

Les pathologies naturelles et anthropiques du sol

Tout professionnel de l'immobilier redoute les risques du sol. Tout constructeur au sens du Code civil peut y être confronté à travers la loi Spinetta qui impose, *de facto*, une solidarité face à la responsabilité décennale. Le présent article esquisse quelques bases techniques permettant de mieux aborder ce domaine ubiquiste et tellement méconnu. La notion de pathologie y est définie du point de vue du constructeur. Puis les différentes anomalies sont passées en revue en fonction de leur origine naturelle ou anthropique. La pollution des sols n'y est pas éludée mais succinctement abordée dans une logique de synthèse.

SOMMAIRE

- 1 • Définition du sol et de ses pathologies
- 2 • Pathologies d'origine anthropique
- 3 • Pathologies d'origine naturelle
- 4 • Conclusion
- 5 • Références

Jacques Robert

Né en 1963 dans le Morbihan, Jacques Robert, expert indépendant en pathologies naturelles et anthropiques des sols et des bâtiments, exerce en Île-de-France au sein de CJR Audits depuis 2011. Géologue et hydrogéologue depuis 1989, ingénieur du BTP depuis 2005 et expert en évaluations immobilières depuis 2011, il est marqué par une trajectoire pluridisciplinaire en France et à l'international. Son engagement pour une ingénierie indépendante et responsable l'a poussé à représenter le Syndicat des géologues indépendants de France (GIF) devant le Conseil d'État lors de la séance orale du 12 avril 2021 dans le cadre du recours sur la révision de la norme NF X 31-620 : Prestations de services relatives aux sites et sols pollués [1, 2, 3, 4, 5].

1 Définition du sol et de ses pathologies

Un sol se définit par :

- l'agencement et la géométrie des grains (taille, forme), c'est-à-dire leur texture ;
- leur structure moléculaire et minéralogique.

Ces paramètres contrôlent :

- des qualités mécaniques ;
- la qualité des transferts de fluides sous forme liquide (perméabilité) et vapeur (porosité).

Il en résulte des fonctions :

- écologiques : régulation, épuration, biomasse, biodiversité ;
- anthropiques : le sol forme la base des sociétés humaines.

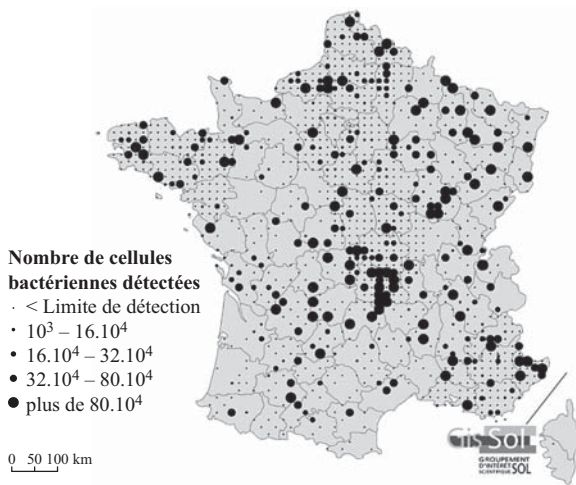
Dans cet article, nous définirons les pathologies du sol comme *les anomalies du fonds et du tréfonds qui rendent le bien non conforme à l'affectation projetée en un point du temps*. Cette définition est donc relative et intègre la contamination par les pathogènes du sol. Les pathologies du sol peuvent investir le bâtiment lui-même. Cependant, nous n'intégrerons pas les produits manufacturés. Ces anomalies peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Leur mode d'action peut être :

- mécanique ;
- chimique et biochimique ;
- radioactif.

REMARQUE

Lorsqu'un projet de construction intègre la réalisation de potagers ou développe une possibilité d'ingestion du sol par des enfants en bas âge, la gestion des sites et sols pollués au sens de la norme NF X 31-620 [1, 2, 3, 4, 5] ne cible pas la recherche des bactéries pathogènes. C'est le cas des bactéries du genre *Acinetobacter* (fig. 1) que l'on retrouve indifféremment dans l'eau, les sols et les végétaux et qui sont à l'origine d'environ 10 % des infections nosocomiales [6].

Les normes analytiques de référence exigées pour la gestion des sites et sols pollués imposent une détection des molécules pétrochimiques et de chimie minérale (annexe C de la norme NF X 31-620-1 [1], norme obligatoire d'accès libre).



Note : La distribution du genre Acinetobacter a été analysée pour 1 463 sites sur les 2 200 que compte le RMQS, dans le cadre du projet Patho-RMQS. La technique de réplique ciblée *in vitro* PCR (*Polymerase Chain Reaction*) a permis de quantifier les bactéries sur des extraits d'ADN du sol.

▲ Fig. 1. Distribution du genre Acinetobacter dans les sols de France métropolitaine, hors Corse (source : IGN Geofla [7]).

2 Pathologies d'origine anthropique

2.1 Pollutions minérales

Ces anomalies résultent de l'activité humaine et impactent la qualité des sols. Elles proviennent de radioéléments ou de pollution chimique.

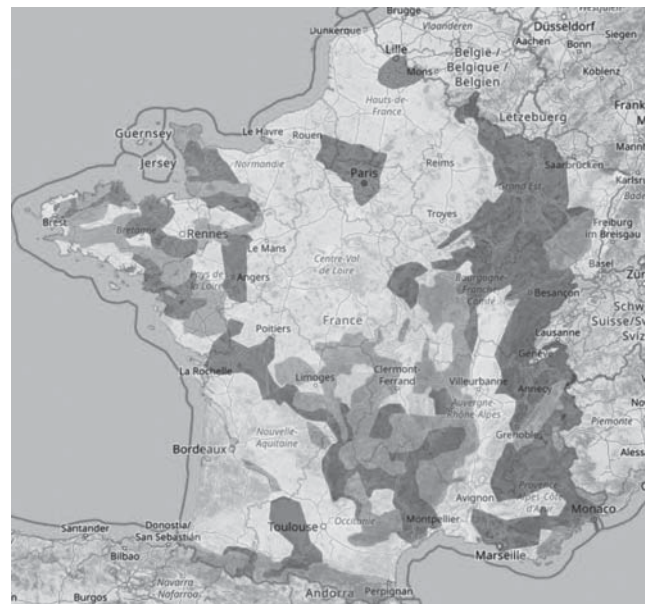
2.1.1 | Radioéléments

Le radium utilisé dans l'industrie au début du siècle dernier est à l'origine de la majorité de la pollution radioactive du sol et de l'eau. La limite d'exposition à ne pas dépasser pour le public est fixée en millisievert (mSv). Cette unité représente l'effet biologique équivalent du dépôt d'un joule d'énergie de rayons gamma dans un kilogramme de tissu humain. Toutefois, la radioactivité est omniprésente dans la nature. Elle forme un bruit de fond généralement sans danger. Par exemple, toutes les argiles sont naturellement radioactives.

2.1.2 | Pollution métallique et organique

La pollution métallique ne se définit pas par rapport à la teneur moyenne d'un élément dans la croûte terrestre (clarke), mais par comparaison à un fond statistique intégrant la pollution nationale moyenne. C'est pourquoi il existe des anomalies régionales.

Plus généralement, l'évaluation des anomalies géochimiques se réfère aux géostatistiques nationales et régionales (fig. 2).



▲ Fig. 2. Anomalies géochimiques régionales (source : BRGM).
 Legend:
 - Zones d'anomalies géochimiques spécifiques pour la valorisation des terres excavées (lighter gray)
 - Zones d'anomalies géochimiques pour la valorisation des terres excavées (darker gray)

▲ Fig. 2. Anomalies géochimiques régionales (source : BRGM).

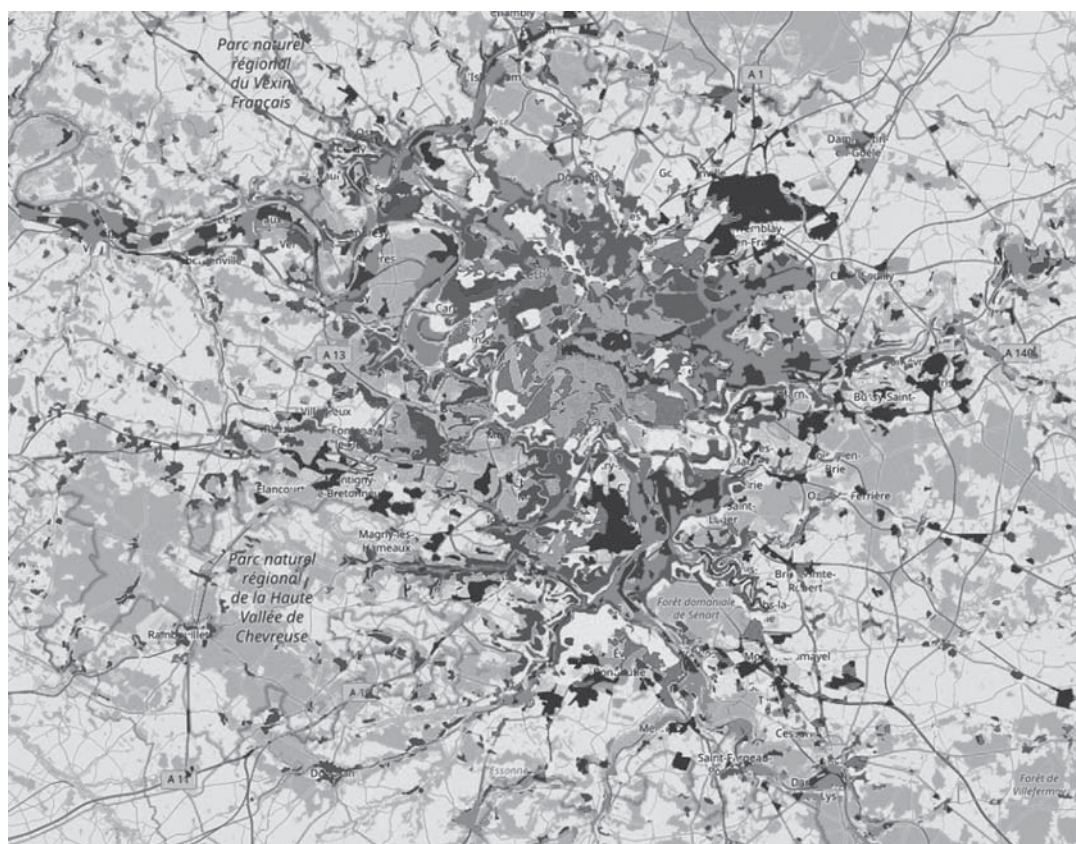
En pratique, l'étude des anomalies géochimiques du sol d'emprise d'un projet a pour but :

- de vérifier dans quelles conditions le terrain est en adéquation avec l'affectation projetée ;
- de gérer la terre excavée Ainsi, les valeurs du fond pédogéochimique présentées ci-contre pour l'Île de France (fig. 3) constituent la base de définition des seuils définis dans les guides de valorisation hors site des terres excavées pour les projets d'aménagement.

