surface latérale du micropieu et la résistance du sol. L'intervention d'un ingénieur structure est essentielle pour déterminer précisément les charges reprises.

Romain Guinard

Une descente de charges est indispensable et constitue un préalable obligatoire, notamment pour le passage d'une mission géotechnique de type G2 AVP à une G2 PRO.

De Michèle CHAZAL, architecte experte à TASSIN-LA-DEMI-LUNE (Rhône)

Quelles conséquences lorsque, dans une expertise judiciaire, il est constaté que des micropieux ont été posés par vérinage hydraulique sans être bloqués ?

Jérôme MAZENC

Lorsqu'un micropieu rencontre un bloc dur, celui-ci peut bloquer la progression sans garantir que la profondeur requise soit atteinte. En présence d'argiles à meulière ou de blocs siliceux, le seul moyen efficace reste le marteau fond de trou, par destruction. Le blocage sur un élément dur ne signifie pas que le sol situé en dessous est porteur. Avec le temps, l'argile peut fluer, entraînant l'enfoncement progressif du micropieu et la perte des caractéristiques mécaniques initialement supposées acquises.

Romain Guinard

Si un micropieu est bloqué par une pierre, cela ne garantit pas la qualité du sol sous-jacent ni l'atteinte de la profondeur nécessaire pour assurer son efficacité. Le blocage sur un élément dur ne permet donc pas d'assurer la reprise des charges attendue, notamment dans le cas d'argiles susceptibles de fluer et d'entraîner une perte progressive des performances du micropieu.

Jérôme MAZENC

Les déplacements ne proviennent pas du bloc lui-même, mais du comportement différentiel des terrains entre les blocs. L'outil ou la technique utilisée peut se révéler inadaptée à cette hétérogénéité.

De la salle [intervenant non identifié]

Le vérinage est-il réservé à certains types de sols ?

Jérôme MAZENC

Le vérinage des micropieux est adapté aux constructions neuves implantées sur des sols homogènes, notamment en présence de tourbes, et reste cohérent lorsque l'ancrage s'effectue sur un calcaire sain et continu. En revanche, les terrains mous comportant des blocs durs dispersés génèrent des comportements hétérogènes qui rendent cette technique incertaine.

Par ailleurs, se développent des solutions alternatives telles que les pieux ou micropieux vissés dits «canadiens», relevant de cadres normatifs spécifiques et moins contraignants. Ces techniques, principalement destinées aux structures légères sur sols meubles, reposent sur un ancrage par frottement, mais soulèvent des interrogations quant à leur justification technique et à leur compatibilité avec les exigences usuelles de contrôle et de dimensionnement.

De Huguette VERNAY, architecte experte à Herbeys (Isère)

Quelles sont les techniques considérées comme courantes ou non courantes, notamment vis-à-vis des assurances ?

Jérôme MAZENC

Les injections de résine se sont fortement développées, notamment en raison de leur coût, trois à quatre fois inférieur à celui d'une reprise en sous-œuvre par micropieux. Elles ont été présentées comme une solution universelle à la sécheresse. Cependant cette technique s'est révélée inadaptée dans de nombreux contextes, en particulier dans les argiles gonflantes. En revanche, elle est très efficace pour le comblement de vides localisés ou la remise à niveau de dallages.

Romain Guinard

Lorsque l'étude de sol prescrit le recours à une entreprise spécialisée et à un encadrement spécifique, la technique doit être considérée comme non courante.

De Huguette VERNAY, architecte experte à Herbeys (Isère)

Il convient malgré tout de s'assurer que l'assurance prend en charge cette technique au moment où on la préconise en tant que maître d'œuvre.

De Chahrazad TOMA-VAstra, architecte experte à Aulnay sous Bois (Seine-Saint-Denis)

La conservation des éprouvettes et des échantillons est-elle prévue dans le cadre du contrôle qualité prévu par l'Eurocode 7 ?

