



GUIDE

Ineris 17-164710-03375A

Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol

**Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain
de type affaissement et effondrement**

Ce document s'inscrit dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics de l'Ineris intitulé « Analyse, prévention et maîtrise des risques mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables ». Pour le Cerema, il s'inscrit dans le cadre de l'opération de recherche PRECAS (Prévention du Risque d'Effondrement des Cavités Souterraines). Cette action est conduite par ces deux entités pour le BRNT/SRNH (Bureau des Risques Naturels Terrestres au sein du Service des Risques Naturels et Hydrauliques) de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques).

Il a été établi sur la base de l'expérience respective de l'Ineris et du Cerema et des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives au sein des deux organismes. Il a fait l'objet d'une relecture par des administrations, professionnels et collectivités susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent document intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Rédacteurs :

- Arnaud Charmoille, Amélie Lecomte (Ineris)
- Charles Kreziak (Cerema)

Avec la contribution de :

- Florence Carré, Xavier Daupley, Jean-Marc Watelet (Ineris)
- Marina Cerno Rauch (IGC)
- Sandrine Fauchet, Stéphanie Mahé (MEEM - DGPR)
- Jeanne Sylvine Guedon (IFFSTAR)
- Nathalie Marcot (BRGM PACA)
- Grégoire Priol (SGP)
- Émilie Thiébaud (Cerema)

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
2. PRÉSENTATION DU CONTEXTE DE DISSOLUTION DU GYPSE	9
2.1 Le gypse : définition et processus de formation	9
2.2 Pétrologie	10
2.3 Les gisements de gypse	10
2.4 La dissolution du gypse	12
2.5 De la dissolution à l'apparition de désordres	12
3. CONNAISSANCE DE L'ALÉA	20
3.1 L'aléa : définition et spécificités liées à la dissolution du gypse	20
3.2 Principes généraux de la démarche d'évaluation de l'aléa	20
3.3 Données nécessaires pour évaluer l'aléa	21
3.4 Tableaux de croisement utilisés pour évaluer l'aléa	24
4. GESTION DU RISQUE	27
4.1 Risques : définition et évaluation	27
4.2 Les mesures de prévention	27
4.3 Les mesures de protection	28
4.4 Récapitulatif des moyens de prévention et des méthodes de traitement	33
5. CONCLUSION	35
6. GLOSSAIRE	36
7. BIBLIOGRAPHIE	37

1

INTRODUCTION

Le territoire français est exposé aux risques de « mouvements de terrain » dont certains sont liés à la dissolution du gypse. Les phénomènes de dissolution se développant dans le sous-sol entraînent une altération des propriétés du massif rocheux. Ces altérations peuvent conduire, à terme, à la formation de cavités et *in fine* à l'apparition d'effondrements en surface, phénomènes difficilement prévisibles et potentiellement dangereux pour les personnes et les biens.

Ce guide est destiné aux acteurs de la gestion des risques naturels confrontés à la présence de gypse sur leur territoire. Il fournit les clés de la compréhension des mécanismes hydrauliques, chimiques et mécaniques mis en cause et propose des outils méthodologiques adaptés à la gestion de cette problématique. Ce document explique en outre les spécificités inhérentes au contexte de dissolution du gypse depuis les processus de création des vides jusqu'à leur évolution vers un désordre en surface.

Le présent guide est principalement basé sur les travaux d'expertise réalisés par l'Ineris et le Cerema depuis plusieurs années dans différentes régions du territoire français. Il bénéficie aussi de l'avancement d'un certain nombre de travaux de recherche toujours en cours qui ont permis de mieux apprécier les contextes, la cinétique et les mécanismes géotechniques d'apparition des mouvements de terrain.

Il est important de noter que ce document traite exclusivement des mouvements de terrain de type effondrement et affaissement liés à la dissolution du gypse. Les phénomènes de glissements de terrain qui pourraient se produire dans les zones de versants et qui sont la conséquence de mécanismes particuliers ne rentrent pas dans le champ de ce guide.

2

PRÉSENTATION DU CONTEXTE DE DISSOLUTION DU GYPSE

2.1. Le gypse : définition et processus de formation

2.1.1. Minéralogie et caractéristiques

De la famille des **évaporites**, le gypse est le minéral sulfaté le plus commun rencontré dans le sous-sol. Ce minéral a une dureté de 1,5 à 2 sur une échelle de 10, ce qui en fait un minéral tendre : il se raye à l'ongle. Il est composé d'ions sulfate et calcium associés à deux molécules d'eau donnant la formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$. Sa densité est de 2,3. On le trouve également sous sa forme déshydratée, l'anhydrite de formule CaSO_4 . Il n'est pas rare que les roches sulfatées soient composées d'un assemblage de gypse et d'anhydrite en proportions variables.

2.1.2. Formation et conditions de sédimentation

Le mécanisme de formation par cristallisation des minéraux gypseux est chimique. Ce processus se produit en environnement marin sous des climats où l'évaporation est importante. Il peut exister en milieu continental mais

une connexion épisodique avec la mer est nécessaire. La réaction de précipitation a lieu dans des bassins étendus et peu profonds plus ou moins bien connectés avec la mer (Figure 1).

La forte évaporation de l'eau dans ce type de milieu engendre la précipitation des ions présents en solution dans l'eau. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apparaît en deuxième (après les carbonates) puis lorsque le volume de l'eau de mer n'est plus que de 35 % (Boulvain, 2011) à 20 % (Charola, 2007) du volume initial, l'anhydrite (CaSO_4) précipite. Elle est suivie du sel (NaCl) lorsque le volume de l'eau n'atteint plus que 10 % du volume de départ (Boulvain, 2011). La séquence de sédimentation par évaporation type avec une faible « tranche d'eau » (si les conditions climatiques restent constantes suffisamment longtemps) est donc, en théorie, formée d'un niveau de calcaire, puis de gypse surmonté d'un niveau d'anhydrite puis éventuellement de sel (Figure 2). Ceci implique également que, durant toute cette séquence de sédimentation, aucun nouvel apport d'eau n'a eu lieu en provenance de la mer ou du continent.

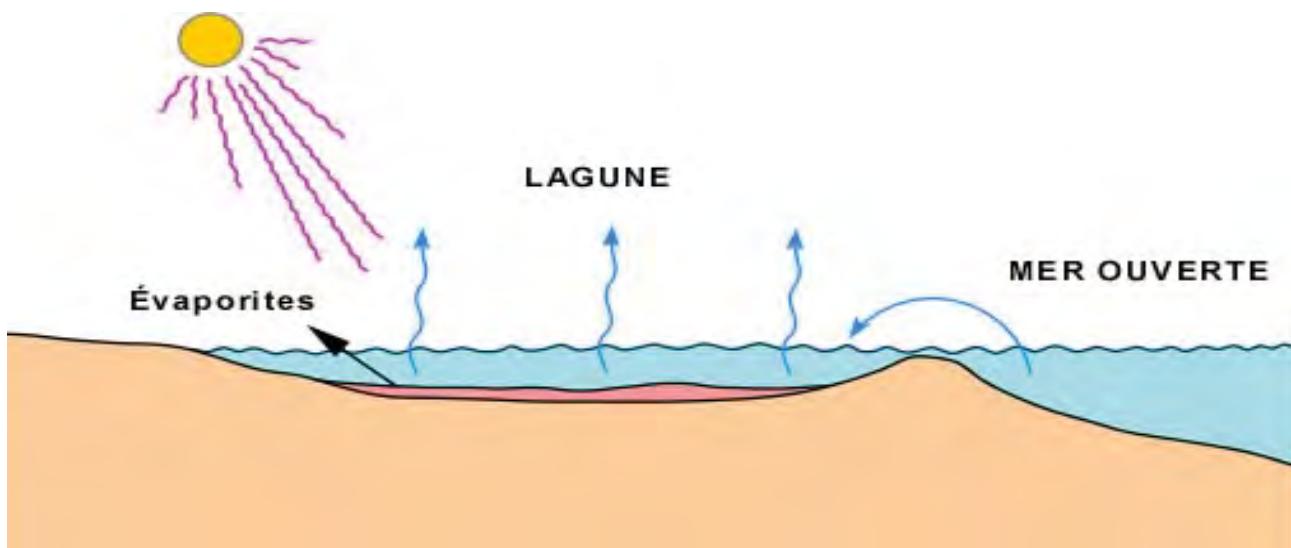


Figure 1 : schéma explicatif de la formation des dépôts évaporitiques (source : www.ggl.ulaval.ca)

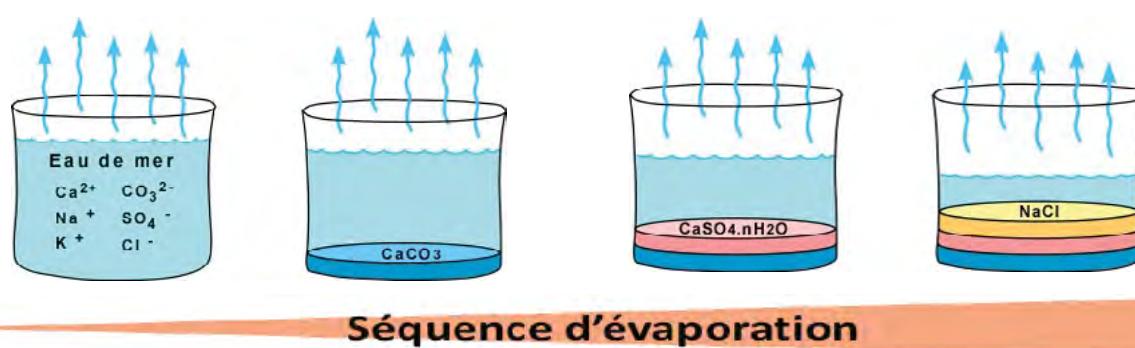


Figure 2 : les principaux minéraux de la séquence évaporitique (source : www.ggl.ulaval.ca)

On constate souvent que cette séquence complète est rarement réalisée et qu'il est fréquent d'en trouver des répétitions ou des cycles tronqués ou inversés par le jeu de la tectonique. Des couches sédimentaires de gypse plus ou moins épaisses peuvent ainsi se former, contenant souvent des intercalaires de niveaux de marnes ou de calcaires caractéristiques des variations des conditions de dépôt au cours du temps et d'apports marins ou continentaux.

2.2. Pétrologie

Le classement du gypse dans les roches évaporitiques ne doit pas occulter le fait que sa formation peut également avoir une origine métamorphique, par hydratation de l'anhydrite. Il peut aussi être cristallisé comme produit de réactions géochimiques lors des processus diagénétiques.

Les roches gypseuses peuvent se rencontrer sous des faciès variés. Ces faciès dépendent des modalités de formation des minéraux gypseux et de leur histoire géologique. Les formes de dépôt du gypse les plus courantes sont le gypse saccharoïde qui correspond à des roches à aspect de sucre (Figure 3) et le gypse albastroïde à aspect blanc laiteux (Figure 4) présentant de larges plages de cristaux et microcristaux *automorphes*, ces derniers pouvant être rencontrés ponctuellement en « pied d'alouette » ou encore « fer de lance » (Figure 5). À noter également que le gypse peut être mélangé à d'autres roches sédimentaires, comme par exemple les argiles ou les calcaires.



2.3. Les gisements de gypse

Les formations gypseuses peuvent être présentes dans tous les terrains sédimentaires du globe mais les grands gisements sont localisés soit au niveau de complexes évaporitiques régionaux étendus, soit au niveau de zones restées géologiquement stables pendant de longues périodes.