2.1.3 | Évolution des polluants dans le sol

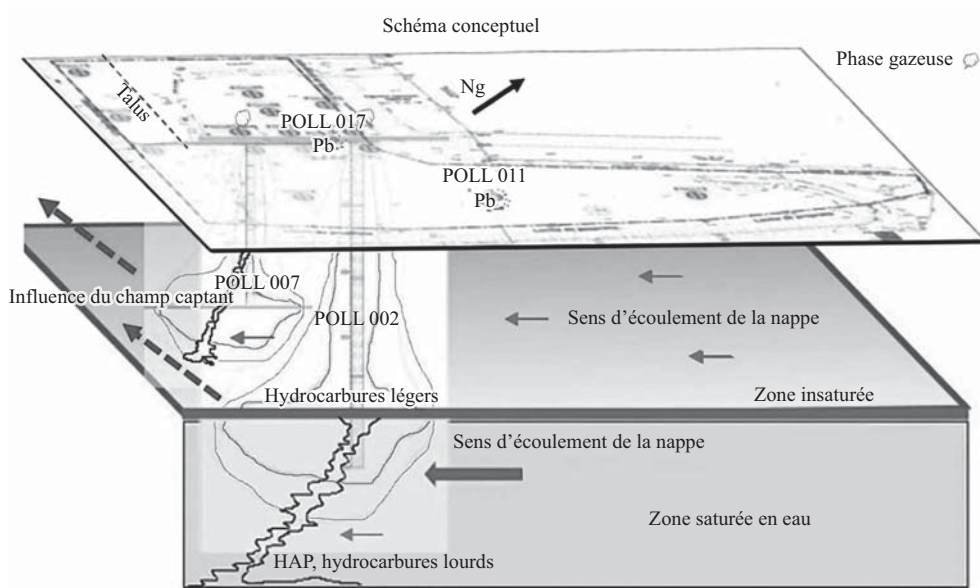
La volatilité et la solubilité contrôlent la mobilisation des polluants. Ainsi :

- les traces métalliques sont peu solubles et s'accumulent facilement dans la végétation :
 - le cuivre et le plomb ont tendance à se fixer en subsurface dans le sol,
 - lorsque le pH est assez bas, le manganèse, le zinc, l'aluminium et le fer sont lixivés. Sur les sols calcaires, il existe toutefois un front de décarbonatation correspondant à une phase d'altération. L'élévation du pH provoque une précipitation massive de ces éléments,
 - les métaux suivants subissent un lessivage progressif dans le sol : potassium, vanadium, rubidium, chrome, silicium, bore et baryum ;
- les polluants organiques et minéraux de densité inférieure à 1 peuvent s'enraciner sous forme de panaches lenticulaires



VALEURS DE FOND PEDO-GEOCHIMIQUE – NIVEAU 2 (en mg/kg de matière sèche)																														
SUBSTANCE	ZONE 1		ZONE 2		ZONE 3		ZONE 4		ZONE 5		ZONE 6		ZONE 7		ZONE 8		ZONE 9		ZONE 10		ZONE 11		ZONE 12		ZONE 13		ZONE 14		ZONE 15	
	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.	Nat.	Remb.		
ELEMENTS TRACES METALLIQUES	Arsenic (As)	25	25	30	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
	Baryum (Ba)	150	170	150	150	150	210	150	230	160	150	150	150	230	300	160														
	Cadmium (Cd)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9	0,6	0,6	0,8	0,4														
	Chrome (Cr)	90	90	100	100	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90														
	Cuivre (Cu)	40	40	40	40	40	60	50	60	50	40	120	40	60	100	40														
	Mercuré (Hg)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	0,8	0,15	0,15	0,6	0,2	0,6	1,8	1,2														
	Molybdène (Mo)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5														
	Nickel (Ni)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60														
	Plomb (Pb)	50	50	50	50	50	110	70	140	100	50	180	90	150	170	70														
	Antimoine (Sb)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1														
	Sélénium (Se)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1														
Zinc (Zn)	150	150	150	150	150	230	150	170	180	150	250	150	150	200	150															
COMPOSES ORGANIQUES PERSISTANTS	7 PCB	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1															
	16 HAP	10	10	10	10	10	10	10	20	10	10	10	15	10	10															
SUBSTANCES ORGANIQUES	Hydrocarbures totaux C10-C40	50	50	50	50	50	50	60	80	300	100	100	150	100	80															

▲ Fig. 3. Sous-zone de fond pédogéochimique du remblai en région parisienne (source : TERRASS, Projet GeoBaPa).



▲ Fig. 4. Exemple de schéma conceptuel sur l'emprise d'une ancienne usine à gaz (source : CJR Audits).

en zones saturée et insaturée (en eau) tout en se développant sous forme de vapeur (cas des polluants non miscibles légers, ou LNAPL⁽¹⁾) ;
 – les polluants organiques et minéraux de densité supérieure à 1 forment des panaches plus profonds. Ils plongent dans les nappes s'ils ne sont pas filtrés en subsurface (cas des polluants non miscibles lourds, ou DNAPL⁽²⁾).

La figure 4 ci-avant fournit un exemple concret d'évolution différentielle d'une pollution polygénique. Le plomb tend à s'accumuler dans les dix premiers centimètres de sol et les hydrocarbures évoluent en présence d'une nappe en fonction de leur densité respective.

2.2 Pathologies associées à l'acte d'aménager et de construire

2.2.1 | Déplacements de terre

Les excavations produisent une décompression du sol par retrait de charge. Inversement, les remblais produisent un tassement. Selon l'amplitude du mouvement, ces modifications peuvent affecter des fondations voisines.

(1) Light non-aqueous phase liquids.

(2) Dense non-aqueous phase liquids. Il s'agit essentiellement des solvants chlorés et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

2.2.2 | Vibrations

Le vibrofonçage des palplanches produit un tassement du sol et propage les vibrations aux constructions voisines. Ce potentiel s'étend à tous les travaux de battage en fonction de leur fréquence, de leur intensité et des caractéristiques du sol.

2.2.3 | Soutènements

Une tranchée peut s'effondrer si ses parois ne sont pas soutenues par un boisage. Le sinistre peut alors impacter les bâtiments voisins. De même, un talus à pente trop forte nécessite un ouvrage de soutènement. Enfin, les murets de soutènement pérennes sont conçus à partir d'un dimensionnement géotechnique et drainent les eaux de ruissellement en pied d'ouvrage afin de limiter le poids des terres (photo 1).

2.2.4 | Perte de cohésion du sol

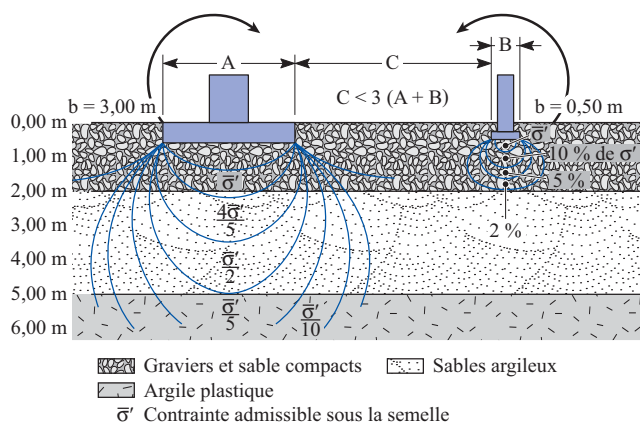
L'imperméabilisation non compensée des sols, le déracinement de la végétation sont autant de facteurs accélérant le lessivage et le ravinement. L'infiltration concentrée par l'artificialisation des sols peut provoquer des glissements de terrain lorsqu'un horizon perméable coiffe un niveau imperméable et incliné.

2.2.5 | Proximité des constructions

Chacune des fondations de deux bâtiments voisins interagit avec le sol en fonction de la charge qu'elle transmet. Cette transmission est représentée à la figure 5 par des courbes



▲ Photo 1. Réalisation d'une paroi clouée (source : GTS).



▲ Fig. 5. Transmission de charges des fondations (source : CJR AUDITS).

d'isopression. Lorsque la distance C est inférieure à trois fois la somme des largeurs respectives des fondations, les deux bulbes se fondent en un seul plus large et plus profond. En d'autres termes, le sol réagit alors comme s'il devait supporter un seul bâtiment de plus grande emprise au sol et une dépression se crée entre les deux constructions, qui penchent alors l'une vers l'autre.

2.2.6 | Ouvrages de drainage et d'infiltration des eaux pluviales

Les drains périmétriques peuvent créer des tassements différentiels en connectant artificiellement l'eau de ruissellement collectée à un horizon d'argile gonflante jusqu'alors isolé.

À l'échelle communale, la gestion des infiltrations à la parcelle peut aboutir au remplissage de poches d'eau en contact avec des sous-sols.

2.2.7 | Nature des remblais

L'utilisation des remblais actifs tels que des argiles gonflantes ou des terres pyriteuses peut aboutir à des pathologies.

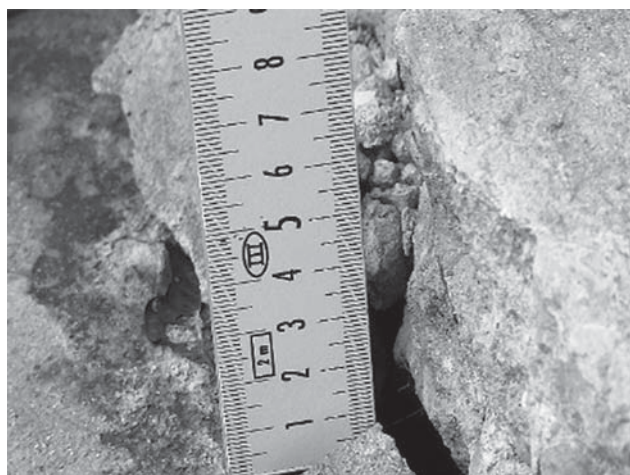
EXEMPLE

Le sol d'une parcelle présente des tassements différentiels superficiels alors que l'argile gonflante (Marne Verte) se situe à une profondeur de 3 m (voir coupe fig. 6).

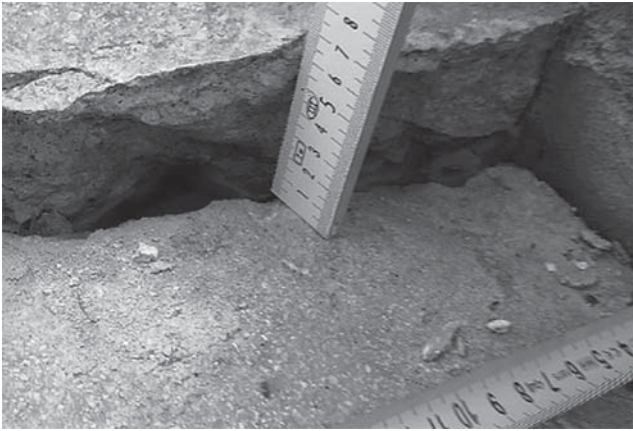
Un sondage à la tarière suffit à montrer que le constructeur a utilisé l'argile gonflante décaissée comme remblai

Sondage S 6 : Altitude de tête de sondage : $\approx 84,10$
 - de 0,00 m à 0,20 m : terre végétale
 - de 0,20 m à 0,50 m : limon argileux marron
 - de 0,50 m à 3,00 m : argile marron foncé avec rognons et blocs de meulière
 - de 3,00 m à 7,00 m : marne verte à filets blanchâtres

▲ Fig. 6. Coupe géologique (source : Infoterre).