Jérôme MAZENC

Les éprouvettes ne sont pas conservées. Des essais de résistance sont réalisés à 7, 14 et 28 jours. Si les résultats à 28 jours sont conformes, notamment en termes de résistance mécanique, aucune problématique ultérieure n'est retenue. Les résultats figurent dans le dossier des ouvrages exécutés, mais les échantillons sont détruits.

Romain GUINARD

Cependant les résultats sont consignés dans le Dossier des ouvrages exécutés (DOE), que l'entreprise doit fournir.

Jérôme MAZENC

Le ciment est choisi en fonction des caractéristiques géotechniques et chimiques du terrain, en particulier en présence de milieux agressifs ou sulfatés. Dans ce cas, un ciment de type PEMS, adapté aux eaux agressives, est utilisé afin de garantir la durabilité de l'ouvrage.

De Philippe RIVOIRARD (architecte expert à Paris (11^e))

La résine n'est donc pas recommandée pour le comblement des carrières de gypse ?

Jérôme MAZENC

Certainement pas. Elles ne sont pertinentes que pour de très petits volumes sous dallage, leur coût devenant rapidement élevé. Les prescriptions de l'IGS imposent, pour les carrières, des injections au coulis de ciment.

Romain GUINARD

La dissolution du gypse reste cependant active dans le temps, ce qui impose la réalisation de nouvelles études en cas de mutation de la parcelle afin de vérifier l'évolution du risque.



Instabilité des sous-sols : quelques retours d'expérience



Nicolas BUAL

Architecte expert, membre du CNEAF

L'instabilité du sous-sol, qu'elle résulte de cavités anthropiques, de fuites de réseaux ou du retrait-gonflement des argiles (RGA), menace directement la pérennité structurelle du bâti. Ces retours d'expérience techniques et cas d'expertise détaillent les mécanismes de dégradation, les erreurs de mise en œuvre en Reprise en sous-œuvre (RSO) et les impératifs de diagnostic géotechnique.

Défaillances des reprises en sous-œuvre

→ La vulnérabilité du bâti ancien

La pérennité des structures anciennes, même solidement implantées depuis plusieurs siècles, peut être compromise par l'exploitation du tréfonds. L'exemple du donjon de Mondoubleau, édifié en 1010, illustre cette fragilité : l'exploitation de marnières sous l'ouvrage a provoqué des effondrements partiels majeurs en 1818 et 1873, ruinant une structure qui était restée stable pendant 800 ans. La création de cavités anthropiques sous des fondations existantes rompt l'équilibre des pressions et mène inévitablement à la ruine du bâti de surface.

Dans le cadre de rénovations lourdes, l'ajout de charges verticales sur une structure existante impose une vigilance accrue sur la répartition des efforts : **la création d'un massif de fondations ponctuel, sans prise en compte de l'homogénéité de l'assise, génère un « point dur » structurel.** Ce différentiel de raideur provoque, à terme, des concentrations de contraintes se manifestant par des fissures et des lézardes sur l'ensemble de l'édifice (fig.9).



Figure 9 – Ajout d'un point dur sous une fondation

→ Les pathologies liées aux malfaçons de mise en œuvre des RSO

La décompression des sols, souvent consécutive à des fuites d'eau massives, peut déstabiliser non seulement l'ouvrage sinistré, mais également les bâtiments mitoyens. Un cas d'expertise révèle qu'un mur mitoyen a subi des lézardes traversantes sur trois niveaux, allant du sous-sol aux combles, en raison de la décompression du sol voisin. Les désordres ont atteint une telle

importance que la panne faîtière s'est désolidarisée du mur mitoyen de plus de dix centimètres, menaçant ainsi la stabilité globale de la toiture.