Les pays qui disposent dans leur sous-sol de vastes gisements sont : les États-Unis, le Canada, l'Australie, l'Espagne, la France, l'Italie, notamment en Toscane et en Sicile, la Grande-Bretagne, notamment en Angleterre par exemple dans le Yorkshire du Nord, l'Allemagne, le Chili, le Mexique, la Pologne, la Russie.

Les formations gypsifères les plus répandues sur le territoire français sont celles d'âge triasique (environ 220 millions d'années). On les retrouve dans les régions suivantes :

- en Bourgogne – Franche Comté : Haute-Saône (ex : Courbenans), Jura (ex : Lons-le-Saunier, Grozon), Saône-et-Loire (ex : Berzé-la-Ville / Monts du Mâconnais) ;

- en Provence-Alpes-Côte d'Azur : Alpes-Maritimes (ex : Sospel), Bouches-du-Rhône (ex : Roquevaire), Vaucluse (ex : Beaumes-de-Venise), Var (ex : Saint-Luc-de-Provence, Bargemon, Draguignan) ;
- dans le Grand Est : Vosges (ex : Epinal), Lorraine, Alsace ;
- en Auvergne - Rhône-Alpes : Savoie (ex : Tignes, Bozel), Isère (ex : Prunières, Champ-sur-Drac), Haute-Loire (ex : Puy-en-Velay) ;
- en Nouvelle Aquitaine plus ou moins en marge du bassin aquitain et contreforts pyrénéens : Landes (ex : Dax, Pouillon), Pyrénées-Atlantiques (ex : Sare) ;
- en Occitanie dans le prolongement des contreforts pyrénéens : Ariège (ex : Prat-Bonrepaux).

Ces formations triasiques, contenant du gypse, ont servi de couches de décollement pour la formation de grands chevauchements. Elles sont donc localisées principalement au niveau des accidents tectoniques majeurs et ont subi d'importantes déformations (plissements intenses, écaillages, broyages...).

Les autres formations géologiques qui renferment du gypse appartiennent essentiellement :

- au Jurassique (environ 140 millions d'années), pour les gisements des formations lagunaires de Charente (ex : Cognac) et de petits dépôts dans le massif du Jura ;
- à l'Eocène supérieur (environ 45 millions d'années), qui constitue l'important gisement du Bassin parisien (Est parisien, ex : Vaujours, Villepinte ; ouest parisien, ex : Baillet-en-France, Montmorency), caractérisé principalement par les *masses* de gypse du Ludien et les couches lenticulaires situées dans les Marnes et Caillasses du Lutétien supérieur ;
- à la transition Eocène-Oligocène et à l'Oligocène (environ 30 millions d'années) pour les gisements lenticulaires et très épais du Vaucluse (ex : Mazan), des Bouches-du-Rhône (Saint-Pierre-les-Martigues) et de l'Aude (ex : Portel-des-Corbières).

Par ailleurs, il existe également des gisements, notamment dans l'Est et le Sud du pays, qui sont peu connus en raison de leur localisation (profondeur importante ou isolement géographique en régions montagneuses). D'autres dépôts, moins bien datés, sont également présents par exemple en Bourgogne, Alsace, Haute-Saône, Var.

Lorsque les couches géologiques n'ont pas subi de déformation tectonique importante, comme en Lorraine, dans le Bassin parisien ou le Vaucluse, les gisements de gypse se présentent sous forme de couches horizontales plus ou moins régulières ou lenticulaires. Néanmoins, ces gisements ont souvent été érodés et ne représentent plus qu'une partie de la formation initiale.

Lorsque les couches géologiques ont subi une forte déformation tectonique, par exemple pour les dépôts du Trias, les formations gypseuses présentent alors une géométrie très complexe, sous forme de lentilles étirées et discontinues, étroitement associées à d'autres types de roches (calcaires, dolomies, schistes...).

La Figure 6 localise les principaux gisements de gypse exploités en France (d'après Marteau, 1993 actualisé avec les données Placoplatre®). Elle ne représente pas de façon exhaustive et précise les gisements de gypse mais permet de localiser les zones où le gypse est présent en grande masse.

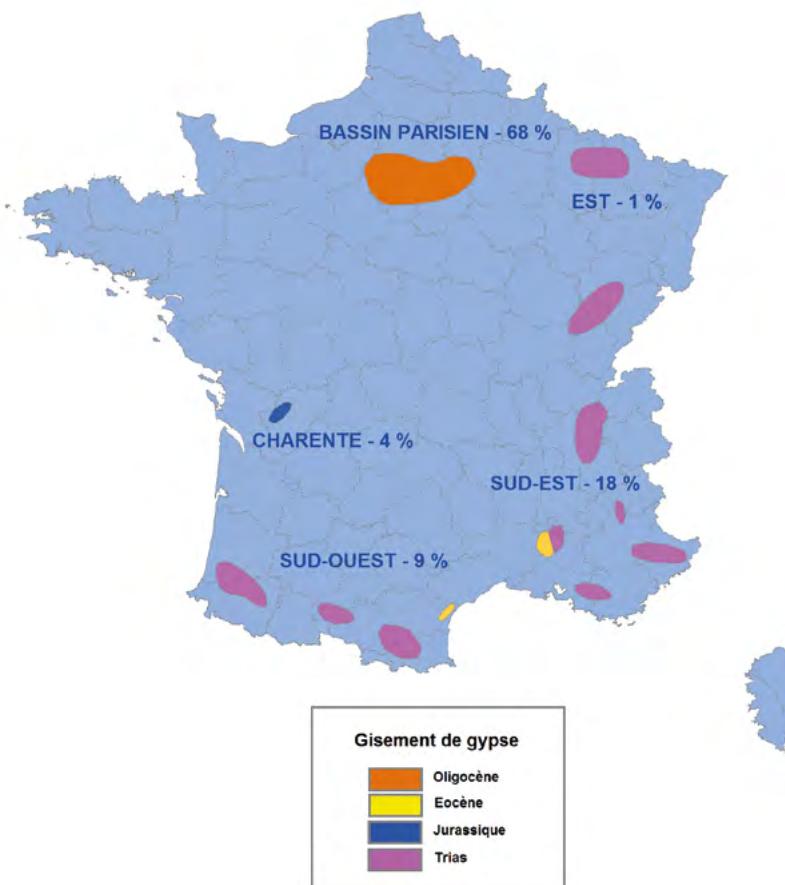


Figure 6 : localisation des gisements de gypse actuellement exploités en France et répartition (en %) de la production annuelle selon les gisements (d'après Marteau, 1993, mise à jour : données Placoplatre®)

2.4. La dissolution du gypse

2.4.1. Quels mécanismes ?

Le gypse est une roche *soluble*. La mise en solution des éléments qui constituent la roche correspond au mécanisme de dissolution.

Lorsqu'on immerge du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dans une eau qui n'a jamais été en contact avec ce minéral, les éléments chimiques qui le constituent vont passer en solution sous forme d'ions. Une réaction de dissolution se met alors en place car l'eau est en état de sous-saturation en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} par rapport à la quantité de ces deux ions présente dans le gypse (Charmoille et Lecomte, 2011). Cette étape correspond à la phase 1 présentée sur la Figure 7.

La dissolution va alors se poursuivre jusqu'à ce que la quantité d'ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} en solution soit en équilibre avec le minéral (phase 2 de la Figure 7). Les conditions pour atteindre cet équilibre dépendent principalement de la température et de la pression existantes. Par exemple dans les conditions de pression atmosphérique, la solubilité varie quasi linéairement entre 0 et 20°C, de 2,15 à 2,53 g/l et présente un optimum de 2,67 g/l à 40°C (Daupley et al., 2015).

En comparaison, la solubilité du sel (NaCl) est de l'ordre de 350 g/l et celle de la calcite (CaCO_3) varie de 0,1 à 0,2 g/l en fonction de la pression partielle de CO_2 .

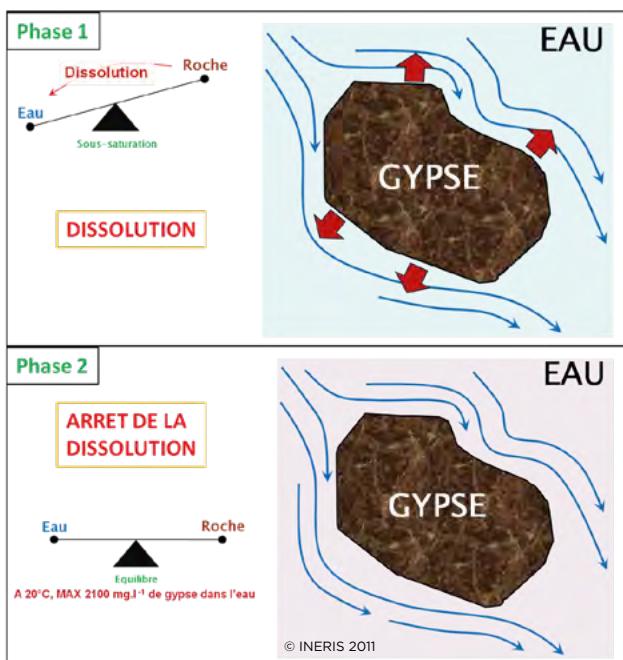


Figure 7 : principe général de mise en place d'un mécanisme de dissolution

Pour qu'un processus de dissolution se mette en place, il faut donc que le fluide qui est en contact avec le minéral soluble (le gypse) soit sous-saturé. Pour garantir la sous-saturation de ce fluide au cours du temps et par conséquent le maintien du processus de dissolution, il est nécessaire que l'écoulement de ce fluide soit suffisant pour le renouveler régulièrement au contact du solide.

2.4.2. Quelle cinétique ?

Lorsque les conditions de mise en place des processus de dissolution citées préalablement sont réunies, le gypse se dissout naturellement. Des investigations récentes réalisées par l'Ineris, en collaboration avec le centre de Géosciences Mines ParisTech, ont permis de mesurer les cinétiques de dissolution du gypse pour des configurations variées (Daupley et al., 2015).

Au travers de ces résultats, il est intéressant de retenir quelques ordres de grandeur. Au laboratoire, le *taux de dissolution* du gypse de deux faciès rencontrés en Ile-de-France (masses de gypse du Ludien à Vaujours et Baillet-en-France) dans de l'eau pure s'établit entre 0,03 et 0,05 g/m²/s. Bien que le gypse soit un minéral évaporitique soluble, son taux de dissolution reste faible par rapport à d'autres matériaux du même type comme le sel gemme. En effet, les expériences réalisées en laboratoire dans des conditions similaires montrent que le taux de dissolution du sel gemme est de deux ordres de grandeur supérieur (» 3 g/m²/s¹). Il reste néanmoins supérieur à celui de la calcite dont le taux de dissolution est établi entre $0,3 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-4}$ g/m²/s (Cubillas et al., 2005).

En extrapolant les résultats de laboratoire et en écartant les éventuels effets d'échelle, on peut retenir que pour des conditions hydrodynamiques identiques, une cavité dans le gypse se développera cent fois moins vite que dans le sel gemme mais cent à mille fois plus vite que dans le calcaire.

Les phénomènes de dissolution du gypse peuvent être à l'origine de l'apparition ou de la réactivation de cavités anciennes. En effet, à l'échelle de la dizaine d'années, le développement de cavités de petites dimensions et/ou l'évolution de cavités préexistantes peuvent être perceptibles. Par contre, le développement de grandes cavités de dissolution, lié à la présence de niveau gypseux d'épaisseur importante, est peu probable sur des durées relativement courtes (ordre de grandeur annuel) en dehors de situations particulières et/ou anthropisées. (Daupley et al., 2015).