▲ Photo 2. Mesure locale de l'affaissement (source : CJR Audits).



▲ Photo 3. Autre mesure locale de l'affaissement (source : CJR Audits).



▲ Photo 4. La couleur « vert pistache » visible sur la tarière est caractéristique de la formation de l'argile verte de Romainville dans cette zone. (source : CJR Audits).

2.2.8 | Carrières souterraines et souterrains

Elles peuvent se présenter jusque sur trois niveaux superposés, former des vides ou des remblais peu comprimés. Ainsi, 45 % de la capitale est sous-minée par des carrières :

- de gypse, utilisé pour le plâtre ;
- de calcaire, utilisé pour la construction (fig. 7).

Les vides y sont soutenus par des piliers constitués par le calcaire d'origine ou des murets. Les marnières souterraines présentent les mêmes risques.

Lorsque le ciel de la carrière s'effondre, l'itération du processus provoque la remontée progressive du vide : c'est le fontis. En France, le propriétaire du fonds possède également le tréfonds (article 552 du Code civil). Il endosse donc une responsabilité importante en termes de sécurité du sol. Se pose alors la ques-



▲ Fig. 7. Carrières souterraines en Gironde (source : Gironde le Département).

tion du budget destiné à l'assurer. Certaines zones notoirement sous-minées sont encadrées par des plans de prévention relatifs à l'article R. 562-5 du Code de l'environnement. Les travaux de prévention imposés sont limités à 10 % de la valeur vénale ou estimée du bien à la date d'approbation du plan de prévention des risques (PPR) et doivent être effectués dans un délai de 5 ans à compter de cette même date. En région parisienne l'Institut Général des Carrières dispose de cartes permettant de vérifier le sous-minage d'une parcelle (fig. 8). Les puits, les galeries latérales et les différents niveaux exploités sont indiqués.

Réciproquement, si le terrain sous-miné supporte un actif immobilier à usage d'habitation ou de bureaux, le risque géotechnique peut être intégré à la valeur vénale. Le flux de trésorerie (*Cash Flow*) correspond à la différence entre les recettes et les dépenses productibles par un actif. L'actualisation est un calcul qui permet d'anticiper le développement de cette base financière en fonction du temps. Ce calcul, qu'on appelle le *Discounted Cash Flow*, utilise un taux d'actualisation. Ce dernier peut s'obtenir par trois méthodes. L'une d'elles intègre le risque encouru ce qui la rend particulièrement pertinente dans le cas d'un sous-minage ou de pathologies du sol anticipables. Ce taux d'actualisation (a) comprend trois composantes :

- le taux sans risque (Tx OAT) qui couvre le taux d'inflation et le coût du temps. On utilise comme valeur de référence les taux de marché des emprunts d'un État solvable. Cette notion correspond aux Obligations Assimilables du Trésor (OAT). Ainsi, l'OAT à 10 ans (obligation assimilable du trésor à échéance de 10 ans) est en général choisi ;
- la prime de structure (Tx ps) qui correspond à une correction du taux sans risque car la créance détenue présente une liquidité plus faible que l'OAT ;
- la prime de risque (Tx pr) qui, comme son nom l'indique, codifie les risques financiers pesant sur les revenus associés aux actifs dans les années à venir.



▲ Fig. 8. Extrait d'une carte localisant les carrières souterraines dans le XVIII^e arrondissement de Paris (source : IGC).

Le sous-minage d'un actif immobilier fait peser sur ce dernier une menace de travaux dont il est possible d'évaluer le montant. Par conséquent il est pertinent d'intégrer le risque à la valeur vénale de l'actif. Les travaux ne sont pas ici intégrés dans les hypothèses particulières du modèle en tant qu'investissement certain, prévu et daté en travaux (cash flows négatifs). Ils sont intégrés dans les hypothèses générales du modèle en tant que risque.

En cas de fontis (photo 5), des fissures caractéristiques des tassements différentiels apparaissent (en particulier des fissures de cisaillement et de traction). Il arrive souvent que la carrière située au droit du bâtiment ne soit pas visitable ; une reprise en sous-œuvre par micropieux après comblement s'avère alors



▲ Photo 5. Fontis au droit d'une carrière (source : BRGM).

nécessaire. Le nombre de sondages géotechniques dépend de l'état des connaissances sur la géométrie et le remplissage de la carrière. On distingue :

- les sondages simples, munis des diagraphies instantanées de base ;
- les sondages pressiométriques, qui fournissent des informations plus complètes.

EXEMPLE

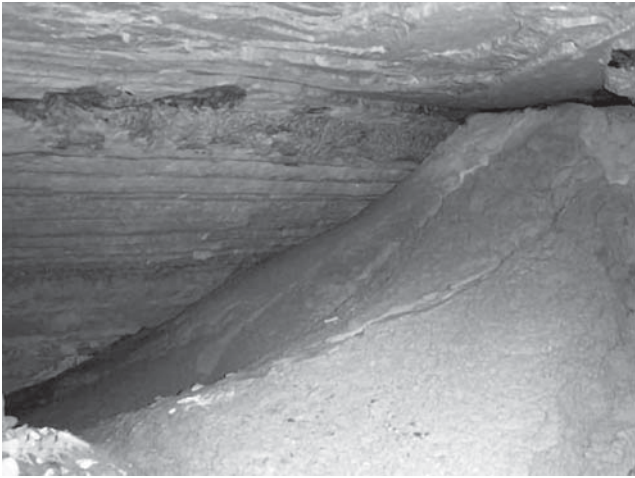
Déroulement des travaux de comblement

Un constat contradictoire préalable portant sur l'état des ouvrages voisins est établi.

Si la carrière est visitable, la zone à combler peut être circonscrite par des murets périmétriques qui confineront le coulis (photo 6). Dans le cas contraire, le périmètre est isolé par des forages d'injections



▲ Photo 6. Muret périmétrique (source : GTS).



▲ Photo 7. Injection gravitaire (source : GTS).

gravitaires et de clavage voisins les uns des autres (photo 7). Par exemple, les forages périmétriques peuvent être espacés de 2 m. Ils s’ancrent en pied de carrière sur 0,5 m. Les ouvrages de barrage sont réalisés en gros diamètre (Ø 150 mm) et équipés en PVC. Un coulis de béton est alors injecté et suivi d’un mortier destiné à colmater les vides résiduels :

- en tête des cônes formés par le coulis gravitaire ;
- au niveau du ciel de carrière ;
- à l’inter-maille des forages.

Le volume à combler est quadrillé par des forages de mailles de 7 m × 7 m à 5 m × 5 m sous les bâtiments. Le maillage est encore resserré dans le volume occupé par le fontis.

Trois phases d’injection se succèdent alors :

- un premier cycle de comblement gravitaire se termine par la résurgence du coulis en tête de forage (résistance à la compression de 1,5 MPa à 28 jours). La pompe est équipée d’un débitmètre relié à un appareil d’enregistrement numérique d’injection. Le diamètre est de 110 mm mais peut passer à 150 mm en cas de fontis. Il est souvent plus simple d’utiliser du béton prêt à l’emploi lors de cette phase ;

- les injections de clavage sont réalisées sous faible pression à l’obturbateur simple en tête de forage une semaine après le comblement (résistance à la compression de 3 MPa à 28 jours). Un capteur de pression est alors placé en bout de ligne d’injection au plus près de la tête de forage ;
- les injections de traitement sont destinées à combler les vides résiduels (fig. 9). Elles sont effectuées sous pression moyenne au double obturbateur. Comme précédemment, un capteur de pression est placé en bout de ligne d’injection au plus près de la tête de forage.

Le coulis injecté peut être composé de :

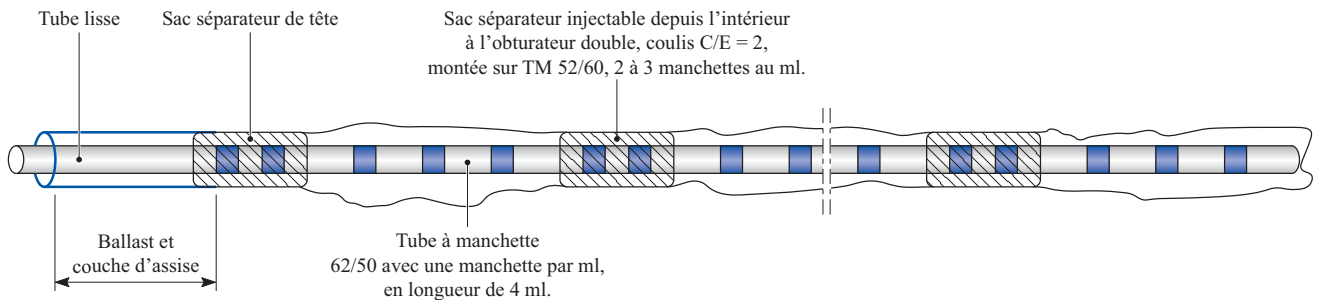
- ciment CEM III/A ou C 32,5 NF (ex-CLK 45) dosé de 150 à 360 kg/m³ ;
- bentonite dosée de 10-20 kg/m³ à 30 kg/m³ ;
- sablon de granulométrie n’excédant pas 4 mm.

Selon la place disponible, l’accès et les quantités prévues, il est :

- produit sur place à partir d’une centrale de fabrication alimentée par des silos contenant les consommables en vrac (photo 8) ;
- fabriqué de façon « plus artisanale » à partir de sacs de ciments ;



▲ Photo 8. Unité de fabrication (source : GTS).



▲ Fig. 9. Tube à manchette utilisé dans les injections de traitement (source : GTS).

– envoyé sur site prêt à l'emploi en camion toupie si le site est encaissé, d'accès délicat ou si le volume à injecter est inférieur à 250 m³.

Le béton de barrage est maigre et sec, de granularité 0/20, formulé à 150 kg/m³ de ciment CLK/CEM M/C 32,5.

Le contrôle instantané des opérations s'exerce à travers un moniteur.

Les éléments ci-dessous sont enregistrés :

- paramètres de forage :
 - vitesses d'avancement,
 - pression sur l'outil,
 - pression du fluide de forage ;
- paramètres d'injection :
 - pression d'injection,
 - volume injecté,
 - débit d'injection.

Le maître d'œuvre prélève les enregistrements le jour même. Le pilotage est complété par les points de contrôle suivants :

- mesure de la teneur en eau sur la charge minérale ;
- mesure de la densité du coulis d'injection (2 fois par jour) ;
- mesure de la viscosité au cône de Marsh (1 fois par jour) ;
- mesure de la décantation (1 fois par jour) ;
- relèvement d'une série de 3 éprouvettes 3 fois par jour en vue de contrôler la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours.

2.2.9 | Pompages intensifs d'eau

Quel qu'en soit le dispositif, les pompages intensifs destinés à assécher les fouilles en vue d'une construction augmentent artificiellement la porosité de l'aquifère en chassant les particules fines (photo 9). Il peut s'ensuivre des phénomènes de tassement susceptibles de mettre en péril les constructions voisines. Par ailleurs, les circulations d'eau risquent d'affecter la construction, en particulier en cas d'influence marine.