Les tentatives de réparation par RSO font parfois l'objet de malfaçons grossières. L'examen d'un chantier de RSO a mis en évidence des longrines en contre-œuvre (fig.10) : les éléments de béton s'arrêtaient à cinq centimètres du mur qu'ils étaient censés soutenir, sans aucune liaison mécanique. De plus, les armatures de ferrailage n'étaient pas



Figure 10 – Longrine en contre-œuvre sans liaison

liaisonnées entre elles, laissant un vide de cinq centimètres entre les aciers et le béton. L'abandon de chantier après la réalisation de forages incomplets sous les murs de refend et les escaliers (trous

de 1,50 m de diamètre non comblés) a aggravé l'instabilité, multipliant les fractures structurelles. Ces défaillances soulignent la nécessité impérieuse de recourir à des entreprises et des maîtres d'œuvre qualifiés pour la conduite de travaux spéciaux.

Phénomènes géoclimatiques et gestion des cavités souterraines

➔ L'instabilité des terrains et la formation de fontis

Les fontis, ou effondrements localisés, présentent des risques imprévisibles en milieu urbain. À Gennevilliers, la détection d'un fontis de 3,50 m de diamètre sous une voie d'accès a conduit, après étude géotechnique, à la découverte de deux autres cavités de 8 m de diamètre situées entre 20 et 30 m de profondeur. Ces vides, signalés en surface par des orifices de seulement 10 cm, menaçaient directement des habitations.

Les glissements de terrain constituent un autre risque majeur, souvent provoqué par le nivellement de parcelles en forte pente à l'aide de remblais non stabilisés. Sans dispositif de retenue des terres, ces remblais glissent vers l'aval, créant des crevasses de plusieurs mètres de long et de 7 cm de large dans les jardins. Si les maisons fondées sur micropieux au bon sol résistent, les aménagements de surface sont irrémédiablement perdus (fig.11). De même, l'excavation de fouilles importantes (7 m de haut, 30 m de long) à proximité immédiate d'habitations, sans soutènement adéquat (le promoteur avait prévu de construire un bâtiment annexe avant d'y renoncer), mène à l'éboulement du terrain et des murs de clôture, particulièrement lors de tentatives de confortement mal maîtrisées par tirants passifs.



Figure 11 – Absence de retenue sur remblai

➔ La dynamique du retrait-gonflement des argiles

Le phénomène de RGA, accentué par le changement climatique, se manifeste par des cycles de dessiccation et de réhydratation des sols. Le cas d'une habitation située à proximité d'une mare démontre l'ampleur des mouvements possibles : l'assèchement estival de la pièce d'eau provoquait l'ouverture d'une lézarde de 7 cm dans le mur de la grange, laquelle se refermait intégralement durant l'hiver avec la remontée de la nappe. Malgré l'épaisseur importante des murs (50 cm), seule une reprise globale des fondations a permis de stopper ce mouvement cyclique.

À Massy, un ensemble de pavillons des années 1960 illustre les dangers d'une RSO partielle. Suite à des désordres de type RGA, un propriétaire a réalisé des fondations profondes sous une partie de son pavillon. Cette intervention a créé un point dur qui, par blocage partiel de la structure, a entraîné une torsion de l'ensemble du bâtiment, rendant les menuiseries inopérantes et propageant les fissures aux pavillons mitoyens pourtant séparés par des joints de dilatation. La réparation complète de ce sinistre a nécessité l'installation de 67 micropieux et de 152,7 mètres linéaires de longrines intérieures et extérieures, pour un coût estimé à plus de 700 000 euros hors taxes. Un délai d'un an après les travaux de RSO est techniquement requis pour s'assurer de la stabilisation définitive des tassements avant d'engager les réfections des revêtements.

Les effondrements de terrains

↳ L'importance du butonnage à proximité d'avoisinants

En présence de cavités ou de fouilles importantes, la mise en place de butons est indispensable pour assurer la stabilité des ouvrages et des avoisinants. Encore faut-il que ces butons soient correctement dimensionnés et réellement efficaces. Des situations de chantier montrent des erreurs manifestes d'appréciation, avec des dispositifs présentés comme des butonnages alors qu'il ne s'agit que d'éléments inadaptés, sans capacité réelle de reprise des efforts.