2.5. De la dissolution à l'apparition de désordres

2.5.1. Pourquoi parle-t-on de mouvements de terrain en présence de gypse ?

Dans tous les contextes où des roches solubles sont présentes dans le sous-sol, une dissolution naturelle peut se développer. Cette dissolution induit une perte de matière solide pouvant aller jusqu'à la création de vides, de dimensions plus ou moins importantes, au sein ou en surface du matériau soluble. Les modifications de la structure des terrains en profondeur peuvent aussi se répercuter en surface par des affaissements lents du sol ou par la formation d'effondrements brutaux.

Pour des cavités anthropiques (carrières souterraines), la déstabilisation du vide est en grande partie liée à la configuration et à la résistance mécanique des ouvrages et des terrains surincombants. Pour des cavités

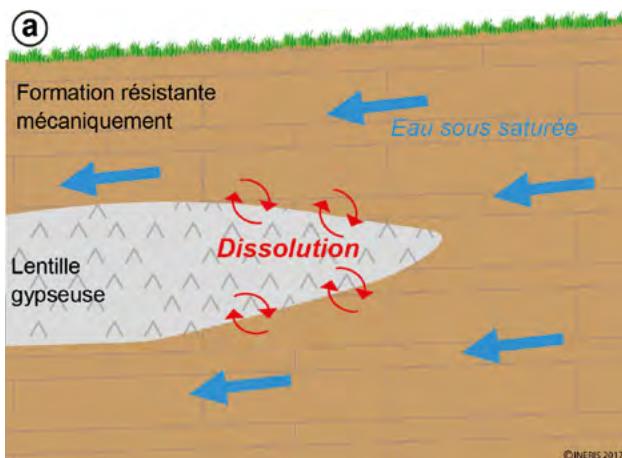
de dissolution, l'eau joue un rôle très important et va interagir dans toutes les phases, depuis la création du vide jusqu'à la remontée du désordre/vide en surface.

2.5.2. Création du vide par dissolution

Pour qu'un vide se crée au sein d'une formation gypseuse par le biais de processus de dissolution, il est nécessaire que le gypse soit en contact avec une eau sous-saturée vis-à-vis de celui-ci et que l'écoulement de cette eau soit suffisant pour qu'elle se renouvelle régulièrement et n'atteigne pas l'équilibre chimique au contact avec le gypse.

Une eau sous-saturée peut être mise en contact avec du gypse dans différents contextes géologiques, des plus simples aux plus complexes. Pour les contextes les plus simples, deux cas de figure peuvent être illustrés :

- le premier, lorsque des horizons gypseux sont situés au sein d'un *aquifère* (Figure 8a). En effet, le phénomène de dissolution peut se mettre en place dans la tranche de terrain où la formation gypseuse est mise en contact avec l'eau sous-saturée de la nappe qui s'écoule (Figure 8b). C'est le cas par exemple en région parisienne où la dissolution des niveaux gypseux du Lutétien se produit dans le sens d'écoulement de la nappe (Toulemont, 1974, 1981 et 1987).



Il est important de noter que, dans ce contexte, pour que la dissolution entraîne la création et le maintien dans le temps de vides francs au sein du massif, les terrains de recouvrement de la cavité de dissolution doivent posséder des propriétés mécaniques suffisantes pour permettre au vide de se développer en dessous. Ainsi le volume de la cavité peut augmenter progressivement sans que celle-ci ne se referme par rupture mécanique du toit. Précisons que les terrains mécaniquement résistants peuvent inclure des bancs de la roche soluble elle-même.

- le second, lorsque des fractures préexistantes servent d'intermédiaires. En effet, si des *discontinuités* structurales existent au sein de la formation gypseuse, celles-ci peuvent permettre à une eau sous-saturée d'atteindre le gypse (Figure 9a). Si l'eau circule au sein de ces discontinuités, le phénomène de dissolution peut se produire permettant ainsi le développement de vides en périphérie de celles-ci (Figure 9b). C'est le cas par exemple en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et notamment sur les communes de Draguignan (83) ou de Prunières (05) où des désordres liés à des vides de dissolution ont été identifiés comme ayant pour origine la circulation d'eau par l'intermédiaire d'accidents structuraux (Rivet et al., 2014 et Paquette, 1991).

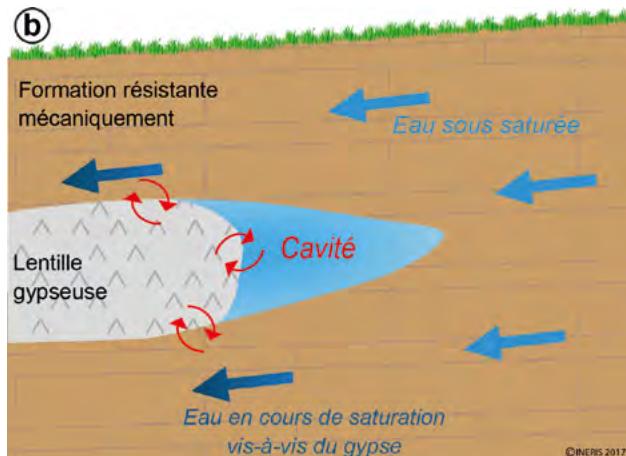


Figure 8 : schéma représentant la mise en place du processus de dissolution au sein d'un aquifère. L'eau sous-saturée en contact avec le gypse (a) entraîne la création de vide par dissolution (b)

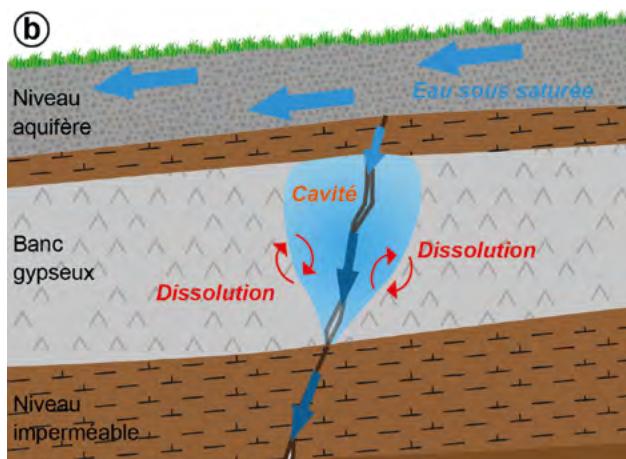
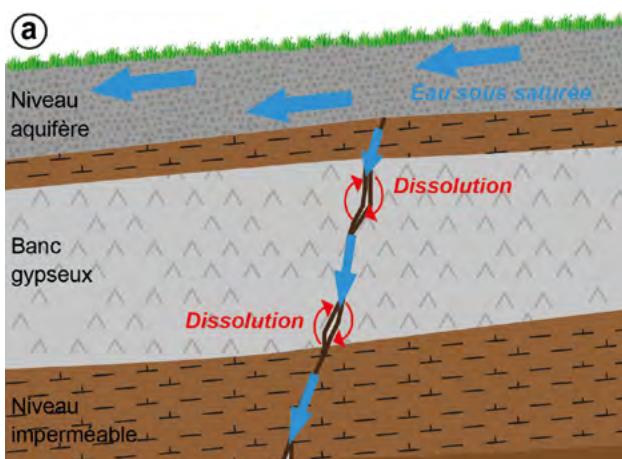


Figure 9 : schéma représentant la mise en place d'un processus de dissolution via une fracture préexistante qui découpe le niveau gypseux. L'eau sous-saturée circule au sein de l'horizon gypseux (ici dans le cas d'une percolation descendante) par l'intermédiaire de la discontinuité (a) et la dissolution peut alors contribuer à la création d'un vide (b)

2.5.3. Mécanisme de déstabilisation

Lorsque la cavité est créée par dissolution, sa déstabilisation peut se produire de deux façons différentes :

- soit en lien avec une dissolution active. En effet, comme précisé précédemment, la tenue mécanique d'un ou plusieurs bancs résistants présents dans les terrains de recouvrement autorise le développement de cavités de dissolution dans la formation gypseuse. Si l'eau circule de façon pérenne, la dissolution se poursuit, agrandissant la cavité jusqu'à atteindre une taille critique vis-à-vis de sa stabilité mécanique. Le poids des terrains sus-jacents excède alors la résistance mécanique des éléments porteurs de la cavité (toit et parements) entraînant leur rupture.

Par exemple, dans le cas du gypse d'Île-de-France, présent dans la formation des Marnes et Caillasses, la présence de niveaux supérieurs calcaires résistants rend possible le développement de cavités de relativement grandes dimensions jusqu'à atteindre les limites de résistance de ce recouvrement (Toulemont, 1987). On peut également considérer le cas de Ripon en Angleterre où la couche de gypse, d'épaisseur relativement importante

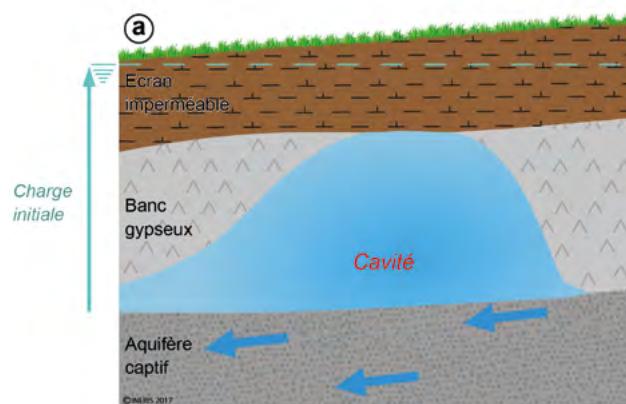


Figure 10 : mécanisme de déstabilisation d'une cavité en lien avec la variation de *charge hydraulique* induite par le pompage d'une nappe captive