La parade la plus classique est constituée par la réalisation d'un bouchon étanche, ou jupe injectée (photo 10). La surface à imperméabiliser peut être circonscrite par des palplanches ou une coupure étanche (tranchée remplie de coulis et ancrée dans un niveau imperméable).



▲ Photo 9. Pompage du fond de fouille par champ captant (source : GTS).

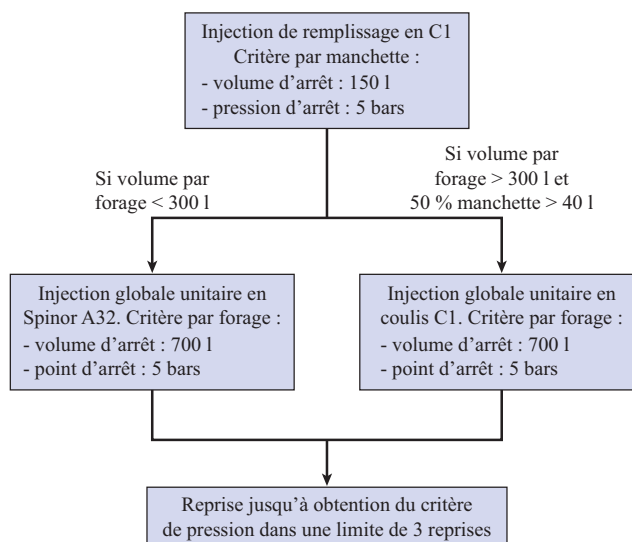


▲ Photo 10. Mise en œuvre d'une jupe injectée (source : GTS).

Elle permet de fermer les vides interconnectés du sol par injection de coulis. Lorsqu'ils sont de trop petite dimension, il est possible d'utiliser un liant ultrafin – de diamètre inférieur à 12 micromètres (μm) (fig. 10).

Les accélérateurs de prise permettent d'améliorer le rendement de l'opération sans affaiblir la résistance finale. Tranche par tranche, les coulis sont ainsi injectés en plusieurs cycles. Chaque cycle est constitué de plusieurs phases d'injection portant sur des coulis de formulations différentes couvrant des espaces de plus en plus réduits.

Enfin, ces phases ne sont pas répétitives mais respectent une stratégie récurrente matérialisée par un logigramme.



▲ Fig. 10. Exemple de logigramme pour l'injection d'un coulis de traitement C1 et d'un liant ultrafin après remplissage en coulis de gaine jusqu'à résurgence en tête de forage (source : GTS).

2.2.10 | Forages

La fracturation hydraulique a été médiatisée dans le cadre de l'exploitation du « gaz de schiste ». Cette méthode n'est toutefois pas récente et son application s'est étendue au génie civil puis aux forages d'eau. Appliquée dans un cadre raisonnable, elle peut mettre en œuvre un compresseur de 400 bar couplé à une pompe triplex dans un ouvrage vertical. La section de forage à fracturer est isolée entre deux obturateurs (ou « packers ») qui sont des bouchons cylindriques gonflables.

Lors de l'exploitation d'un minerai ou d'un champ pétrolier, la fracturation peut se pratiquer à l'horizontale et injecter des fluides plus agressifs.

Les vibrations produites par les ateliers de forage peu profond proviennent en général d'un marteau pneumatique fixé au bout du train de tige dans la méthode du marteau fond-de-trou. Cette technique s'inspire du marteau piqueur : l'air comprimé actionne un piston central qui transmet les coups au taillant. Ces derniers alternent avec une rotation transmise par des clavettes. Par ailleurs, les essais géotechniques au pénétromètre dynamique procèdent par battages successifs et peuvent présenter une transmission vibratoire secondaire.

REMARQUE

Le saviez-vous ?

Un forage profond doit compenser par le fluide qu'il injecte la dépression qu'il crée dans le sous-sol. À titre d'exemple, sur un ouvrage de 2 500 m, la pression à compenser peut être de 7 700 kilopascals (kPa). Si la pression appliquée dépasse 27 440 kPa, alors les terrains traversés risquent de se fracturer. C'est le cas si la densité de la boue introduite dépasse la valeur de 1,60 [8].

Cependant, il arrive que ces contraintes d'origine anthropique interagissent avec un système tectoniquement instable. Généralement, la température du sous-sol augmente de 30 °C par kilomètre. Mais ce gradient est plus fort sur des secteurs à la tectonique active. Ce phénomène peut être exploité par des forages géothermaux.

Les failles sont des plans de cassures affectés par des déplacements. Dans un premier temps, elles forment un frein qui s'oppose aux contraintes croissantes exercées, puis leur résistance lâche brutalement : c'est le séisme. Ce dernier peut être provoqué par l'action humaine qui modifie l'équilibre géomécanique de la zone.

Le procédé de géothermie à base de roches chaudes sèches, ou *Hot Dry Rock* (HDR), correspond à la stimulation d'un

système géothermique par fracturation hydraulique. Ce type de fracturation a été développée à Soultz dans le graben du Rhin en Alsace. L'installation était constituée de trois forages distants de 600 m et plongeant à 5 000 m de profondeur. L'eau froide injectée dans le forage central était récupérée par les forages latéraux. Cette méthode a été appliquée à Bâle dans le projet de centrale géothermique *Deep Heat Mining* et la fracturation hydraulique a provoqué des séismes atteignant une magnitude de 3,4 (décembre 2006).

Plus récemment, en décembre 2020, un arrêté préfectoral [9] a provoqué l'abandon du projet de Vendenheim en Alsace à la suite de différents séismes ressentis sur le périmètre de la centrale géothermique développée par la société Fonroche. Les forages profonds devaient alimenter de 15 000 à 20 000 logements en électricité, et 26 000 logements en chaleur.

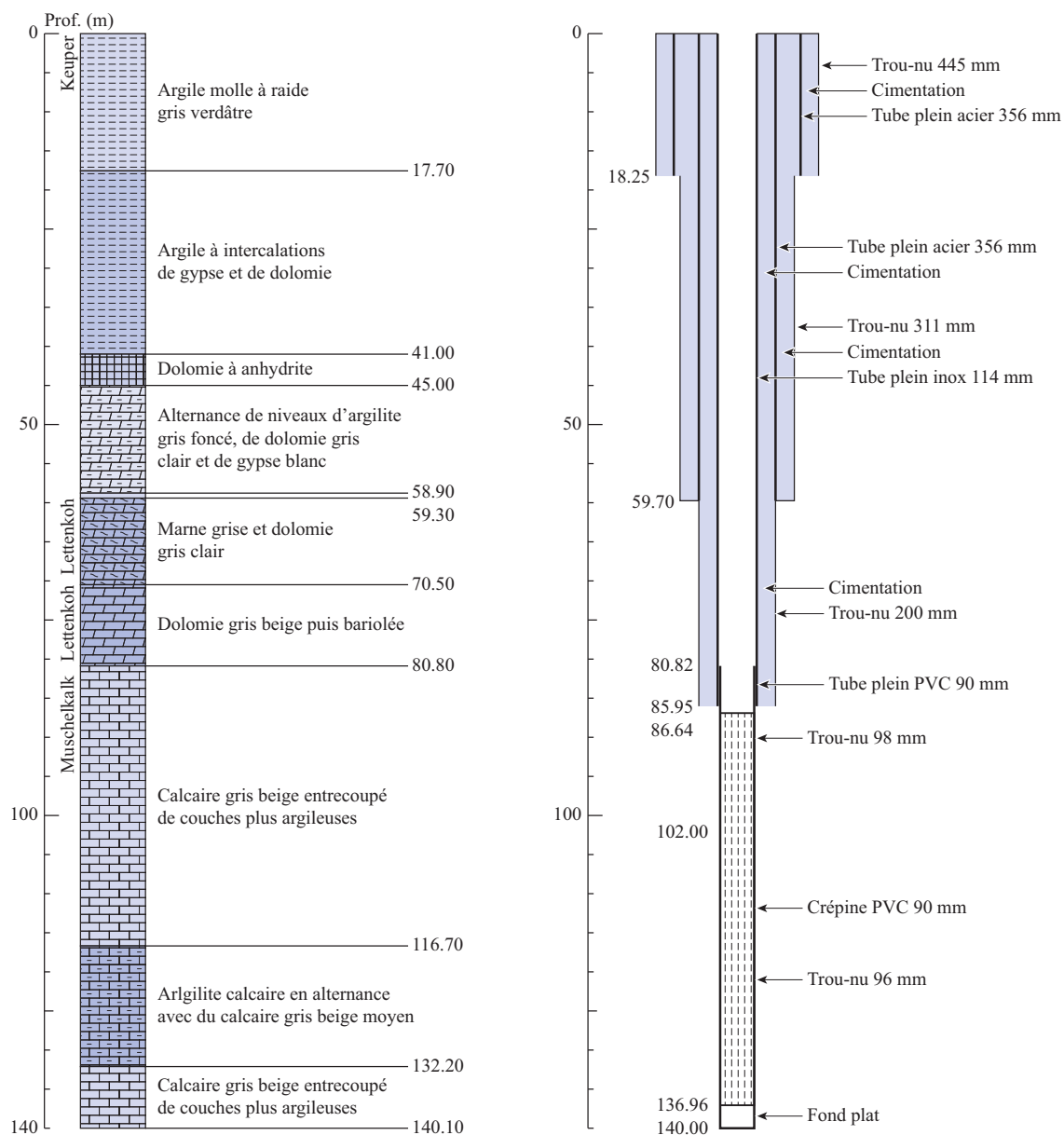
Cependant, les forages d'eau n'interagissent pas qu'avec les failles. En 2007, le centre de la ville allemande de Staufen-en-Brigau s'est soulevé à la suite d'un forage géothermique dans de l'anhydrite. Finalement, 200 maisons ont été fissurées.

En 2013 à Lochwiller (Bas-Rhin), un particulier a commandé un forage géothermique de faible profondeur. À 100 mètres, le forage traversait une argile formant le toit imperméable d'une nappe captive artésienne. En remontant, cette dernière a interagi avec un niveau d'anhydrite (voir coupe de la figure 11). Selon un processus naturel détaillé plus loin dans cet article, cette roche s'est transformée en gypse avec augmentation de volume et soulèvement du sol à l'échelle communale.

D'autres phénomènes induits par l'homme sont fortement suspectés. C'est le cas d'un écoulement de boue de grande ampleur qui a impacté le district de Porong en mai 2006 à Java. À Pohang en Corée du Sud, l'EGS⁽³⁾, un système de géothermie stimulée, est suspecté d'avoir provoqué un séisme d'une magnitude 5,5 sur 9 (échelle de Richter) en novembre 2017, au cours duquel 70 personnes ont été blessées. En 2019, un séisme d'une magnitude de 5,4 a secoué la commune du Teil (Ardèche). Le déclenchement du phénomène a été relié aux tirs de mine issus de la cimenterie Lafarge par un rapport du CNRS [10].

(3) Enhanced Geothermal System.