Un cas emblématique concerne une fouille d'environ 400 m² sur une profondeur de quatre mètres, réalisée sans aucun butonnage, à proximité immédiate d'un pavillon situé à environ un mètre cinquante et de garages fortement déstabilisés. L'absence totale de soutènement constituait un danger immédiat. La nécessité de mettre en place un butonnage périphérique continu, associé à un dispositif de drapage, a été clairement identifiée. Les solutions finalement mises en œuvre se sont révélées largement insuffisantes, consistant en des éléments de fortune dépourvus de toute efficacité structurelle face à une telle hauteur de terrain et à la présence d'ouvrages voisins.

Faute de mesures correctives sérieuses, le chantier est resté à l'arrêt durablement, plusieurs années après les faits, sans que des travaux de sécurisation adaptés aient été engagés. Cette situation illustre des pratiques gravement défaillantes, y compris dans le cadre d'opérations de promotion privée, et souligne la nécessité d'une sensibilisation accrue des acteurs aux risques liés aux fouilles non soutenues.

↳ Des effondrements liés aux défauts de drainage et à la végétation

D'autres désordres observés relèvent de mécanismes similaires, notamment des effondrements de murs de soutènement aggravés par l'absence de dispositifs de drainage. **La végétation, en l'absence d'évacuation correcte des eaux, contribue à la saturation du mur, à l'augmentation des poussées et à la perte progressive de stabilité.** Dans certains cas, des déplacements mesurés de l'ordre de cinquante centimètres sur une hauteur d'environ un mètre soixante ont été constatés, traduisant un déséquilibre avancé nécessitant un blindage complet et des travaux lourds de reprise.

↳ La sinistralité induite par les réseaux enterrés

Les fuites sur les réseaux d'adduction d'eau sont des catalyseurs majeurs d'effondrement de cavités.

La négligence dans l'entretien des réseaux génère des surcoûts financiers exponentiels. Une fuite identifiée en 1992, dont la réparation était chiffrée à environ 2300 euros, a provoqué, faute d'intervention, un faux aplomb de 40 cm sur un immeuble. Trente ans plus tard, les travaux de RSO rendus nécessaires ont coûté 3,7 millions d'euros. Dans un autre cas, 1,4 million d'euros ont été investis dans le ravalement et la toiture d'un immeuble tout en «oubliant» de traiter les réseaux fuyants connus, ce qui a finalement entraîné l'évacuation de 90 familles et la démolition programmée d'un des bâtiments.

À Meudon, une fuite active pendant un an, comparable à un robinet ouvert, a fragilisé la voûte d'une carrière située 7 m plus bas. L'effondrement final a emporté 10 mètres d'escalier en pierre et provoqué l'interruption de la ligne de tramway voisine pendant un mois et demi, pour un coût de réparation de 1,4 million d'euros (fig.12).



Figure 12 – Conséquence d'une fuite non traitée

Une autre fuite sur un réseau d'adduction d'eau a provoqué l'effondrement d'une ancienne carrière souterraine, générant une cavité d'environ huit mètres de profondeur sous un garage, avec une épaisseur résiduelle de terrain extrêmement faible. Le sinistre, apparu dès 2017, a perduré plusieurs années en raison du refus initial du concessionnaire d'en reconnaître la responsabilité, les réparations n'étant engagées qu'en 2022-2023. Une nouvelle rupture de



canalisation est ensuite intervenue à proximité immédiate, affectant de nouveau le garage et un pavillon voisin, entraînant une interdiction d'occupation des lieux. Malgré des causes clairement établies, le concessionnaire a longtemps contesté sa responsabilité. L'intervention ferme de la collectivité, confrontée au relogement prolongé d'une famille et au risque d'aggravation du sinistre, a conduit à la prise en charge intégrale des travaux, afin d'éviter des coûts et des dommages nettement supérieurs.