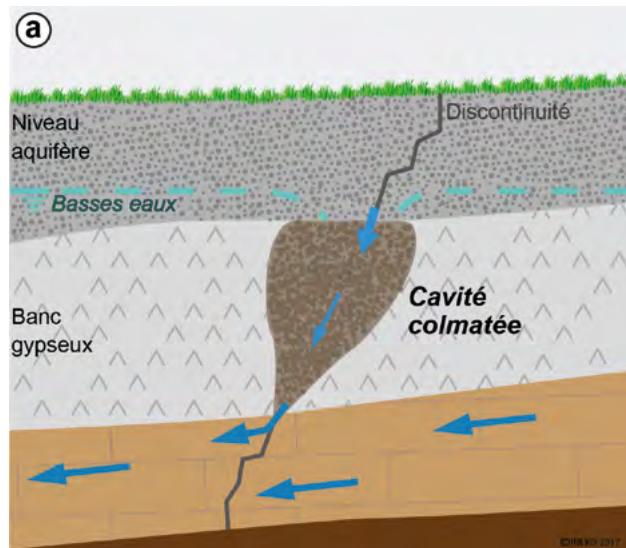


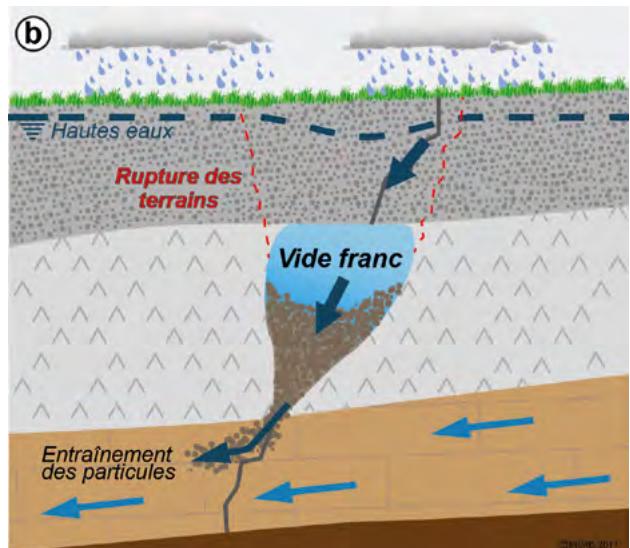
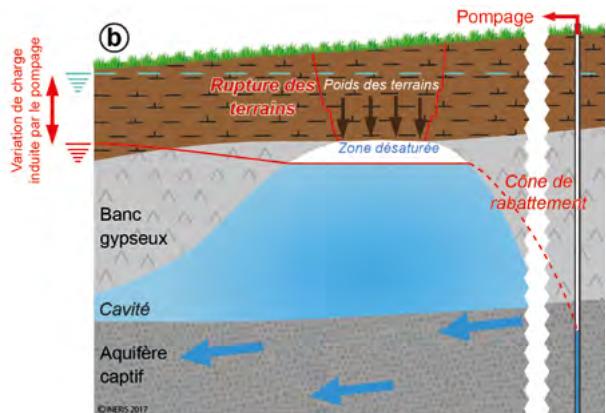
Figure 11 : schéma représentant la déstabilisation d'une cavité de dissolution ancienne. La cavité colmatée est stable tant que le niveau piézométrique varie peu (a). En cas de variation hydrodynamique importante, la modification du gradient peut induire un entraînement des matériaux de remplissage provoquant l'apparition d'un vide franc et la rupture des terrains (b)

1 - Banc épais et mécaniquement résistant.

(10 à 40 m), joue elle-même le rôle de banc raide¹ (Cooper, 1999). Dans ce dernier cas, la cavité peut s'effondrer notamment lorsque l'épaisseur de gypse au toit de celle-ci n'est plus suffisante pour garantir sa stabilité ;

- soit du fait de sollicitations hydrauliques particulières. En effet, les modifications brutales des conditions hydrodynamiques d'origine anthropique ou naturelle peuvent contribuer à la déstabilisation d'une cavité préexistante soit par diminution de la *pression hydrostatique* (premier cas, Figure 10) soit par décolmatage de cavités anciennes comblées après leur formation par des dépôts sédimentaires (second cas, phénomène de déboufrage « karstique », Figure 11).

Dans le premier cas, la baisse du *niveau piézométrique* due par exemple à des pompages provoque une diminution de la pression hydrostatique de la nappe qui baigne la cavité. En fonction des conditions de stabilité de celle-ci, cette diminution va occasionner un nouvel état de contrainte appliquée à la cavité. Cela peut être suffisant pour que le toit ne puisse plus soutenir le poids des terrains sus-jacents provoquant ainsi la déstabilisation de la cavité (Figure 10).



Dans le second cas, la baisse des niveaux piézométriques, provoque une modification des gradients d'écoulement. Ces variations hydrodynamiques provoquent le décolmatage des vides comblés par entraînement hydraulique des matériaux de remplissage (Toulemon, 1981). Il en résulte des cavités partiellement ou totalement vides dont le toit n'est plus soutenu par les matériaux de comblement. Se répercutant sur le plan mécanique, ces variations peuvent contribuer à la déstabilisation des cavités, par accroissement de la contrainte totale sur le toit de la cavité (Figure 11b).

2.5.4. Propagation du vide jusqu'à la surface

Une fois la cavité créée et le mécanisme de déstabilisation initié, la propagation du vide jusqu'en surface du sol se produit si l'espace disponible est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer l'effondrement par « autocomblement ». Le vide se propage alors verticalement et atteint la surface où il provoque un effondrement localisé (ou fontis).

Dans le contexte de dissolution, cette propagation du vide va être accentuée par l'eau. Celle-ci va avoir une double incidence :

- la modification des caractéristiques de *foisonnement*. Dans le contexte de dissolution du gypse, il n'est pas rare que les terrains de recouvrement soient imprégnés d'eau par la présence de *nappes d'eau souterraines*. Contrairement à des cavités sèches, la présence d'eau a tendance à diminuer le coefficient de foisonnement des terrains et donc à augmenter le potentiel de montée de fontis jusqu'à la surface ;
- la progression du vide vers la surface est également accentuée lorsque, au cours de son ascension, le *cône d'influence* de la cavité provoque la rupture de l'écran imperméable de la nappe sus-jacente et la mise en relation de deux systèmes aquifères (Toulemon, 1981). Une fois que cet horizon est atteint par l'effondrement, des processus d'*érosion* et de *suffosion* se mettent en place du fait de la différence de pression entre les aquifères.

Cet impact hydraulique va provoquer chronologiquement (Figure 12) :

- l'entraînement, par l'eau, des matériaux effondrés au sein du réseau « karstique » ;
- l'augmentation du volume disponible ;
- la progression verticale du vide.

Cas particulier : lorsque les terrains de recouvrement sont peu cohérents (comme les sables ou les graviers par exemple), une variation brutale des conditions hydrodynamiques peut entraîner, par suffosion, l'évacuation de ces terrains dans les vides créés par dissolution. Cette perte de matière permet alors au vide de remonter plus facilement jusqu'à la surface (Benito et al., 1995).

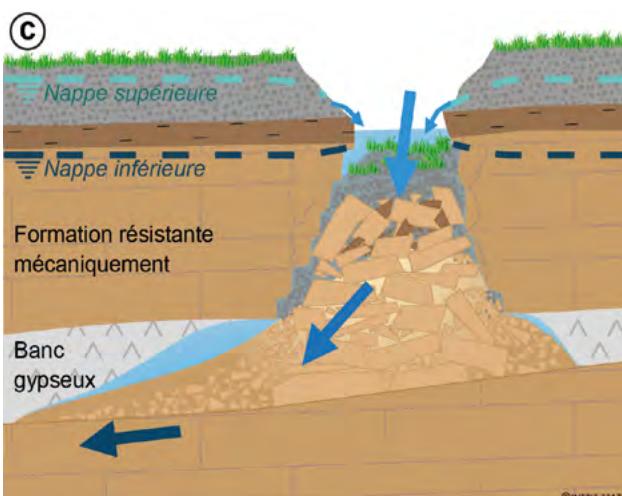
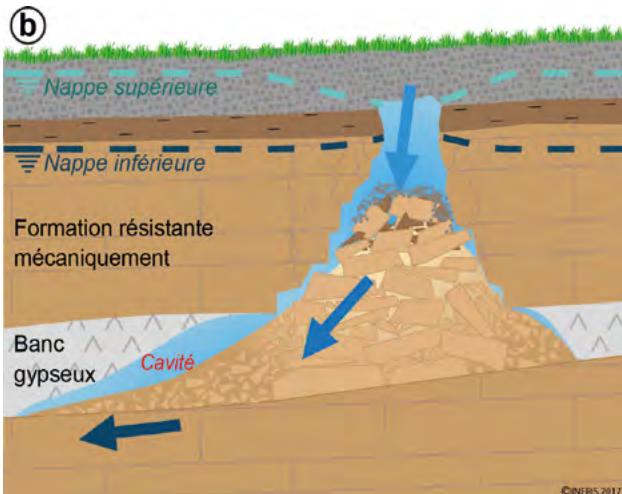
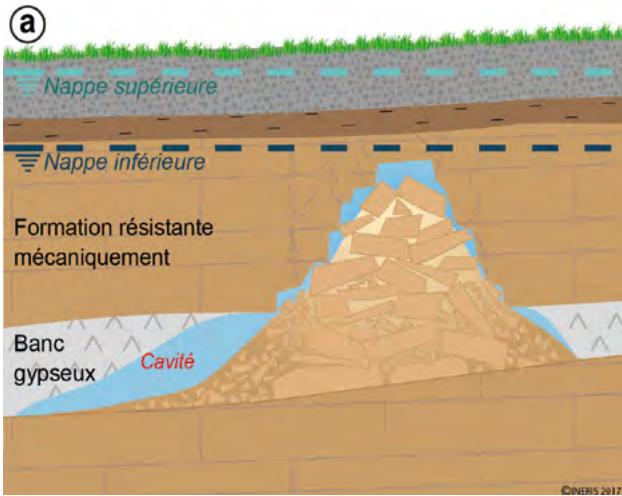


Figure 12 : schémas représentant la propagation du vide jusqu'à la surface par rupture de l'écran imperméable de la nappe sus-jacente. Le vide proche de l'autocomblement (a), continue sa progression vers la surface grâce aux processus d'érosion et de suffosion qui se mettent en place (b et c)

Ce type de désordre, en contexte gypseux, se caractérise par des extensions horizontale et verticale d'ordre plurimétrique (photographies 1 à 4). Ces dimensions peuvent atteindre une dizaine voire plusieurs dizaines de mètres dans certains contextes géologiques particuliers, notamment lorsque les terrains de recouvrement ont une faible *cohésion* (photographie 5).

Si le développement d'une *montée de voûte* en milieu souterrain est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise.

Les photos suivantes présentent quelques désordres observés ces dernières années dans différents contextes.



Photographie 3 : fontis de 6 m de diamètre et 6,5 m de profondeur observé à Draguignan en 2013 (Rivet et al., 2014)



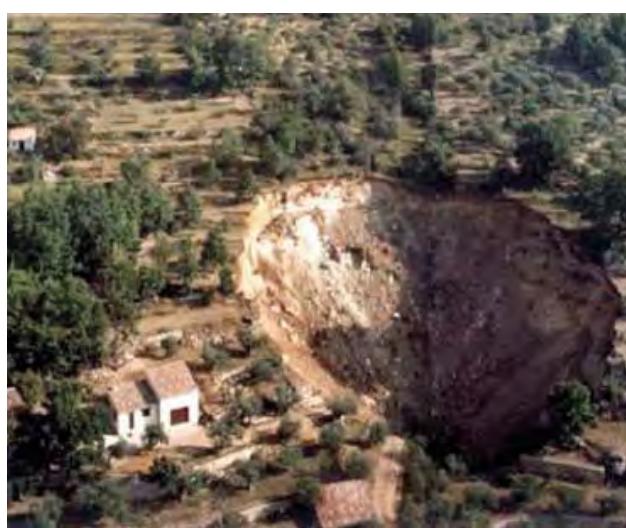
Photographie 1 : fontis de 4 m de diamètre et 2 m de profondeur recensé dans l'enceinte du Bois de la Tussion (Seine-Saint-Denis, 93) en 2013 (Crédit Ineris)



Photographie 4 : effondrement de 13 m de diamètre observé en 2015 sur la commune de Sare (Pyrénées-Atlantiques, 64) (Crédit BRGM)



Photographie 2 : fontis d'environ 4 m de diamètre et plus de 5 m de profondeur observé à Sevran (Seine-Saint-Denis, 93) en 2014 (Crédit IGC)



Photographie 5 : effondrement de 80 m de diamètre et 15 m de profondeur observé en 1992 sur la commune de Bargemon (Var, 83) (Crédit photo : DDTM83)

2.5.5. Cas particulier de l'affaissement

Lorsque la dissolution s'opère à l'interface entre la roche soluble et les terrains sus-jacents et que ces derniers possèdent dans leur ensemble des propriétés mécaniques plutôt faibles (absence de banc raide), les conditions pour maintenir ouvertes des cavités franches de grandes dimensions ne sont alors pas réunies. La perte de matière issue de la dissolution est, dans ce cas, directement compensée par l'abaissement des terrains surincombants (Figure 13, page suivante).