BSS004GKUD Date fin :	Désignation : PMS	Commune : LOCHWILLER (67) Lieu-dit :
Localisation (X : km Y : km Z : m (coupe : m)	Nature : PIEZOMÈTRE	

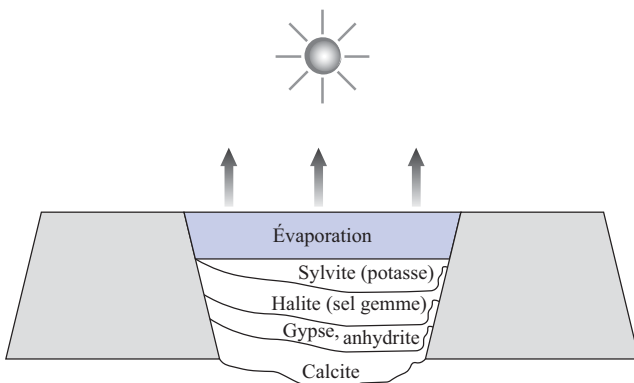


▲ Fig. 11. Coupe technique d'un forage recoupant la géologie locale (source : BRGM).

3 Pathologies d'origine naturelle

3.1 Évaporites et carbonates

Lorsqu'une masse d'eau saline s'évapore, la première espèce à précipiter est la calcite (CaCO_3), qui forme les roches calcaires. À la calcite pure succèdent des calcaires de plus en plus ferromagnésiens. Puis viennent les évaporites, qui précipitent à tour de rôle (fig. 12).



▲ Fig. 12. Série sédimentaire évaporitique et carbonates (source : CJR AUDITS).

En d'autres termes, les évaporites constituent une famille de roches formées par précipitation lorsqu'un seuil de solubilité est atteint. L'exemple le plus connu n'est autre que la halite (NaCl), roche formée par le sel ancien (solubilité : 360 g/L).

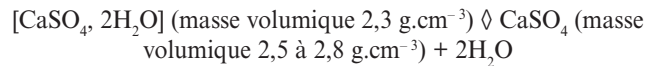
3.1.1 | Anhydrite

L'anhydrite représente un autre membre de cette famille, dont le nom est dérivé du grec classique et signifie « sans eau ». Il s'agit d'un sulfate évaporitique à cristaux tabulaires (photo 11).



▲ Photo 11. Cristaux d'anhydrite (source : lcollector).

En présence d'eau, ce dernier finit par se transformer en gypse, une autre évaporite, avec augmentation de volume :



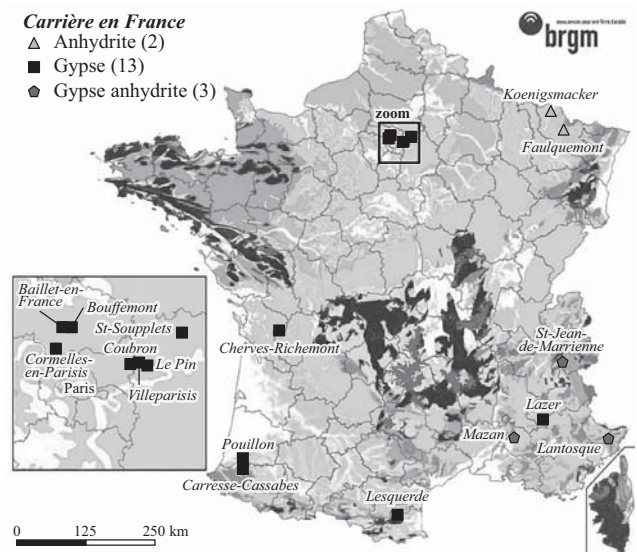
Gypse (solubilité dans l'eau froide : 2 g/L) Anhydrite (solubilité dans l'eau froide : 3 g/L)

Cette augmentation de volume produit des gonflements du sol. Notons que cette réaction n'est réversible qu'à 100 °C (propriété utilisée dans la fabrication du plâtre). L'anhydrite est moins fréquente que le gypse en France (voir fig. 13)

Exploitations françaises et usines de transformations

Carrière en France

- ▲ Anhydrite (2)
- Gypse (13)
- ◆ Gypse anhydrite (3)



Lithologie simplifiée de la France

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| ■ Argiles | ■ Granites |
| ■ Calcaires, marnes et gypse | ■ Ophiolites |
| ■ Craie | ■ Gneiss |
| ■ Grès | ■ Micaschistes |
| ■ Sables | ■ Schistes et grès |
| ■ Basaltes et rhyolites | |

▲ Fig. 13. Principales carrières de sulfates évaporitiques (source : BRGM).

3.1.2 | Gypse

Il se reconnaît par les caractéristiques suivantes :

- sa faible dureté (2, rayable à l'ongle) ;
- il décrépète à la flamme en blanchissant et en s'exfoliant ;
- il se dissout dans l'eau ;
- il se présente parfois sous des formes caractéristiques comme la rose des sables et ses macles (photo 12).

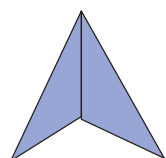
La rose des sables se forme lorsque du gypse précipite suite à des remontées capillaires d'eau souterraines et en présence de vent.

Prisé en sculpture, le gypse microcristallin est connu sous le nom d'albâtre.



▲ Photo 12. Occurrences courantes de gypse (source : CJR AUDITS).

Les macles résultent de l'association de plusieurs cristaux ordonnés selon les lois géométriques relatives à leur cristallographie. Le gypse se caractérise par des macles en pied d'alouette ou en fer de lance (fig. 14).



Gypse fer de lance

▲ Fig. 14. Gypse fer de lance (source : CJR AUDITS).

62 % du gypse métropolitain est localisé dans le Bassin parisien. Les niveaux les plus connus ont été exploités dans des carrières à ciel ouvert ou souterraines et continuent à l'être (fig. 15).

Comme l'indiquent les coupes ci-après, on distingue par profondeur croissante :

- la haute masse, ou « première masse » (20 m environ de gypse saccharoïde) ;
- la deuxième masse, ou « masse moyenne » (de 3 à 7 m) ;
- la troisième masse (3 m) ;
- la quatrième masse de gypse, plus localisée (1,50 m).

Cet ensemble d'âge ludien (Bartonien supérieur) est assez bien répertorié en raison de son exploitation historique.

Cependant, il existe d'autres niveaux moins connus, tels que le « Marabet » (issu de la terminologie des mineurs), un horizon d'épaisseur métrique à inframétrique dont la présence est moins anticipée dans les travaux de construction.

Par ailleurs, les sondages géotechniques contemporains qui précèdent ces descriptions lithologiques ne font plus l'objet d'un suivi géologique détaillé. De même, les investigations documentaires ne sont pas toujours poussées.

Ainsi, des poches de gypse non anticipées provoquent des sinistres en cours de travaux ou une fois la construction achevée. Ces événements sont sources de litiges.

Dans l'exemple de la figure 16, la formation des Marnes de Pantin correspond à une alternance marno-calcaire qui permet la circulation des eaux et peut abriter une petite nappe aquifère. La dissolution du gypse à ce niveau est à l'origine d'un sinistre qui a provoqué en 2021 un litige entre deux constructeurs voisins.

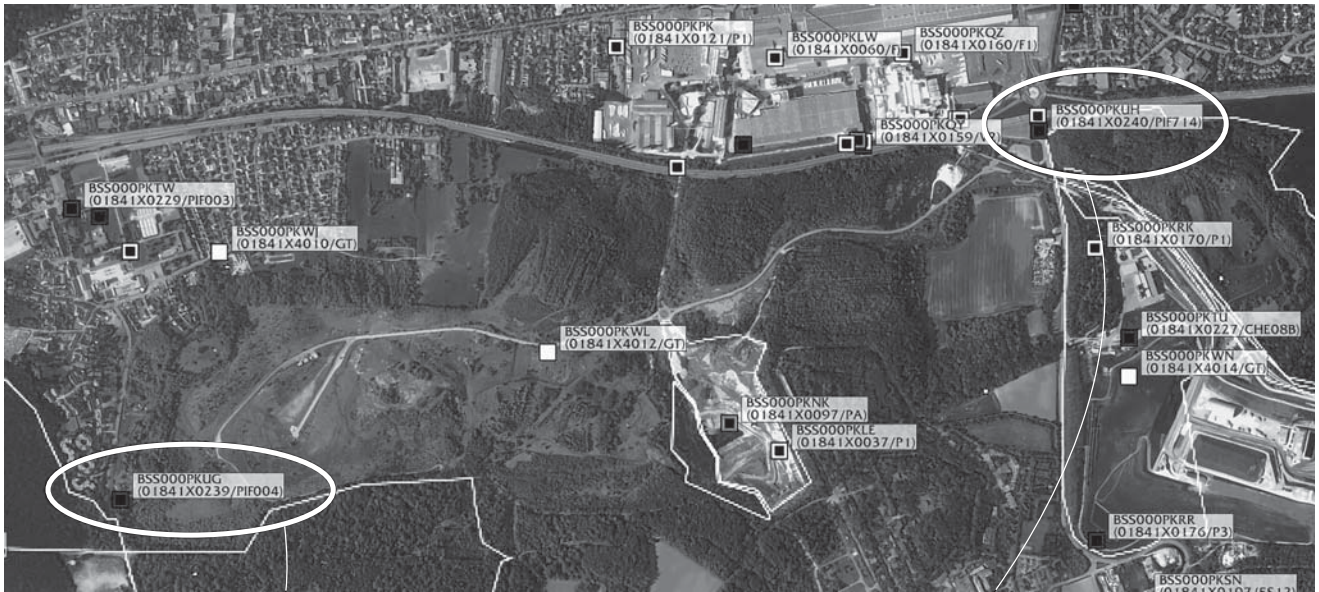
Quelle que soit l'origine de la cavité (effondrement d'une carrière, dissolution sous l'emprise du bien), le risque en surface est toujours le même. Le toit de la cavité s'effondre de manière récurrente, la faisant ainsi remonter de proche en proche jusqu'en surface. La photo 13 montre une zone de dissolution sur un parking de copropriété. Des échantillons de gypse saccharoïde ont été prélevés.



▲ Photo 13. Dissolution de gypse dans une copropriété (source : CJR Audits).

REMARQUE

La dissolution des sulfates provoque également une agressivité des eaux vis-à-vis du béton.