↳ Vigilance opérationnelle et méthodes d'investigation

La précision des Déclarations d'intention de commencement de travaux (DICT) est impérative pour la sécurité des sondages géotechniques. Des imprécisions de plus de 2 m sur les plans de réseaux empêchent en effet la réalisation des sondages pressiométriques aux endroits critiques, ce qui accroît le risque de heurter des canalisations de gaz ou d'électricité. Sur les chantiers, le respect des zones de contre-terre est impératif : le stationnement d'engins lourds en bord de fouille provoque régulièrement des effondrements par surcharge, mettant en péril le personnel et le matériel.

Échanges avec la salle

De Philippe RIVOIRARD (architecte expert à Paris (11^e))

Dans le cas des périls comportant des cavités atteignant une trentaine de mètres de profondeur, quelles suites ont été données après la constatation du sinistre ?

Nicolas BUAL

Une mesure de fermeture immédiate a été ordonnée et, selon toute vraisemblance, les cavités ont été comblées très rapidement. L'intervention semble avoir consisté en un comblement cimenté, réalisé dès le début de la semaine suivant la constatation du sinistre.

De la salle [intervenant non identifié]

Une reconnaissance préalable est-elle réalisée avant le comblement des cavités ?

Romain GUINARD

En cas de danger immédiat lié à un fontis visible, une mise en sécurité rapide est effectuée, généralement par un remplissage provisoire. Ce n'est qu'après cette sécurisation que des investigations géotechniques approfondies sont menées afin de caractériser le sous-sol et de déterminer un traitement définitif. Le comblement d'urgence ne remplace donc pas l'étude ultérieure, mais en diffère la réalisation jusqu'à la disparition du risque immédiat.

De Philippe RIVOIRARD (architecte expert à Paris (11^e))

Existe-t-il ensuite une reconnaissance générale du site, y compris après un comblement rapide ?

Romain GUINARD

Après la phase de sécurisation, une investigation géotechnique complète est menée afin de vérifier l'état résiduel du terrain, d'identifier d'éventuelles cavités secondaires et de prévenir tout nouveau désordre. Cette reconnaissance intervient même lorsque le comblement a été réalisé en urgence.

De la salle *[intervenant non identifié]*

La reconnaissance postérieure peut-elle présenter des risques pour l'expert intervenant ?

Nicolas BUAL

Ce genre d'intervention présente effectivement des risques qui nécessitent une vigilance accrue, et doit être interrompue si la sécurité n'est pas assurée.



Le juge, le droit et les mystères du tréfonds



Anne-Sophie PUYBARET

Avocate au barreau de Versailles

Le régime juridique du tréfonds en droit français repose sur le principe de l'accession, qui attribue au propriétaire du sol la jouissance présumée du sous-sol. Ce cadre légal, régi par le Code civil, définit l'étendue de la souveraineté immobilière, les servitudes d'utilité publique et les responsabilités civiles liées aux désordres géotechniques en milieu urbain.

Souveraineté foncière et limites du domaine souterrain

➔ Un droit de propriété qui s'étend jusqu'au noyau terrestre

Le droit français consacre le droit de propriété comme un principe fondamental et absolu, protégé par l'article 2 de la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789. En matière immobilière, cette souveraineté s'exerce verticalement : le propriétaire d'un terrain est présumé propriétaire du dessus et du dessous, ce qui inclue le sous-sol, en théorie jusqu'au noyau terrestre. Cette règle, établie par l'article 552 du Code civil, permet au titulaire du fonds d'exploiter les ressources présentes dans son tréfonds, sous réserve des réglementations spécifiques.