De façon continue, le vide créé se referme. Si le phénomène de dissolution intéresse une surface suffisamment importante à la profondeur où a lieu la perte de matière, les réarrangements en grand des terrains conduisent à l'apparition d'un mouvement souple et continu de la surface du sol de type affaissement souvent lent et progressif.

Les photos suivantes représentent quelques affaissements associés à la dissolution du gypse et observés en Ile-de-France ces dernières années.



Photographie 6 : affaissement de 8,5 m x 9,5 m ayant engendré le fléchissement (en rouge) de la chaussée, observé sur la bretelle de l'autoroute A15 à hauteur de Franconville (Val d'Oise, 95) en 2014 (Crédit Cerema)



Photographie 7 : affaissement observé le long du chemin latéral du bois de la Tussion (Seine-Saint-Denis, 93) en 2010. En rouge, la zone paroxysmale présentant un déplacement vertical cumulé pluricentimétrique (Crédit INERIS)

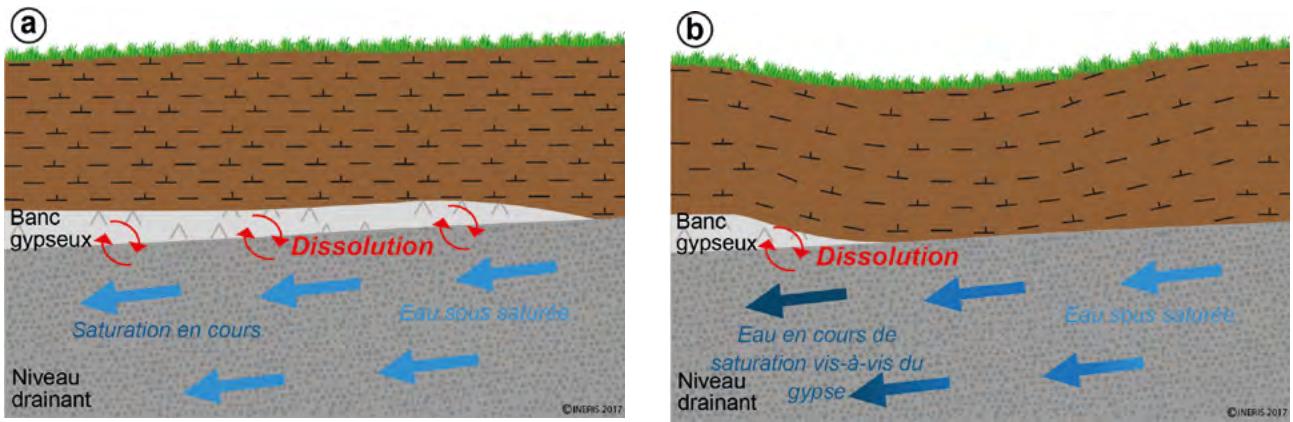


Figure 13 : schémas représentant le phénomène d'affaissement. La perte de matière provoquée par la dissolution (a) est directement compensée par l'abaissement des terrains surincombants (b)

2.5.6. Décompression des terrains

Généralement, les désordres observés à l'aplomb de terrains gypseux sont associés à une perte de matière pouvant créer des vides francs dans le sous-sol.

Cependant, il n'est pas rare d'observer, au travers des différents sondages ou prélèvements d'eau réalisés sur certains secteurs d'étude, la présence de terrains décomprimés gypseux plutôt que celle de vides francs.

Ces zones se caractérisent de la manière suivante :

- lors de la foration, par une vitesse d'avancement de l'outil élevée mais moindre que dans le cas d'une traversée de vide franc (Figure 14) ;
- au cours de pompages, par une eau d'aspect blanc laiteux avec présence de nombreux grains (à l'aspect sableux) non dissous.

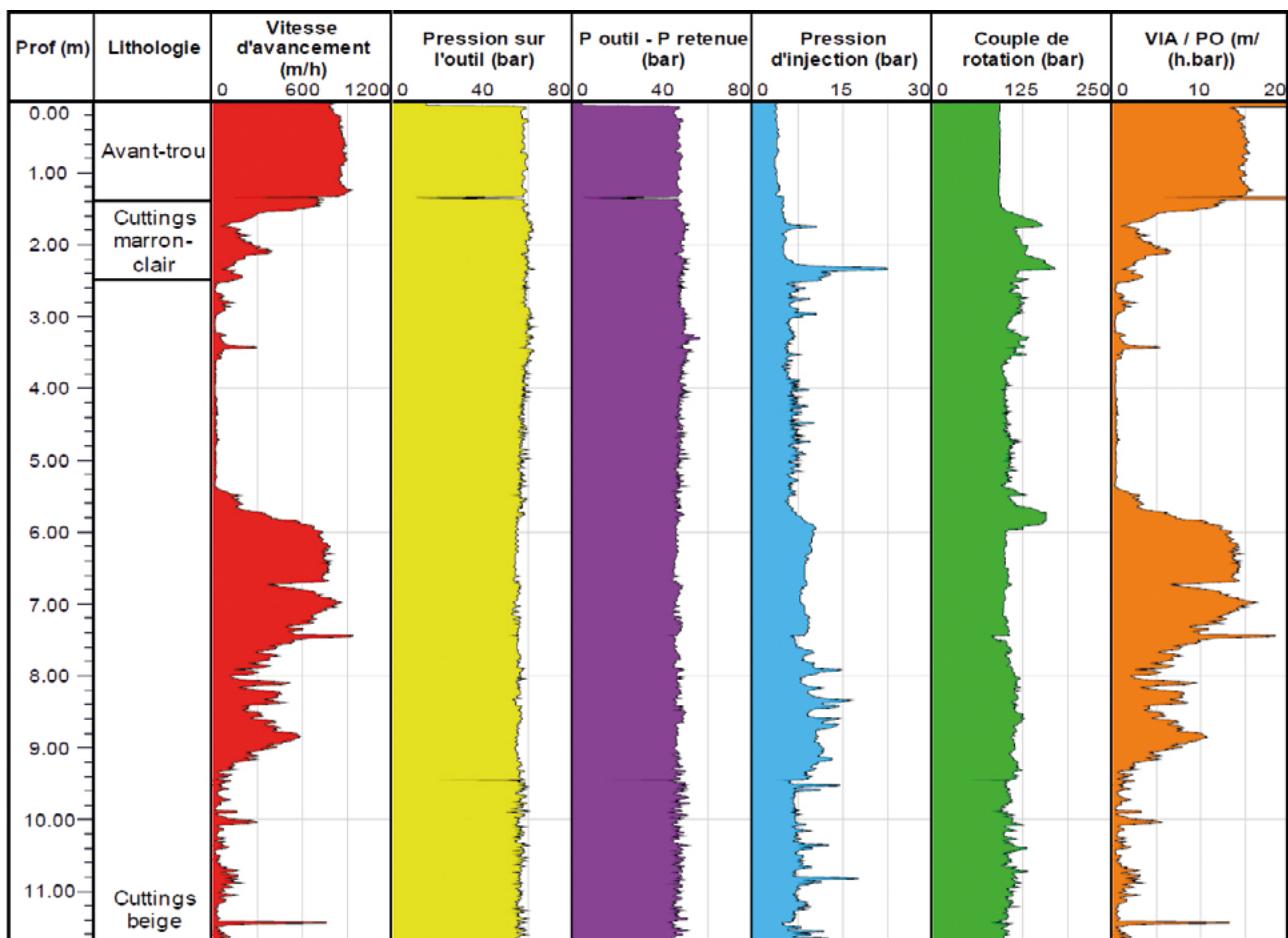


Figure 14 : exemple d'un log de forage présentant une vitesse d'avancement de l'outil élevée entre 6 et 8 m de profondeur correspondant à des terrains décomprimés

Ces mécanismes de dissolution, que l'on retrouve le plus souvent au niveau des faciès gypseux saccharoïdes, peuvent être expliqués par une dissolution partielle des horizons concernés (Figure 15).

Le gypse saccharoïde étant *poreux*, l'eau qui circule dans cette porosité va dissoudre préférentiellement le ciment gypseux qui connecte les grains entre eux. Cette dissolution qui intervient dans une partie du matériau, va réduire les propriétés mécaniques de celui-ci sans créer de vide franc mais en modifiant la porosité (Lecomte, 2016).

Les désordres associés à ce type de terrain sont généralement provoqués par une modification importante des écoulements d'eau à l'occasion de sollicitations hydrauliques d'origine anthropique (pompage) ou hydroclimatique.

Ces zones décomprimées peuvent également être issues de la déstructuration mécanique des terrains dans le cas d'une cavité qui s'autocolmate en remontant vers la surface. En effet, lorsque le volume de vide créé par dissolution n'est pas suffisant pour remonter jusqu'à la surface, la colonne de vide se comble avec les matériaux foisonnés. En sondage, ces zones déstructurées apparaissent comme des zones décomprimées.

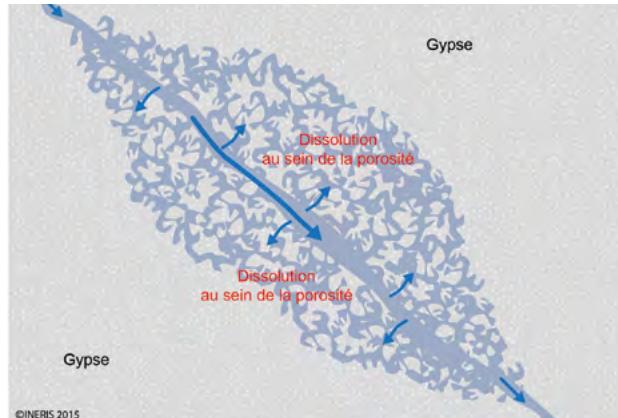


Figure 15 : déstructuration des terrains gypseux par dissolution

3

CONNAISSANCE DE L'ALÉA

3.1. L'aléa : définition et spécificités liées à la dissolution du gypse

Pour évaluer un aléa, on croise généralement l'intensité attendue d'un phénomène donné avec la probabilité d'occurrence de ce phénomène. Dans le cas des processus de dissolution naturelle, les phénomènes redoutés en surface sont les effondrements localisés et/ou les affaissements (voir paragraphe 2.5).

L'intensité du phénomène en surface dépend avant tout des caractéristiques du vide créé (principalement sa profondeur et son volume) et des caractéristiques des terrains de recouvrement (cohésion et raideur). Il existe deux modes d'évaluation de l'intensité :

- par retour d'expérience des différents désordres déjà observés sur le secteur d'étude. En effet, la dimension des désordres observés reflète naturellement la dimension des phénomènes attendus (fonction du recouvrement et des vides pouvant être créés) ;
- par calcul théorique en fonction des données disponibles (nature du recouvrement, profondeur et dimensions possibles du vide).