BSS000PKUG
01841X0239/PIF004
Log validé

Profondeur	
De 0.0	à 76.0 m [Rafraîchir]

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
11.50	Argile verte de Romainville	[Lithologie]	Ensemble remanié et soliflué : argile verte et glaise à cyrènes	Rupélien	113.50
17.00	Marnes de Pantin	[Lithologie]	Calcaire argileux à marne blanchâtre	Priabienien	108.00
32.00	Marnes bleues d'Argenteuil	[Lithologie]	Marne gris bleu, gris verdâtre		93.00
56.00	Formation du gypse, première masse	[Lithologie]	Gypse		69.00
61.50	Marnes d'entre-deux masses	[Lithologie]	Marne à gypse fer de lance	Auversien	63.50
70.00	Formation du gypse, deuxième masse	[Lithologie]	Gypse		55.00
74.80	Marnes à Lucines	[Lithologie]	Marne gypseuse		50.20
76.00	Formation du gypse, troisième masse	[Lithologie]	Gypse et marne		49.00

BSS000PKUH
01841X0240/PIF114
Log validé

Profondeur	
De 0.0	à 56.0 m [Rafraîchir]

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
13.00	Marnes et masses du gypse	[Lithologie]	Remblai en surface, puis marne blanche à grise, beige, remaniée au sommet (colluvions)	Priabienien	62.00
18.70	Marnes à pholadomya ludensis	[Lithologie]	Marne gypseuse grise à beige		56.30
20.40	Formation du gypse quatrième masse	[Lithologie]	Gypse ?	Marinésien	54.60
22.20	Sables de Monceau (sables d'Argenteuil)	[Lithologie]	Sable moyen à grossier grisâtre argileux		51.00
24.00	Calcaire de Saint-Ouen	[Lithologie]	Calcaire blanc et beige, pouvant être silicifié, et marne blanche, beige		49.00
26.00	Formation de Mortefontaine	[Lithologie]	Niveau équivalent à l'horizon de Mortefontaine/Ducy ?	Lutétien supérieur	47.70
27.30	Sables d'Ézainville	[Lithologie]	Argile sableuse verdâtre. Formation d'Ézainville ?		41.20
33.80	Sables d'Auvers-Beauchamp s.l.	[Lithologie]	Sable fin, parfois moyen, plus ou moins argilo-mameux gris, gris verdâtre, à niveaux gréseux possibles	40.30	
34.70	Marnes et caillasses lutétiennes	[Lithologie]	Calcaire crème à grisâtre, beige, pouvant être dolomitique, intercalé de marne	39.60	
35.40				38.60	
36.40				37.90	
37.10				36.80	
38.20				36.10	
38.90				32.80	
42.20				30.00	
45.00				28.00	
47.00				25.60	
49.40					
56.00					19.00

▲ Fig. 15. Coupes géologiques traversant les principales masses gypsifères, à lire en fonction de leur altitude (source : BRGM).

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
			Avant puits, maçonné, diam 1,50 m		
5.45	Calcaire de Brie	○ ○ ○ ○ ○ ○	Rognons de calcaire jaune et veine noirâtres avec des petites couches d'argile jaune	Sannoisien	92.55
6.63					
12.15 12.45	Argile verte de Romainville	⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈	Marne verdâtre compacte		85.85
			Marne verdâtre compacte et plus dure		85.55
			Marne verdâtre compacte tendre et feuilletée		83.45
			Marne verdâtre compacte plus ferme et ménage de gypse		82.80
22.20 23.58	Marne de Pantin	⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈	Marne blanchâtre gypseuse, alternativement compacte et tendre		75.80
					74.42
					71.50
31.05 32.40 32.95 33.15 33.55	Marnes bleues d'Argenteuil	⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈	Marne bleue moyenne dureté, très compacte		66.95
			Marne gris brun, très compacte	65.60	
			Marne grise très compacte	64.85	
			Marne jaune très ferme avec des plaquettes de 5 à 6 cm d'épaisseur très dures	64.45	
			Marne blanche et plaquettes très dures	63.98	
			Roche de calcaire très dures	62.74	
			Marne blanche très ferme	61.88	
			Roche de calcaire blanc très dur	60.97	
37.03 37.72 38.22 38.53 39.76	Calcaire de Champigny	⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈	Roche excessivement dure, calcaire blanc silicieux	60.97	
			Marne verte, un peu foncé, plaquettes de calcaire silicieux	60.28	
			Marne blanc verdâtre plus dure que la précédente	59.78	
			Marne blanc verdâtre	59.78	
			Marne blanc verdâtre plus tendre	59.78	
			Calcaire silicieux dur	59.47	
			Marne grise avec des petits rognons calcaires gris, très fin	59.47	
			Marne grise avec de gros rognons de calcaires gris, fissuré, avec des silex en géodes	58.24	
				Priabienien	

▲ Fig. 16. Coupe lithostratigraphique, Est parisien (source : BRGM).

En revanche, toutes les argiles présentent un *gonflement interparticulaire* qui résulte de l'acquisition d'eau entre les plaquettes. La configuration de ces dernières les unes par rapport aux autres contrôle la cohésion de l'argile et sa capacité à absorber l'eau.

Le groupe de l'illite, dont l'épaisseur foliaire est de 10 Å, comprend notamment la glauconite et les hydromicas. Il est assez proche des argiles smectites mais comporte des ions K+ entre les feuillets.

Enfin, les chlorites ne sont pas des argiles mais des phyllosilicates trioctaédriques qui possèdent chimiquement les mêmes feuillets que le talc : $Mg_6(Si_8O_{20})(OH)_4$. Sur le plan structural, elles sont plus proches des micas : $Y_6(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4$.

Les principales espèces sont :

- le talc-chlorite ;
- la pennine (minéral intermédiaire entre le précédent et le suivant) ;
- le clinochlore ;
- la corundophyllite.

Mais ces phyllosilicates trioctaédriques sont reliés par une couche de composition $Mg_6(OH)_4$: la structure de la brucite. En pratique, cette dernière est parfois incomplète et provoque un apport d'eau. Ainsi, les masses argileuses mélangées à plus de 15 % de chlorite peuvent être gonflantes. C'est le cas d'édifices interstratifiés formés avec l'illite, la montmorillonite et la vermiculite (qui gonfle lorsqu'elle est chauffée). Verdâtres à brunâtres, les chlorites sont des minéraux de basse température. Elles sont classiquement produites :

- par l'altération hydrothermale des roches ferromagnésiennes d'origine ignées ;
- par métamorphisme régional de sédiments argileux.

En géotechnique, on définit un sol argileux par sa granulométrie inférieure à 2 µm. Mais il est rare d'observer une argile absolument pure du point de vue granulométrique comme du point de vue minéralogique. En effet, les sols habituels forment des mélanges granulométriques et minéralogiques. C'est pourquoi la caractérisation pratique des sols argileux gonflants est plutôt réalisée par des essais géomécaniques. L'impact du RGA (retrait gonflement des argiles) est conséquent (voir fig. 19) et ne cesse d'augmenter avec le dérèglement climatique, une évolution relayée dans la communication des assureurs.

REMARQUE

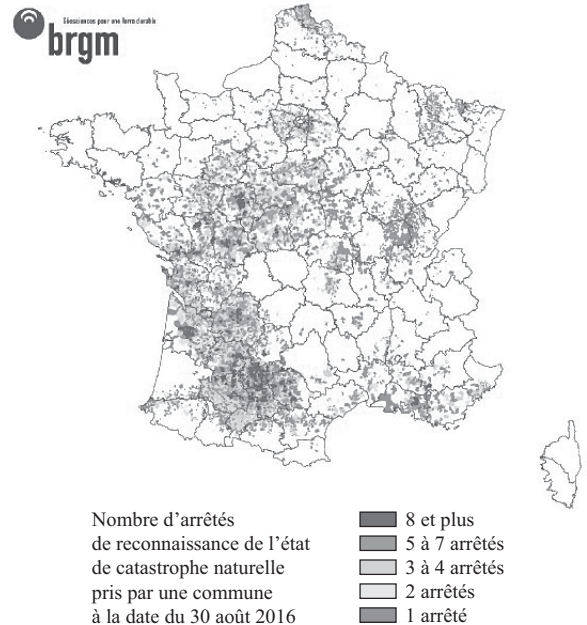
- Le système racinaire d'un arbre planté dans une argile gonflante agit comme une pompe qui attire l'eau et provoque un soulèvement du sol.
- Sur les sols gonflants, il est conseillé de ceinturer le bâtiment par une bande imperméable tout en éloignant les racines proches. D'une manière générale, la variation de la teneur en eau est à éviter absolument sous l'emprise du bâtiment et à son voisinage direct.

EXEMPLE

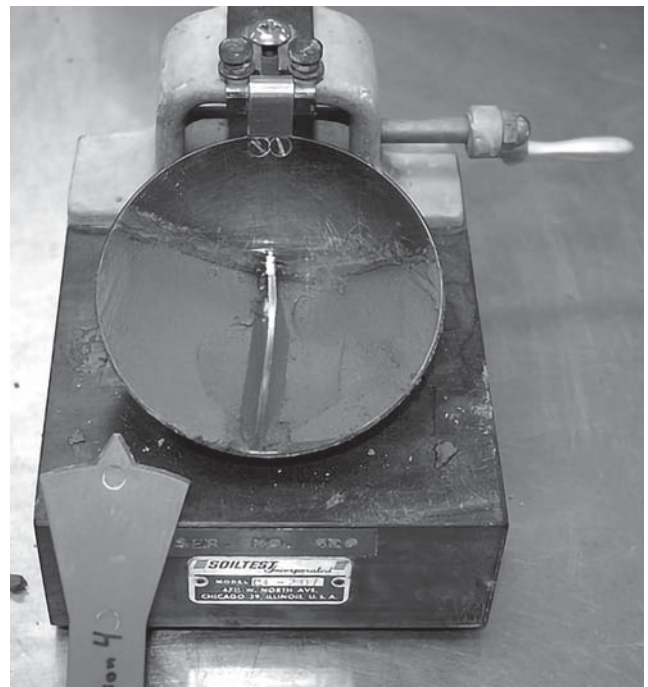
Essais géomécaniques : la détermination des limites d'Atterberg

La limite de liquidité s'obtient à partir d'une boîte de Casagrande (photo 16). On trace une rainure dans l'argile placée dans une coupelle,

où elle subit des chocs. Il s'agit alors de compter le nombre de chocs suffisants pour refermer la rainure. La limite de plasticité s'obtient en roulant un cylindre d'argile de plus en plus fin jusqu'à ce qu'il se fissure une fois surélevé en son centre.



▲ Fig. 19. Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols (source : BRGM).



▲ Photo 16. Boîte de Casagrande (source : Georgia Tech).

3.4.2 | Impact du bâtiment

Il exerce une contrainte sur le sol dont il modifie le comportement. L'eau capillaire piégée au droit de l'emprise tendra à se concentrer. De même, la pression fera remonter une nappe profonde de quelques mètres. Elle produira la migration des poches d'eau saisonnières de la périphérie vers le centre en formant une zone humide au bout de quelques années.

Par conséquent, même si les argiles gonflantes sont réparties de façon homogène sous le bâtiment, le soulèvement du sol va décroître du centre aux coins. Quant à l'enveloppe, elle sera soumise à un mouvement différentiel entre les coins, plus sensibles aux variations pluviométriques, et le reste de la périphérie.

Ainsi, les tassements différentiels évolueront :

- de manière saisonnière au droit de l'enveloppe ;
- dans les 5 premières années entre le centre et la périphérie de la structure.

Quant au bâtiment, il réagit en fonction de ses points d'appui sur le sol qui dépendent du type de fondations superficielles. Les fissures observées sur l'enveloppe expriment des mouvements de :

- cisaillement ;
- traction ;
- flexion.

Leur épaisseur est proportionnelle à l'intensité du soulèvement. D'autres indices permettent d'évaluer cette intensité :

- le coïncement des baies ;
- la rupture des canalisations ;
- des déformations ou des destructions.

REMARQUE

Le saviez-vous ?

Lorsque les canalisations se rompent et occasionnent une fuite, les assureurs considèrent fréquemment par défaut cette dernière comme la cause des affaissements si l'état de catastrophe naturelle n'a pas été officialisé par un arrêté applicable au site.