La jurisprudence illustre la puissance de ce principe à travers le droit d'usage des eaux souterraines. Ainsi, **un propriétaire peut légalement capter une source coulant dans son sous-sol, même si cette action entraîne le tarissement d'un étang situé sur une propriété voisine.** La Cour de cassation, en 1977, considère qu'un tel usage constitue un trouble normal de voisinage, le propriétaire agissant dans les limites de son droit de propriété. Pour engager la responsabilité du propriétaire, le tiers lésé doit démontrer un abus de droit, lequel requiert la preuve formelle d'une intention malveillante ou d'une volonté délibérée de nuire.

Dans une autre décision, la Cour de cassation a rappelé qu'en cas de litige portant sur la propriété d'un volume souterrain, tel qu'une cave située sous un bâtiment adjacent, le droit français applique une présomption de propriété au profit du propriétaire du sol en surface. Cette présomption ne peut être renversée que par la production d'actes authentiques, notamment des actes notariés.

➔ Minéraux et vestiges : quand l'intérêt général dépasse le propriétaire

Malgré son caractère absolu, la propriété du sous-sol est encadrée par trois types d'exceptions légales majeures. La première relève du Code minier de 1810, qui attribue à l'État la propriété des ressources souterraines stratégiques. Sont concernés les gisements de gaz, de pétrole, d'or, de métaux précieux, de diamants ainsi que les ressources énergétiques. Le propriétaire du sol ne dispose ainsi d'aucun droit sur ces richesses, dont l'exploitation est soumise à des concessions d'État.

La deuxième limite concerne les vestiges archéologiques et les artefacts et remarquables. La législation protège les artefacts historiques et les bâtiments enfouis, restreignant la liberté d'excavation du propriétaire au nom de la protection du patrimoine national. Enfin, la troisième exception réside dans le régime des servitudes, qui impose des contraintes d'utilité publique ou de voisinage au propriétaire du fonds servant.

Servitudes et empiètements : le casse-tête des réseaux et des ancrages

➡ Détecter l'invisible : l'art d'identifier les servitudes de tréfonds

Une servitude de tréfonds est une charge imposée à un terrain au profit d'un autre fonds ou d'un usage public; **elle demeure attachée au terrain et non à la personne du propriétaire**. Elle concerne principalement le passage de réseaux souterrains (eau, électricité, assainissement). L'identification de ces servitudes est essentielle pour la conception de projets architecturaux ou les expertises judiciaires. Les informations relatives aux servitudes se trouvent généralement dans les actes notariés, mais peuvent également être consultées dans les Plans locaux d'urbanisme (PLU).

Lors de toute demande d'autorisation de construire ou de déclaration préalable de travaux, les services municipaux d'urbanisme signalent l'existence de réseaux souterrains grevant le terrain. Il est impératif pour les concepteurs de faire figurer ces servitudes sur les documents de projet en précisant leur localisation exacte, leur cheminement et leur profondeur afin de prévenir tout désordre structurel lors des phases de terrassement.

Une servitude de tréfonds peut être créée par voie conventionnelle entre deux propriétaires. Le propriétaire souhaitant faire passer un réseau sur le fonds voisin doit obtenir une autorisation et verser une indemnisation, dont le montant peut être évalué de manière raisonnable par un notaire, en tenant compte de la gêne réelle occasionnée au fonds servant, laquelle est souvent jugée réduite en raison du caractère souterrain de l'installation.

➡ Du droit sacré à la proportionnalité : les sanctions impitoyables de l'empiètement

La distinction juridique entre la servitude et l'empiètement repose sur la **licéité** de l'occupation du sous-sol. Si la servitude est autorisée, l'empiètement constitue une atteinte **illicite** au droit de propriété constitutionnellement protégé. L'installation de dispositifs techniques, tels que des tirants d'ancrage destinés à stabiliser un bâtiment fragile, dans le tréfonds d'une propriété voisine sans accord préalable est donc qualifiée d'empiètement. Dès lors, la Cour de cassation ordonne la suppression de l'empiètement par démolition, sans égard pour l'utilité technique de l'ouvrage ou l'absence de gêne apparente pour le voisin. Si cette protection sacrée du droit de propriété prime sur les nécessités constructives, une évolution jurisprudentielle récente permet cependant aux magistrats d'adopter des sanctions proportionnelles. Ainsi, lorsqu'une solution alternative moins destructrice est réalisable, comme le rabotage de débords de fondations plutôt que la démolition d'un pignon entier, les tribunaux peuvent privilégier cette approche, à condition qu'elle garantisse la suppression totale de l'empiètement.