Il est important de souligner que l'analyse de l'aléa induit par ce type de mécanisme naturel se heurte à plusieurs difficultés qui n'existent peu ou pas dans d'autres contextes comme celui par exemple de l'aléa lié aux cavités anthropiques. Il s'agit :

- du **rôle important joué par l'eau** dans l'initiation et le développement des cavités de dissolution ainsi que dans le déclenchement de la rupture et sa propagation vers la surface. Il va donc être nécessaire de tenir compte des **interactions eau/roche** et des variations de régime hydrodynamique des aquifères ;
- le **caractère évolutif** de ces systèmes naturels ;
- la composante naturelle de ces systèmes, qui se révèlent fortement hétérogènes et anisotropes : ce qui rend leur localisation et par conséquent la cartographie de l'aléa associée peu aisée et induit inévitablement la prise en compte d'une **incertitude de localisation** parfois importante.

La détermination de la probabilité d'occurrence de mouvements de terrain renvoie au problème de leur prévision dans le temps. Si une approche probabiliste est adaptée aux séismes et aux inondations qui restent des phénomènes récurrents assimilables à des processus aléatoires, les mouvements de terrain sont, au contraire, des phénomènes non périodiques qui évoluent de manière quasi-imperceptible durant de longues périodes avant de subir une accélération soudaine. Ils sont donc très difficilement prévisibles. Plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période

de retour donnée (annuelle, décennale, centennale...), qui laisserait une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en termes de prédisposition (ou susceptibilité) du site vis-à-vis du développement d'un type de phénomène.

La première étape permettant d'évaluer la prédisposition de ces phénomènes consiste à définir les zones à l'aplomb desquelles les mécanismes de dissolution peuvent se produire. Pour cela, une étude approfondie des contextes géologiques et hydrogéologiques doit être réalisée. Les étapes complémentaires doivent permettre de définir, dans ces zones, si les phénomènes de dissolution sont en mesure de déstructurer les terrains et/ou de créer des vides pouvant remonter jusqu'à la surface.

3.2. Principes généraux de la démarche d'évaluation de l'aléa

La méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse² tient compte de l'ensemble des spécificités liées aux environnements solubles et à leur évolution.

Plusieurs situations ont été considérées :

- les secteurs où les mécanismes de dissolution sont actifs et en mesure de créer des cavités instables ;
- les secteurs où des vides sont préexistants et liés à des processus de dissolution anciens ;
- les secteurs où coexistent des mécanismes de dissolution actifs et des vides anciens ;
- les secteurs où d'anciens effondrements ont déjà été observés et où des vides peuvent toujours exister.

Les grands principes de cette méthodologie intègrent ces différentes situations et s'appuient sur l'acquisition d'un certain nombre de données pour compléter un panel de critères qui caractérisent les contextes géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques, à savoir :

- la présence ou non de matière soluble ;
- la nature du fluide au contact de la matière soluble ;
- les caractéristiques des circulations d'eau dans le temps ;
- la géologie locale et le contexte structural et géomorphologique ;
- les propriétés mécaniques des terrains ;
- les anciens mouvements de terrains (affaissements, effondrements).

Ces données permettent d'apprécier, dans un premier temps, la nature des phénomènes attendus (affaissement ou effondrement). Puis, par croisement de l'ensemble de ces critères, la prédisposition à l'apparition d'un effondrement ou d'un affaissement est définie. Elle découle de l'évaluation de la prédisposition au mécanisme de dissolution et de la prédisposition à la présence de vide susceptible de remonter en surface. C'est cette prédisposition, croisée à l'intensité du phénomène redouté, qui va définir l'aléa attendu en surface.

La Figure 16 présente schématiquement la démarche d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse. Elle identifie, par catégorie, les données nécessaires (à l'échelle de l'étude) ainsi que les croisements qui permettent de définir successivement la prédisposition, l'intensité et l'aléa comme détaillé précédemment.

3.3. Données nécessaires pour évaluer l'aléa

3.3.1. Les données géologiques (critères d'intensité et de prédisposition)

Prédisposition

Pour évaluer la prédisposition, il est nécessaire dans un premier temps de caractériser la présence de la roche soluble dans le sous-sol. Ce paramètre nécessite donc de disposer et/ou d'acquérir une bonne connaissance géologique du sous-sol des zones étudiées. La quantité et la qualité des informations disponibles sur la présence de matériaux solubles et leur répartition spatiale influencera directement la précision de l'évaluation de l'aléa en surface.

En effet, au-delà de l'existence ou non de gypse dans le sous-sol, il est important de pouvoir déterminer si ce gypse est présent dans des quantités suffisantes et à une profondeur susceptible d'occasionner des mouvements de terrain perceptibles en surface (intégrant les caractéristiques mécaniques du recouvrement). Pour un vide donné, ses conséquences en surface seront d'autant plus limitées qu'il sera profond.

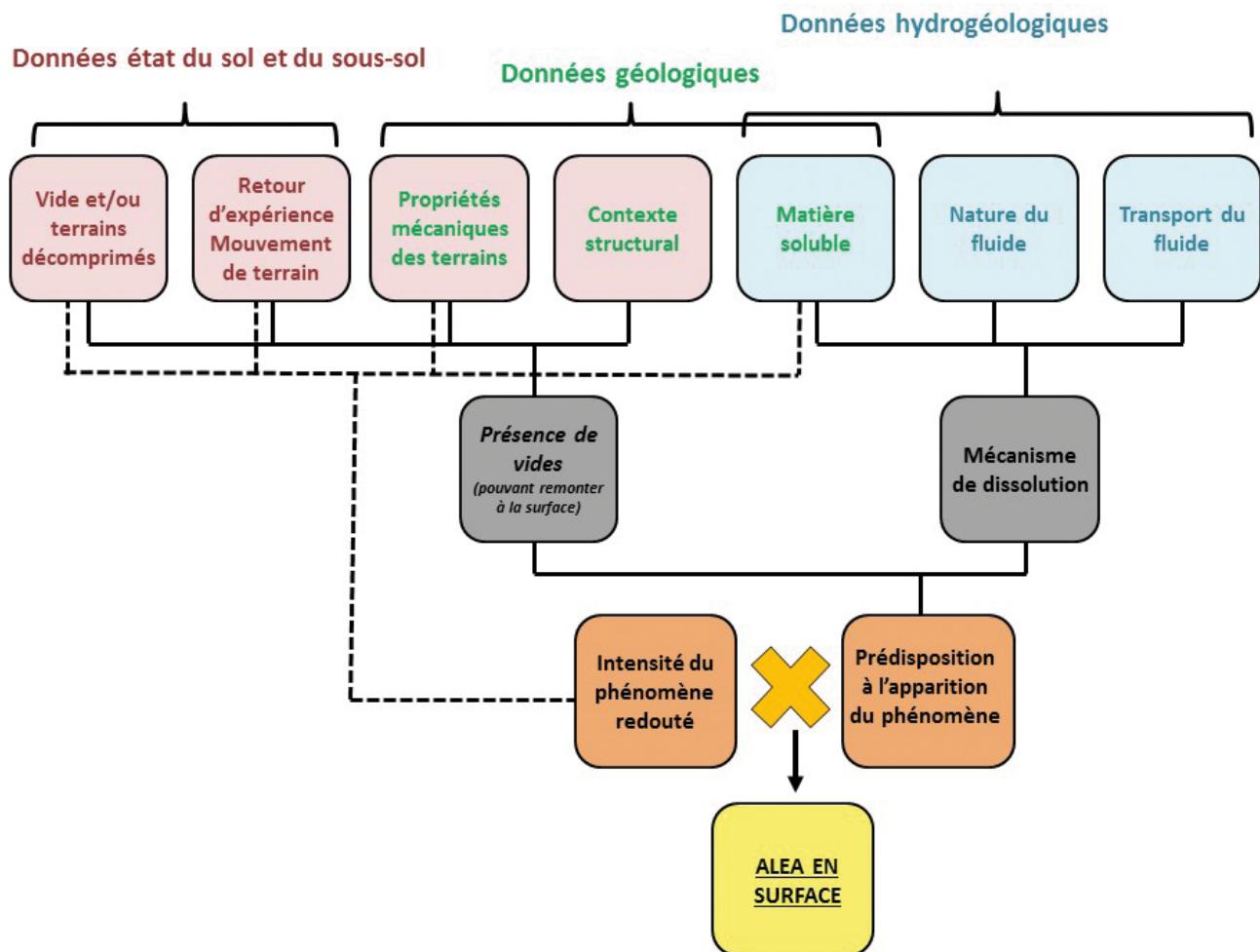


Figure 16 : présentation de la démarche d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution

Intensité

Les informations concernant les terrains de recouvrement (nature des terrains, propriétés géomécaniques) sont des éléments contextuels à prendre en considération notamment pour définir la nature et l'intensité des phénomènes attendus en surface. En effet, la connaissance ou l'appréciation des propriétés géomécaniques des terrains permettra d'évaluer la possibilité de création de vides francs et leur évolution jusqu'en surface du sol.

Questions permettant d'évaluer le contexte géologique :

- Sommes-nous en présence de gypse ?
- Quelle est son épaisseur ?
- À quelle profondeur est-il situé ?
- Quelles sont les propriétés géomécaniques des terrains de recouvrement ?

3.3.2. Les données sur l'état du sol et du sous-sol (critères d'intensité et de prédisposition)

Prédisposition

L'existence de désordres en surface ainsi que la présence de cavités et/ou de zones décomprimées dans le sous-sol renseignent sur l'existence du processus de dissolution, même s'il peut ne plus être actif. Une analyse des désordres observés en surface et de leur historique, couplée à l'acquisition d'informations concernant la présence de vides dans le sous-sol, constituant un risque potentiel d'effondrement, permet une meilleure appréciation de la prédisposition à l'apparition du phénomène redouté.

Intensité

Pour évaluer l'intensité du désordre attendu en surface, les caractéristiques des anciens désordres sont généralement utilisées. Pour un affaissement, c'est la mise en pente engendrée en surface par la compensation du vide en profondeur qui est utilisée. Pour les effondrements localisés, c'est principalement le diamètre du fontis en surface qui est pris en compte.

Cependant, cette caractérisation géométrique n'est pas toujours possible ou alors est incomplète, notamment en milieu urbanisé lorsque les aménagements de surface ont « effacé » les désordres au fur et à mesure de leur survenue.

Dans ce cas, la dimension des désordres doit être évaluée à partir d'autres données telles que la quantité de matériaux qui peut être dissoute et les propriétés mécaniques des terrains de recouvrement et de sub-surface (voir chapitre suivant sur les données géologiques).

Questions permettant d'évaluer l'état du sous-sol et les phénomènes attendus :

- A-t-on connaissance de la présence de vides ou de terrains déstructurés dans le sous-sol ?
- Quelle est la dimension des vides attendus ?
- Existe-t-il des désordres en surface dans la zone d'étude ?
- Quelles sont les caractéristiques des désordres observés ?

3.3.3. Les données hydrogéologiques (critère de prédisposition)

Pour qu'un mécanisme de dissolution existe, le volume de matériaux solubles doit être temporairement ou de manière permanente en contact avec un fluide en mesure de le dissoudre. Il est alors nécessaire de comprendre le fonctionnement du système de dissolution et les paramètres qui influencent cette dissolution : nature et faciès du matériau soluble considéré, chimie et température du fluide en contact, vitesse de circulation des eaux à la surface du minéral, contexte hydrogéologique particulier.

La connaissance des différentes masses d'eau souterraines présentes est donc nécessaire. Elle peut être acquise soit par l'intermédiaire des sources drainant naturellement les aquifères, soit par l'intermédiaire de piézomètres donnant un accès aux différentes nappes d'eau.