De la maison individuelle au bâtiment R+2, il existe différentes techniques de construction en fonction de l'intensité du gonflement :

- semelles superficielles sur remblai total ou partiel avec ou sans vide sanitaire ;
- semelle semi-superficielle rigidifiée ;
- fondations profondes.

Lorsque le bâtiment est déjà construit, les micropieux, plus flexibles en termes d'exécution, sont souvent mis en œuvre (photo 17). Toutefois, les techniques de confinement (coupure étanche) ne sont pas à exclure sans connaître précisément le terrain.



▲ Photo 17. Flexibilité de la solution par micropieux (source : GTS).

3.5 | Schistes-carton

Il s'agit de roches à l'aspect feuilleté (schistes) et de consistance cartonneuse d'origine sédimentaire et de composition essentiellement marno-calcaire. Ils présentent souvent des traces de matière organique sous forme bitumineuse et pyritique.

Ces schistes s'altèrent en une marne interstratifiée et plastique qui intègre un véritable cocktail minéralogique et cumule :

- les pathologies relatives aux argiles gonflantes ;
- les pathologies associées à la pyrite, à l'anhydrite et au gypse.

L'altération se produit en deux phases, chacune à l'origine d'un gonflement. Il ne s'agit toutefois pas d'un mécanisme de retrait-gonflement car la roche ne retrouve jamais son volume initial.

3.6 | Nappes souterraines

3.6.1 | Quelques définitions

On compte deux grands types de réservoirs :

- les roches meubles comme le sable : l'eau s'y déplace en circulant entre les grains ;
- les roches affectées par une tectonique cassante : les différentes cassures forment des familles qui s'entrecroisent pour former un réseau de vides interconnectés. Les contraintes tectoniques qui s'appliquent sur des roches souples provoquent des plis plutôt que des accidents cassants. Par conséquent, les aquifères sont en majeure partie formés de roches compactes lorsqu'elles sont consolidées. La dissolution des calcaires augmente les vides (aquifères karstiques).

Lorsque des réservoirs différents se superposent, ils définissent un aquifère multicouche.

Par ailleurs, un réservoir est limité à sa base par un niveau imperméable. Lorsqu'il n'est pas limité en hauteur par un second niveau imperméable, sa nappe est dite « libre ». Dans le cas contraire, elle est « captive ». Si le perçage du niveau sommital imperméable provoque une remontée de nappe à une altitude supérieure, alors la nappe est dite « artésienne ». Lorsque la nappe circule au sein d'un relief comme une colline, on parle de « nappe perchée ». Une nappe d'eau peu profonde accessible aux puits est appelée « nappe phréatique ».

Enfin, une nappe est dite « alluviale » lorsqu'elle circule dans les alluvions. Lorsqu'une rivière est connectée à une nappe d'eau souterraine, on parle d'un « système global aquifère/rivière ».

3.6.2 | Impact des nappes sur les constructions

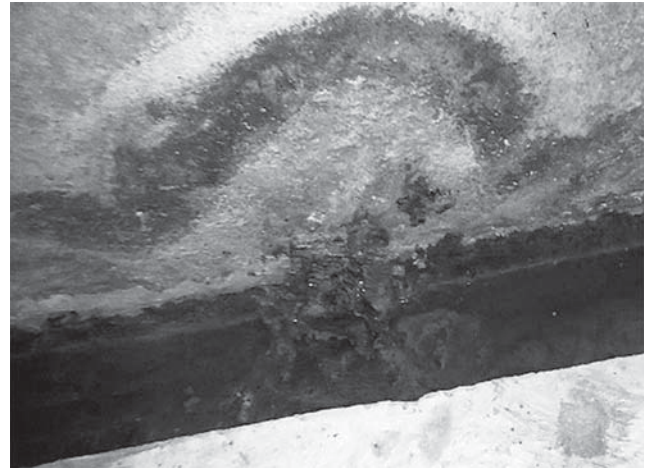
Le voile des parkings souterrains dans lesquels l'action de la nappe a été sous-évaluée présente progressivement des symptômes caractéristiques :

- le taux d'humidité grimpe au sein du voile ;
- des coulées et des fissures apparaissent ;
- le ferrailage s'oxyde en augmentant de volume puis fait éclater le béton ;
- la résistance de la paroi se dégrade ;
- la contrainte latérale exercée par la nappe finit par provoquer une concavité (cas de la photo 18) ;
- si la structure du voile est porteuse, des fissures apparaissent en haut du bâtiment, puis leur intensité décroît avec les étages ;
- lorsque l'équilibre de l'édifice est vraiment remis en cause, des fissures à 45° d'effort tranchant apparaissent sur les poutres qui fléchissent.



▲ Photo 18. Corrélation entre humidité et résistance mécanique dans un voile rendu concave par la pression de la nappe (source : CJR Audits).

Dans le cas des remontées de nappe ou de poches, l'eau s'écoule préférentiellement en pied de voile (photo 19).



▲ Photo 19. Écoulements en pied de voile (source : CJR Audits).

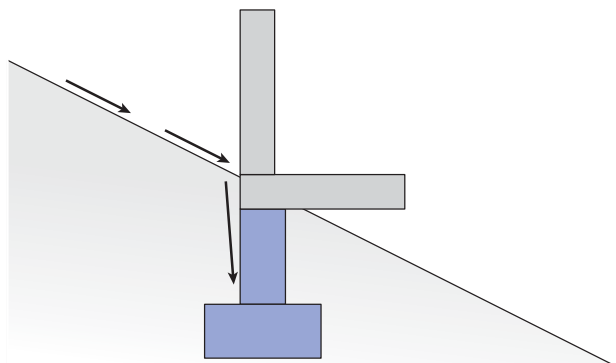
Enfin, il arrive que des poches d'eau intermittentes provoquent des dommages périodiques soit par remontée, soit lorsqu'une argile gonflante forme la base d'une nappe phréatique (photo 20).

Profondeur	Formation	Lithologie
—1,00	Limon des vallées	[Lithologie Limon des vallées]
—2,00	Sables d'Auteuil	[Lithologie Sables d'Auteuil]
	Argile plastique	[Lithologie Argile plastique]

▲ Photo 20. Fissures de traction au droit d'une nappe phréatique reposant sur une argile gonflante (source : CJR Audits).

3.7 Ruissellements en bas de pente

En s'accumulant en pied d'enveloppe, ces ruissellements peuvent s'infiltrer sous les fondations et modifier la résistance du sol. Il convient de placer un drain périmétrique pour écarter le danger.



▲ Fig. 20. Schéma représentant le ruissellement en bas de pente (source : CJR AUDITS).

3.8 Glissements de terrain

Une masse minérale glisse par gravité le long d'une surface de rupture. Les paramètres sont :

- son poids ;
- les frottements ;
- l'inclinaison de la surface de rupture ;
- un élément déclencheur.

À la base de la surface de rupture se trouve une « couche savon », autrement dit une couche glissante. Il s'agit en général d'un niveau essentiellement argileux.

3.8.1 Solifluxion

Le glissement est dû à l'action de l'eau qui alourdit le sol et s'infiltré jusqu'à la couche savon. Dans le cas des Antilles, les sols sont souvent composés d'un tuf perméable. Il provient des projections volcaniques déposées sur les pentes recouvertes d'une argile rouge d'altération. Cette dernière devient glissante par accumulation de l'eau après de fortes pluies consécutives à une période de sécheresse. Sur certaines zones, les loupes d'arrachement sont corrélables avec des failles importantes. Dans ce cas, le facteur déclencheur peut être d'origine tectonique et non uniquement climatique.

Le mouvement débute souvent par des épisodes périodiques de fluage, c'est-à-dire par un détachement progressif de quelques millimètres par an. Ils finissent par former un bourrelet en aval du terrain et une niche de décollement en amont. À terme, le phénomène peut déclencher des coulées de terre (glissements-coulée) ou des coulées boueuses.

3.8.2 Glissements à grande échelle

Une cassure tectonique (diacalse, faille) ou un plan de stratification peut produire un « effet toboggan » à grande échelle (photo 21). Le plan de rupture peut également présenter une géométrie circulaire et une cinématique plus rotationnelle.

En raison des forces en jeu, ce type de phénomène, qui n'est pas sans rappeler une avalanche, peut se produire brutalement. Au contact d'un cours d'eau, l'énergie cinétique peut déplacer des masses d'alluvions importantes et provoquer des inondations.

D'une manière générale, les événements brutaux sont associés à un facteur déclenchant :

- séisme ;
- travaux ;
- érosion ;
- glissements de terrain ;
- apport brutal d'eau.



▲ Photo 21. Glissement de terrain à grande échelle (source : Mickaël Langlais, ISTerre, Université Grenoble Alpes).

3.9 Chutes et éboulements produits par l'érosion

Au sein des carrières souterraines et des cavités rocheuses naturelles, l'altération est principalement le fruit des circulations d'eau.

3.9.1 Effets climatiques

En surface, les agents météoriques agissent de façon mécanique et chimique. En particulier, la pluie agit par :

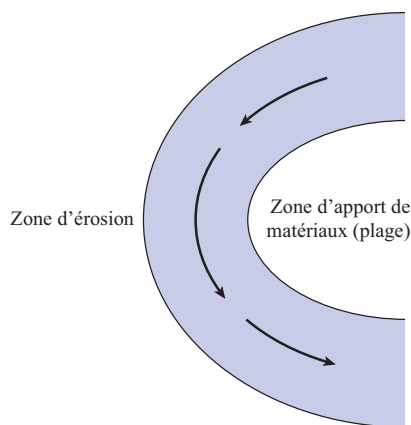
- impact ;
- gélifraction ;
- altération.

Se débitant préférentiellement en pavés, les roches compactes sont plus vulnérables à l'érosion mécanique. L'eau infiltrée gèle et son volume augmente de 6 à 8 fois, faisant éclater les cassures tectoniques de la roche. Les pavés ou les plaquettes peuvent alors se désolidariser du reste de l'affleurement.

3.9.2 | Érosion en pied d'affleurement

Elle est produite par :

- les agents météoriques ;
- l'action marine en pied de falaise (fig. 21) où les embruns exercent une action chimique agressive. Les caps, en particulier, subissent l'action mécanique et chimique des vagues – alors que les baies reçoivent des matériaux et forment des plages. La falaise se creuse et forme un aplomb. Son sommet n'est plus soutenu et finit par s'effondrer, faisant reculer le trait de côte. La montée du niveau des mers et des océans intensifie ce phénomène ;
- l'action des cours d'eau : l'érosion mécanique s'exerce le long des rives dans la concavité des méandres (alors que leur convexité est le siège de dépôts). La force ainsi produite résulte de l'apport du bassin versant amont sous forme de ruissellement. C'est pourquoi l'imperméabilisation non compensée des sols agit sur cette forme d'érosion.



▲ Fig. 21. Écoulement différentiel du courant dans un méandre provoquant des dépôts dans la convexité (plages, placers) (source : CJR AUDITS).