➡ Obligations d'entretien et causes d'extinction des droits

Le bénéficiaire d'une servitude de tréfonds dispose d'un droit d'accès au réseau pour son entretien. Symétriquement, le propriétaire du fonds servant ne doit pas entraver cet accès. La Cour de cassation a ainsi jugé qu'une construction d'aménagements superficiels, tels qu'une terrasse en béton ou un garage, sur le tracé d'un réseau ou d'un ouvrage d'intérêt général (tunnel ferroviaire par exemple) est proscrite si elle menace la structure souterraine ou en empêche la maintenance. En cas d'obstruction, le propriétaire peut être condamné à démolir ses constructions pour rétablir l'accès. En outre, le bénéficiaire de la servitude doit laisser un accès paisible au propriétaire pour que ce dernier puisse assurer l'entretien de son fonds.

Le droit prévoit également les conditions d'extinction des servitudes : celles-ci peuvent disparaître par prescription acquisitive, par convention entre les parties, ou par l'impossibilité d'en user. La gestion de ces droits nécessite une vigilance constante lors des transactions immobilières afin d'éviter l'achat de terrains lourdement grevés.

L'architecte au défi du tréfonds : sinistres, copropriété et devoir de conseil

→ La pelleteuse de l'imprudence : chronique d'un terrassement sauvage à Bougival

Les interventions lourdes sur le tréfonds, particulièrement dans des zones à topographie complexe, présentent des risques de déstabilisation majeure pour l'environnement bâti et public. Un terrassement sauvage sur la commune de Bougival, réalisé sans conducteur d'engin qualifié ni étude de sol préalable pour niveler un terrain en pente, peut entraîner des désordres structurels immédiats. L'exemple d'un chantier à Bougival illustre cette dynamique : la création d'une plateforme en contrebas de la rue a provoqué le basculement d'une maison voisine vers l'excavation, ainsi que l'effondrement de la chaussée et du trottoir.

Sur le plan judiciaire, la responsabilité est strictement hiérarchisée. Dans cette affaire, les tribunaux ont retenu la faute principale du maître d'ouvrage pour s'être affranchi des précautions élémentaires de sécurité. L'architecte intervenant a posteriori pour stabiliser le site n'a pas été condamné pour le mouvement de terrain initial, mais a vu sa responsabilité engagée pour une non-conformité technique spécifique : l'absence de ferrailage sur un dallage réalisé sous sa maîtrise d'œuvre. Cette décision souligne que si le donneur d'ordre assume le risque du terrassement imprudent, l'homme de l'art demeure responsable de la conformité des ouvrages de confortement, indépendamment de la cause première du sinistre.

→ Le drame de Châtillon : quand le ciel de carrière condamne une copropriété

La présence de carrières souterraines constitue un facteur de risque aggravé, dont la manifestation soudaine impose souvent des mesures d'urgence radicales. À Châtillon, l'effondrement d'un siège de carrière sous la cour d'un immeuble ancien a entraîné un arrêté de péril et l'évacuation immédiate des occupants. L'expertise judiciaire a démontré que l'origine du désordre résidait dans un défaut d'entretien des réseaux de la copropriété : un ruissellement d'eau pluviale mal canalisé a lessivé le terrain, provoquant la rupture de la voûte de carrière située en profondeur.