Pour quantifier l'évolution dans l'espace de la dissolution et évaluer l'extension globale du système de dissolution, il est nécessaire de disposer ou d'acquérir des données sur la chimie des eaux en présence. La réalisation de mesures *in situ* de la conductivité électrique de l'eau permet d'évaluer si les différents flux d'eau dans le sous-sol ont déjà été en contact avec du gypse. Dans le cas d'une première campagne, ces mesures seront couplées systématiquement à des analyses chimiques afin d'identifier l'origine de la minéralisation, d'autres éléments chimiques pouvant être à l'origine de conductivités électriques élevées. Le calcul des *indices de saturation* sera également utilisé afin de caractériser le potentiel de dissolution des différents flux d'eau vis-à-vis du gypse.

La Figure 17 illustre l'importance de la connaissance des écoulements et de la chimie des eaux pour caractériser les secteurs potentiellement affectés par des mouvements de terrain.

En complément ou à défaut de disposer de données hydrochimiques, il est possible de prendre en compte d'autres critères qui ont une influence indirecte sur le processus de dissolution. Ainsi, le *gradient hydraulique* de la nappe qui est représentatif de la vitesse de circulation de l'eau souterraine peut être utilisé. Cette vitesse de circulation a une influence directe sur le taux de renouvellement du fluide au contact du gypse, ce qui a ensuite une incidence sur le degré de saturation de la solution et donc sur son potentiel de dissolution et de création de vide.

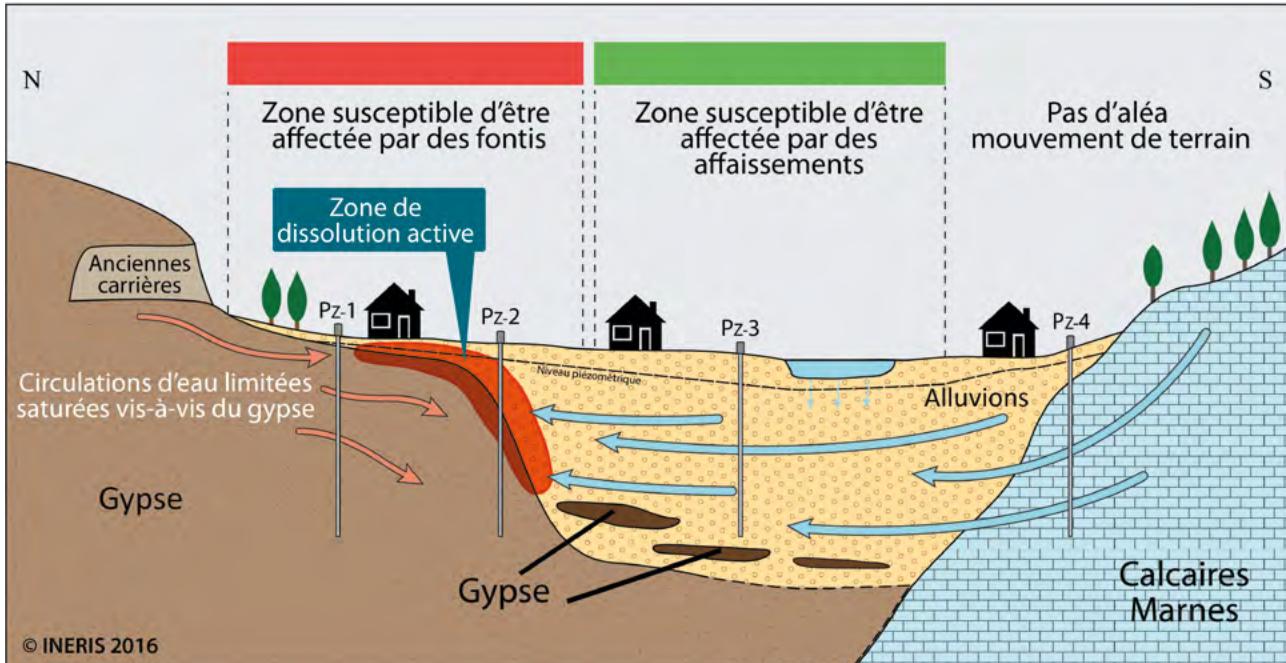


Figure 17 : schéma représentant un fonctionnement hydrogéologique, exemple du sous-sol du hameau de la Combe (Isère) et ses répercussions en surface en termes de mouvements de terrain. Les circulations d'eaux souterraines et leur agressivité vis-à-vis du gypse ont été définies par l'acquisition de données hydrochimiques

Une analyse fine du contexte hydrogéologique peut également permettre d'identifier les zones sensibles du point de vue de la dissolution en localisant les secteurs où du gypse peut-être en contact avec de l'eau sous-saturée (Figure 17).

La prise en compte des eaux de surface (caractérisation des écoulements superficiels - inventaire des puits et des sources) devra également être intégrée dans cette approche.

Questions permettant d'évaluer le contexte hydrogéologique :

- Quels sont les nappes présentes dans le sous-sol ?
- Quel est leur état de saturation vis-à-vis du gypse ?
- Quel est leur gradient hydraulique ?
- Existe-t-il un contexte particulier (pompage à proximité, injection, perte...) ?

3.3.4. Précisions liées aux données acquises

La méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse doit être adaptée à chaque site en fonction des contextes et surtout des données disponibles. En effet, les différentes étapes de cartographie de l'aléa vont dépendre principalement des données collectées au cours de l'étude.

Plusieurs éléments doivent ainsi être pris en considération :

- la quantité et la répartition des données géologiques et hydrogéologiques. En fonction de la localisation du site d'étude, de sa superficie et des moyens mis en œuvre, la quantité de données peut être

très variable d'un site à un autre. Elle va dépendre principalement du nombre d'investigations réalisées par le passé et des données acquises au cours de l'étude (lorsque des investigations complémentaires sont prévues). Le manque de données, tant d'un point de vue géologique qu'hydrogéologique, introduit une grande incertitude dans l'évaluation de l'aléa. Néanmoins, même si des données sont accessibles en grande quantité, il est important de s'intéresser à leur répartition sur l'ensemble du territoire étudié. En effet, une répartition dense et homogène des données garantira une meilleure interpolation et donc une meilleure cartographie de l'aléa.

- la qualité des données géologiques et hydrogéologiques. Même si les données sont disponibles en grande quantité et que leur répartition sur le site est relativement homogène, il est important de s'intéresser à leur qualité. En effet, pour un même type de données, acquises à différentes périodes et pour des objectifs différents, leur qualité peut varier sensiblement et avoir un impact sur la cartographie de l'aléa. Ainsi, pour les données géologiques, la qualité de la donnée peut varier selon le type de sondage utilisé (sondage carotté ou destructif) mais également selon le degré de détail avec lequel la lithologie a été décrite (certains sondages intègrent des subdivisions fines, d'autres plus grossières). Il peut donc être difficile d'identifier ou d'interpréter précisément les niveaux gypseux (épaisseur et profondeur).
- la qualité des données relatives aux désordres. Dans la grande majorité des cas, les désordres apparus antérieurement ou récemment sur un site, sont utilisés pour évaluer l'intensité des désordres et pour justifier l'existence de processus de dissolution. Ils peuvent également être utilisés pour valider le zonage résultant de l'évaluation de l'aléa. Néanmoins,

Il est important de noter que les désordres sont souvent peu référencés et lorsque cela est le cas, les informations disponibles (dimensions, descriptif de l'évènement...) sont généralement peu détaillées. Il peut en résulter des erreurs d'interprétation quant à la nature réelle du désordre ou son intensité.

De façon générale, il est important de retenir que la précision de la cartographie de l'aléa est liée aux données disponibles (quantité, répartition et qualité) et qu'elle intègre l'ensemble de leurs incertitudes.

3.4. Tableaux de croisement utilisés pour évaluer l'aléa

3.4.1. Évaluation de la prédisposition

Même si les données disponibles varient d'un site à un autre, il est possible de définir deux critères principaux pour qualifier en premier lieu la prédisposition, à savoir :

- le « gisement », c'est-à-dire la présence ou non de gypse dans le sous-sol en quantité suffisante pour générer un mouvement de terrain perceptible en surface (données géologiques) ;
- le « potentiel hydrodynamique et hydrochimique des eaux », c'est-à-dire la présence ou non d'une circulation d'eaux agressives vis-à-vis du gypse (données hydrogéologiques).

Le Tableau 1 présente la prédisposition définie par croisement de ces deux critères principaux dont les classes ont été déterminées en considérant des données sommaires.

Il est important de noter que ce tableau constitue une base de raisonnement et que les critères doivent être adaptés en fonction du contexte et des données disponibles. Ainsi, lorsqu'elles existent ou peuvent être acquises au cours de l'étude, les données suivantes peuvent être utilisées :

- pour le critère « gisement » (en tenant compte des caractéristiques du recouvrement) :
 - l'épaisseur de gypse ;

- le rapport épaisseur sur profondeur des niveaux gypseux

- pour le critère « potentiel hydrodynamique et hydrochimique des eaux » :
 - la concentration en sulfate des eaux ;
 - la piézométrie de la (ou des) nappe(s).

Pour les données concernant l'état du sol et du sous-sol, deux critères, dits correctifs ou aggravants, ont été retenus, l'un relatif aux « désordres », c'est-à-dire la connaissance de mouvements de terrain récents ou anciens associés à la dissolution, l'autre relatif aux « vides » présents dans le sous-sol (vides francs ou zones décomprimées).

Ces critères, lorsqu'ils sont renseignés, permettent de moduler la prédisposition initialement qualifiée à partir des deux critères principaux. Aussi, la présence de vide et/ou de désordres va tendre à augmenter d'un ou deux niveaux la classe de prédisposition définie à partir des critères dits principaux. La valeur de correction de la classe de prédisposition est en règle générale limitée à deux ceci en relation avec le nombre limité de classes de prédisposition (peu sensible, sensible, très sensible).

3.4.2. Évaluation de l'intensité

Depuis quelques années, les classes d'intensité pour les phénomènes de mouvements de terrain, qu'ils soient liés à des anciennes exploitations minières, à des carrières abandonnées ou encore à des cavités naturelles, ont été harmonisées.

Les valeurs limites pour chaque classe sont identiques à celles retenues dans le guide PPRN *cavités souterraines* abandonnées (Ministère, 2012). Il n'y a pas de raison objective de remettre en cause ces classes d'intensité dans le cas de mécanismes de création de cavités naturelles.

Le Tableau 2 présente les classes d'intensité pour l'affaissement et l'effondrement localisé. Ce tableau présenté dans le guide PPRN cavités souterraines abandonnées a néanmoins été adapté ici en supprimant les deux classes extrêmes de l'intensité (très limitée et très élevée). Il s'agissait de limiter à trois classes

Tableau 1 : qualification initiale de la prédisposition

Prédisposition à l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse		Potentiels hydrodynamique et hydrochimique des eaux	
Gisement	Absent	Circulation peu probable ou eaux saturées	Circulation d'eaux agressives vis-à-vis du gypse
	Suspecté	Peu sensible	Sensible
	Avéré	Peu sensible	Sensible à très sensible

d'intensité afin de simplifier l'approche d'évaluation de l'aléa en considérant que dans un contexte naturel, les informations disponibles peuvent être limitées. Dans ce cas, il peut être difficile de discriminer les valeurs extrêmes des intensités.

3.4.3. Grille d'aléa

Pour la prise en compte de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse, une grille de croisement classique, telle qu'elle est habituellement

utilisée en risques miniers ou en risques naturels a été retenue (Tableau 3). Elle est homogène, c'est-à-dire qu'elle ne privilie pas l'intensité ou la prédisposition dans le croisement pour déterminer le niveau d'aléa.