3.10 | Indices de reconnaissance *in situ* des mouvements du sol

Les indices suivants doivent alerter :

- bourrelets et niches d'arrachement ;
- pente en marche d'escalier ou contre-pentes ;
- escarpement circulaire ;
- fissures parallèles légèrement circulaires ;
- forte hétérogénéité topographique ;
- fond de vallée au relief atypique ;

- stagnation d'eau ;
- absence de végétation orientée ;
- remontées d'eau ou infiltration localisée avec hétérogénéité de la végétation ;
- troncs inclinés, arrachement racinaire ;
- anomalies dans les écoulements.

3.11 | Ravinement

Il s'agit d'un lessivage intensif du sol produisant un creusement irrégulier de la parcelle sous la forme de petits thalwegs.

Ce phénomène est favorisé par :

- l'absence de végétation ;
- l'augmentation du ruissellement (suite à une imperméabilisation du sol, par exemple) ;
- la violence du ruissellement associé à l'intensité des précipitations.

3.12 | Sédiments thixotropes

Saturés en eau, ces sédiments deviennent liquides jusqu'à présenter un risque d'enlèvement. C'est le cas de la tange localisée sur les côtes de la Manche. Elle est formée d'un mélange de :

- sable ;
- limon ;
- fragments calcaires très fins (jusqu'à 50 %).

3.13 | Hétérogénéité du sous-sol

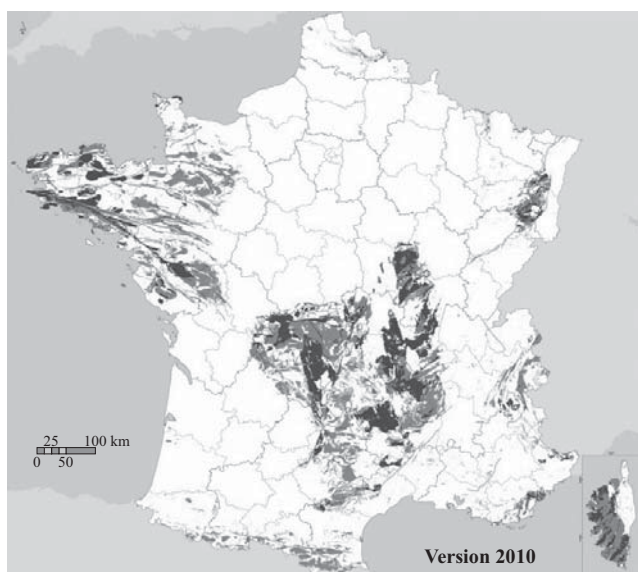
Une faille, une formation lenticulaire, des variations latérales de faciès géologiques impactant la géomécanique locale peuvent figurer au droit de l'emprise d'un projet et provoquer les tassements différentiels du bâtiment. La représentativité des sondages géotechniques ne devrait pas systématiquement être tenue pour acquise. De même, une carte géologique ne présente qu'une pertinence à son échelle et non à l'échelle inférieure.

3.14 | Inondabilité des sols

Il s'agit d'une caractéristique associée au comportement hydrodynamique d'un système hydrologique. L'étude géomorphologique de ce dernier permet donc d'en évaluer le risque plus que la courte mémoire humaine des sinistres enregistrés. La géologie du site complète cette étude en établissant l'occurrence d'inondations répétées au fil du temps.

3.15 Radon (Rn)

Il s'agit d'un gaz provenant de la désintégration du radium radioactif. Ce dernier compose les pechblendes, un minéral noir plutôt endogène présent dans les pegmatites granitiques (granites à gros cristaux) et dans les filons hydrothermaux. Il est également associé à l'uranium 238 dont il est le 5^e élément dans la chaîne de désintégration. Le risque est donc localisé dans les zones cristallines (essentiellement les massifs anciens de l'ère primaire), c'est-à-dire non sédimentaires (fig. 22).



Projection Lambert-93
Fonds cartographiques
BD ROUTE 500 - IGN
Les contours des polygones
proviennent de la carte géologique au 1/1 000 000
du BRGM (6^e édition, révisée 2003)

Potentiel radon
 ■ Faible
 ■ Moyen
 ■ Élevé



▲ Fig. 22. Carte du potentiel radon des formations géologiques à l'échelle 1:1 000 000 (source : IRSN).

3.16 Risque sismique et volcanique

Les zones à risque sismique sont connues (fig. 23). Le phénomène est régi par la tectonique des plaques. Les normes parasismiques encadrent la construction. Toutefois, en matière sismique et volcanique, seule la surveillance permet l'anticipation.



Intensité maximale

- III - Ressenti par certains
- IV - Ressenti par la plupart, objets vibrent
- V - Frayeur, chutes d'objets
- VI - Dégâts légers (fissuration plâtres)
- VII - Dégâts (chut cheminées, fissures murs)
- VIII - Dégâts importants (effondrements murs)
- IX - Destructures

▲ Fig. 23. Distribution et intensité des épicentres en France métropolitaine et en Martinique (source : BRGM).

4 Conclusion

En décembre 1995, l'effondrement des immeubles situés rue Papillon (Paris IX^e) a d'abord été associé à une zone de dissolution de gypse puis à l'existence d'un ancien puits. Cependant, c'est le passage du tunnelier dans le cadre du projet Éole⁽⁶⁾ prolongeant la ligne E du RER qui déclenche le sinistre par les vibrations engendrées. Cet événement montre à quel point la connaissance des pathologies du sol et du sous-sol à l'échelle de la parcelle est tributaire d'une véritable

⁽⁶⁾ Ce projet et ses risques nous ramène à l'expropriation des tréfonds. Sortant du dédommagement par le franc symbolique, Lassalle pose les premières bases d'une modélisation de la valeur du tréfonds [11]. Puis, Guillermain et Demanche tentent de préciser ce modèle [12]. En dépit de la méthode plus récente et plus généreuse de l'expert Pinchon, leur version est généralement retenue, quoique sous forme tronquée, pour évaluer la valeur vénale d'un tréfonds lors d'une expropriation. Mais, incomplète et peu rigoureuse, elle n'est applicable que dans des cas particuliers. De plus, elle n'est pas fondée sur une véritable réflexion abordant les facteurs de la valeur. Les bases cohérentes et applicables de l'évaluation du tréfonds (hors mines) restent donc encore à poser alors que des sommes conséquentes sont parfois en jeu.

prospection mémorielle et documentaire préalable aux forages de reconnaissance⁽⁷⁾.

Investissant la toile au siècle dernier, les systèmes d'information géographiques (SIG) ont révolutionné l'ingénierie en géosciences. Certains d'entre eux permettent de corréler simplement des données géolocalisées de divers horizons. C'est le cas du portail InfoTerre du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), du Géoportail de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) ou des systèmes d'information pour la gestion des eaux souterraines (Siges).

Mais InfoTerre ne dispose pas de toutes les données. Citons notamment la géolocalisation des carrières souterraines détectées par l'Inspection générale des carrières (IGC) en Île-de-France.

Par ailleurs, des systèmes collaboratifs appliqués aux SIG commencent à émerger. Ainsi, l'Observatoire national des bâtiments (ONB) exploite la base de données nationale de l'Inventaire multi-objets des bâtiments (Imope) et propose aux professionnels un travail participatif. La communauté des utilisateurs de Géoplateforme (IGN) et le projet « Clés de sol » du groupement d'intérêt scientifique (GIS) Sol de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) suivent la même démarche.

Quant au Laboratoire d'initiatives foncières et territoriales innovantes (Lifti), il réalise depuis 2016 un travail collaboratif tourné vers l'ouverture et l'utilisation des données foncières. Il associe ainsi les bonnes volontés publiques et privées tournées vers l'intérêt collectif. Globaliste, il s'intéresse aussi bien aux facteurs de la valeur qu'aux données techniques. Derrière le terme « foncier » se cache, en effet, l'article 552 du Code civil selon lequel « La propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous. [...] » Les données du bâtiment y sont donc également exploitées.

Enfin, l'exercice de l'expertise en pathologies naturelles et anthropiques du foncier montre à quel point les propriétaires et copropriétaires sont généralement dépossédés de leur patrimoine documentaire. Si toute copropriété doit posséder un carnet d'entretien à jour, combien d'entre elles détiennent-elles un plan de fondation ou une étude de sol ? Autant d'informations qui pourraient être archivées et disponibles en ligne afin d'améliorer l'étude des pathologies du sol. Plus généralement, la chronologie de certains événements pourrait être consignée : la date des premières fissures, la pluviométrie à cette époque, la date de travaux voisins, celle des premières inondations du sous-sol, etc. De même, si les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) font l'objet des pro-

tocoles spécifiques aux grandes pathologies anthropiques, le suivi géochimique des sols communs pourrait être généralisé et accessible.

5 Références

- [1] NF X 31-620-1 (décembre 2021 – indice de classement : X 31-620-1) : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 1 : exigences générales.
- [2] NF X 31-620-2 (décembre 2021 – indice de classement : X 31-620-2) : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 2 : exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle.
- [3] NF X 31-620-3 (décembre 2021 – indice de classement : X 31-620-3) : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 3 : exigences dans le domaine des prestations d'ingénierie des travaux de réhabilitation.
- [4] NF X 31-620-4 (décembre 2021 – indice de classement : X 31-620-4) : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 4 : exigences dans le domaine des prestations d'exécution des travaux de réhabilitation.
- [5] NF X 31-620-5 (décembre 2021 – indice de classement : X 31-620-5) : Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués – Partie 5 : exigences pour la réalisation des attestations de prise en compte des mesures de gestion de la pollution des sols et des eaux souterraines dans la conception des projets de construction ou d'aménagement.
- [6] Centre toulousain pour le contrôle de qualité en biologie clinique (CTCB), « Fiche technique bactériologie ».
- [7] IGN Geofla, Projet ANR Patho-RMQS, 2008.
- [8] Institut français du pétrole (IFP), *Formulaire du Foreur*, Éd. Technip, 1978.
- [9] Arrêté du 7 décembre 2020 de la préfecture du Bas-Rhin ordonnant l'arrêt définitif des opérations de forages géothermiques, de stimulation hydraulique des puits et de tests de la société Fonroche Géothermie sur le ban de la commune de Vendenheim, *Recueil des actes administratifs de la préfecture*, n° spécial du 8 décembre 2020.
- [10] Ampuero (Jean-Paul), Audin (Laurence), Bernard (Pascal), Brenguier (Florent), Delouis (Bertrand) *et al.*, « Rapport d'évaluation du groupe de travail (GT) CNRS-Insu sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles », Rapport de recherche, Institut national des sciences de l'univers (Insu), 17 décembre 2019.
- [11] Lassalle (Jacques), « Rapport d'expertise », CA Paris, chambre des appels d'expropriation, 21 janvier 1972 et 29 mars 1972, RATP c/ L. Bayle, 25 mars 1973.
- [12] Guillermain (Philippe) et Demanche (Patrick), « Avis sur la méthode d'évaluation de la valeur du tréfonds (faux titre) », TGI Paris, chambre des expropriations, avril 1995.

(7) De même, les plans de prévention du risque inondation (PPRI) en zones montagneuses se fondent davantage sur la mémoire humaine que sur les études géomorphologiques. Cette approche restrictive peut empêcher l'anticipation de sinistres sur des zones où les preuves géologiques d'antécédents existent.