Dans ce type de configuration, le contentieux se cristallise souvent autour de la notion de trouble anormal de voisinage. Les propriétaires sinistrés tentent fréquemment d'engager la responsabilité du promoteur d'une opération immobilière voisine en invoquant la qualité de « voisin occasionnel » des constructeurs. Pour autant, la décision judiciaire repose sur les conclusions techniques de l'expert : **si le rapport d'expertise homologué par le tribunal établit que l'effondrement est dû exclusivement à l'état intrinsèque du sous-sol de la parcelle sinistrée (effondrement naturel ou lié à une fuite interne), le constructeur voisin est exonéré de toute responsabilité.**

Cette jurisprudence place les propriétaires dans une situation de précarité financière extrême. En l'absence de faute prouvée du voisin, le coût des réparations en infrastructure (estimé à 800 000 euros) et en superstructure (600 000 euros) repose intégralement sur les copropriétaires, privés de tout recours contre les tiers. L'évolution législative récente renforce cette tendance en codifiant le trouble de voisinage dans le Code civil, omettant d'y inclure explicitement les constructeurs, ce qui pourrait limiter les condamnations automatiques basées sur la simple proximité d'un chantier.

→ Creuser pour gagner de l'espace : le périlleux détournement des parties communes

Au sein d'une copropriété, le sous-sol relève généralement des parties communes. Toute intervention structurelle visant à augmenter la surface habitable ou la hauteur sous plafond d'un lot privatif par excavation nécessite impérativement l'autorisation préalable de l'Assemblée générale. L'absence d'un tel accord constitue une appropriation illicite engageant la responsabilité du maître d'ouvrage. Dans ce cadre, l'architecte est tenu à un devoir de conseil renforcé. Même si

le client est conscient de l'irrégularité, le maître d'œuvre doit formaliser ses alertes pour se prémunir d'une condamnation.

➔ Vérité technique et intime conviction : l'arbitrage du juge face à l'expert

La gestion des litiges liés au tréfonds souligne l'importance des rapports d'expertise judiciaire. Bien que les tribunaux soient souvent attentifs aux conclusions techniques, ils conservent une liberté d'interprétation souveraine en fonction de la sensibilité des magistrats et de leur propre lecture du droit. L'évolution législative récente codifiant le trouble de voisinage semble restreindre la responsabilité automatique des constructeurs, autrefois qualifiés de « voisins occasionnels », ce qui pourrait modifier durablement la prise en charge des sinistres liés aux travaux souterrains.

De Sylvie THIENOT, architecte experte à Paris (13^e)

Cela pose la question de la preuve d'un lien entre le voisin et le trouble.

Anne PUYBARET

En effet, la jurisprudence qualifie de trouble normal de voisinage les conséquences de l'exercice souverain du droit de propriété sur le tréfonds. L'administration de la preuve constitue à cet égard l'élément fondamental de tout litige relatif à la présomption de propriété du sous-sol.

De Christine TREMEL, architecte experte à Clamart (Hauts-de-Seine)

Vous avez indiqué que la servitude pouvait prendre fin, contrairement à ce que l'on pourrait penser pour certaines servitudes réputées permanentes. Pouvez-vous préciser ce point ?

Anne PUYBARET

Toute servitude, quelle que soit sa nature, peut s'éteindre soit par convention entre les parties, soit par prescription extinctive. En cas de non-usage pendant trente ans, notamment pour un droit de passage devenu inutile, la servitude disparaît. Son maintien suppose la preuve d'un usage effectif durant cette période par le bénéficiaire.



Sigles

AQC : Agence Qualité Construction
DICT : Déclarations d'intention de commencement de travaux
DOE : Dossier des ouvrages exécutés
G2 : Mission géotechnique de conception
G5 : Mission géotechnique de diagnostic
IGC : Inspection générale des carrières
PLU : Plans locaux d'urbanisme
PPR : Plans de prévention des risques
RGA : Retrait-gonflement des argiles
RSO : Reprises en sous-œuvre



© CNEAF – 20 juin 2025

Crédits photographiques : CNEAF, intervenants

Rédaction :
rédiger.
création et gestion de contenus