Sur le même principe évoqué précédemment pour les classes d'intensité, seuls trois niveaux d'aléa ont été conservés. L'aléa de niveau très fort n'a pas été retenu ici tenant compte de l'absence d'intensité de niveau très élevé.

Tableau 2 : classes d'intensité retenues pour les phénomènes de mouvements de terrain de type affaissement ou effondrement localisé

Classe d'intensité	Phénomènes	Principaux critères de jugement (non exhaustifs)	Conséquences redoutées
Limitée	Affaissement	Mise en pente < 3 %	Désordres légers de types fissures isolées sans atteintes aux fonctionnalités du bâtiment
	Effondrement localisé	Diamètre de l'effondrement < 3 m	Trou éventuellement profond mais suffisamment étroit pour ne pas affecter immédiatement une fondation classique
Modérée	Affaissement	Mise en pente < 6 %	Fissures visibles à l'extérieur. Les portes et les fenêtres coincent et certaines canalisations se rompent
	Effondrement localisé	Diamètre de l'effondrement < 10 m	Cratère +/- profond et suffisamment large pour ruiner une construction récente en béton même sur radier
Élevée	Affaissement	Mise en pente > 6 %	Désordres structurels importants. Bâtiments inhabitables
	Effondrement localisé ou effondrement en masse de la surface	Diamètre de l'effondrement > 10 m	Cratère important avec parois abruptes et risque d'engloutissement du bâti ou ruine complète et immédiate de plusieurs constructions.

Tableau 3 : grille d'aléa mouvements de terrain

		Prédisposition		
		Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité	Limitée	Faible	Faible	Moyen
	Modérée	Faible	Moyen	Fort
	Élevée	Moyen	Fort	Fort

4

GESTION DU RISQUE

4.1. Risques : définition et évaluation

Habituellement, l'évaluation du risque est définie par le croisement de l'aléa (probabilité qu'un phénomène se produise à une intensité donnée) et des enjeux présents en surface.

$$\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{enjeux}$$

On désigne par enjeux d'un territoire, les personnes, biens et activités présents sur la zone étudiée, susceptibles d'être affectés par un phénomène et de subir des dommages ou des préjudices (Ministère, 2012).

Parmi les enjeux à identifier sur un site soumis à un aléa, il convient de prendre en compte les zones non urbanisées (parcs, espaces verts, campings, terrains d'accueil, terrains de sports...) qui pourraient, dans le futur, recevoir régulièrement ou temporairement des biens et/ou des activités exposant des populations.

La prise en compte des enjeux dans la définition du risque intègre également la vulnérabilité des biens exposés (équipements les plus sensibles, établissements recevant du public, voies de circulation prioritaires...) caractérisant ainsi la sensibilité d'un enjeu face à un aléa donné.

4.2. Les mesures de prévention

L'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse défini au travers de la méthodologie présentée ci-avant est basée principalement sur des contextes géologiques et hydrogéologiques donnés. Elle ne tient pas compte d'éventuelles modifications des équilibres hydrodynamiques ou chimiques existant au sein des aquifères et qui seraient de nature à accélérer la vitesse de dissolution ou à déstabiliser des zones antérieurement fragilisées (zones décomprimées ou cavités temporairement stables, voir paragraphe 2.5.3).

La définition de mesures de prévention adaptées nécessite une bonne connaissance des conditions géologiques et hydrogéologiques. De ce point de vue, les études techniques (géotechniques et hydrogéologiques) constituent un outil de prévention à part entière. Néanmoins, dans les paragraphes suivants nous ne reviendrons pas sur le contenu de ces études qui font déjà l'objet de documents de références (Fauchard, 2004 ; IGC, 2016 ; Reiffsteck, 2010 ; Cailleux et al., 1982 ; Marçot, 2016).

En revanche, au regard de ce qui a été indiqué ci-dessus, il paraît important d'insister sur les modalités de gestion des eaux ainsi que sur le suivi des modifications hydrogéologiques et des désordres induits.

4.2.1. La gestion des eaux

Les sollicitations extérieures, anthropiques ou non, peuvent modifier les équilibres hydrodynamiques ou chimiques existant au sein des aquifères, et par conséquent aggraver les niveaux de prédisposition définis. Il est donc important de les prendre en considération.

Ces sollicitations peuvent être de nature variée : aménagements souterrains, mise en œuvre ou arrêt de pompages, *infiltrations* massives localisées, fuites de réseau, événements pluviométriques extrêmes, inondations... De nombreux écrits mettent en évidence l'apparition de désordres en lien avec des modifications hydrogéologiques du milieu.

À titre d'exemple, en Ile-de-France, des corrélations ont été établies par de nombreux auteurs (Feugueur, 1964 ; Diffre, 1969 ; Mégnien, 1970 ; Toulemont, 1974, 1981, 1987) entre l'apparition d'effondrements et les modifications importantes du contexte hydrogéologique. Ainsi, l'augmentation des désordres survenus entre les années 1950 et 1975 est attribuée à l'arrêt des grands pompages industriels qui avaient fortement rabattu la nappe du Lutétien. Deux périodes ont pu se succéder : celle où, les pompages étant actifs, une accélération des processus de dissolution s'est mise en place et celle survenue après l'arrêt des pompages, ce qui a induit des modifications d'équilibre hydrodynamique et mécanique et la déstabilisation des cavités existantes.

On peut citer également, plus récemment en 2004, les désordres observés sur la commune de Villetaneuse (photographie 8) qui ont été en partie associés au vieillissement du réseau d'assainissement devenant « fuyard » (corrélation du vide rencontré en forage avec une anomalie du collecteur).



Photographie 8 : effondrement observé sur la commune de Villetaneuse en lien avec la fuite du réseau d'assainissement (source : Cerema, juillet/octobre 2004)

Dans un autre contexte et toujours à titre d'exemple, en Espagne, près de Saragosse, les phénomènes météorologiques intenses et les infiltrations qui se produisent, le long des canaux d'irrigation non revêtus peuvent induire des variations importantes du niveau des nappes (5 m en période d'irrigation). L'apparition de désordres est bien corrélée avec ces modifications importantes du contexte hydrologique et hydrogéologique (Benito et al., 1995).

Ces corrélations entre phénomènes météorologiques intenses et apparitions de désordres ont également été établies par certains experts, en 2014 dans le Var (ex : Bargemon), suite aux forts événements pluvieux enregistrés en janvier et novembre.

Ainsi, afin de ne pas aggraver les phénomènes naturels de dissolution en modifiant significativement les gradients hydrauliques existants, la gestion des eaux ne doit donc pas être négligée.

Quelques recommandations peuvent être préconisées à savoir :

- éviter les pompages importants et les infiltrations massives dans les zones de gypse. Concernant les infiltrations, il ne s'agit pas d'imperméabiliser la surface mais d'éviter de concentrer les eaux en un seul et même endroit.
- éviter la perturbation des équilibres chimiques et thermiques (géothermie) en place ;
- vérifier, à fréquence régulière, les sources potentielles de venues d'eaux parasites (fuites de réseaux) qui pourraient également avoir un impact sur les gisements de gypse en place ;
- prêter une attention particulière au rebouchage des forages et sondages de reconnaissance. Les produits de comblement et leur modalité de mise en œuvre doivent permettre de restituer une étanchéité au moins identique à celle des terrains pré-existants ;
- réaliser l'imperméabilisation des ouvrages de stockage des eaux.

En fonction des contextes, les recommandations ci-dessus pourront être adaptées sous réserve de la réalisation d'études spécifiques permettant de garantir l'absence d'impact et de préciser les modalités constructives.

4.2.2. Les suivis piézométriques

La dissolution de gypse peut conduire, selon les contextes, à la création de vides francs, de zones déstructurées ou à l'ouverture de fractures préexistantes. Ces modifications de structure du sous-sol vont se traduire par une augmentation de la perméabilité du massif et donc par une modification des vitesses d'écoulement de la nappe et/ou de son gradient hydraulique.

Par conséquent, le suivi de la piézométrie des nappes baignant les niveaux gypseux permet de donner des indications sur la localisation et l'évolution du phénomène de dissolution. Dans le Nord-Est de Paris, il a été notamment constaté une corrélation entre les désordres observés en surface et la présence localement

d'un axe de drainage secondaire ayant un gradient plus fort que celui existant de façon plus générale dans la nappe. Ces observations nécessitent un suivi régulier sur un réseau piézométrique resserré.

À noter également que l'identification de zones actives vis-à-vis de la dissolution peut être effectuée par la mise en place d'un suivi de la conductivité des eaux. Ce suivi devra néanmoins être complété d'analyses chimiques permettant de s'assurer que la conductivité mesurée est bien liée à la dissolution du gypse.

4.2.3. Le suivi des manifestations en surface

Comme précisé dans le paragraphe 3.3, le suivi des désordres en surface est une démarche primordiale pour caractériser au mieux l'intensité des désordres attendus et identifier les zones actives et leur possible progression géographique.

Dans cet esprit, la mise en place d'une base de données pour « bancariser » les événements observés en surface est nécessaire. Leur description doit être aussi exhaustive que possible et comprendre, *a minima*, la localisation (géoréférencement), la géométrie (diamètre, profondeur, mise en pente...), la date et les conditions d'apparition (environnement, phénomènes aggravants...).

Dans le cas de secteurs urbanisés, où les désordres sont souvent masqués par le bâti, le relevé des dommages sur les structures peut également être un bon indicateur de mouvement de terrain en cours. Il convient cependant d'être prudent quant à la cause de ces dommages qui peut être de nature variée (ex : retrait/gonflement des argiles).

De même, si des investigations spécifiques sont conduites et des travaux de mise en sécurité réalisés, il est important d'en conserver la mémoire. En effet, la connaissance de la nature des travaux permet d'apprécier l'ampleur des phénomènes à l'origine des dommages et peut éventuellement être utilisé en cas de sinistre de deuxième génération ou d'événement proche (caractère évolutif du phénomène).

4.3. Les mesures de protection

Les mesures de protection font référence aux solutions pouvant être retenues pour réduire la vulnérabilité d'un bien ou éviter un accident grave affectant les personnes. Elles font suite à des travaux de reconnaissance qui intègre l'acquisition de données de sources variées (archives, sondages, géophysique...) permettant de définir les caractéristiques géométriques et géographiques de la ou des cavités par rapport à la surface (Pinon, 2016).

4.3.1. Contraintes à prendre en compte

Les méthodes de traitement sont variées et dépendent :

- du contexte géologique au sein duquel sont rencontrés les niveaux gypseux dissous. Les méthodes de traitement peuvent varier sensiblement si les niveaux gypseux se trouvent dans une masse rocheuse donnant lieu à des vides temporairement stables ou au sein de sols meubles ou plastiques sensibles à des phénomènes de décompression. L'identification

d'un système aquifère et la connaissance de ses caractéristiques hydrodynamiques est également un point essentiel ;

- de la sensibilité des structures aux mouvements de terrains. Pour les structures sensibles aux mouvements de sols (bâtiment ou fondation d'ouvrage, par exemple), les méthodes employées devront permettre un traitement définitif garantissant l'absence d'évolution dans le temps. Dans le cas d'un usage moins contraignant de la surface (voies à faible trafic, espaces verts...) les méthodes de traitement pourront être plus légères et autoriser des mouvements limités de la surface du sol voire envisager des travaux différés dans le temps ;
- du contexte d'intervention (désordre en cours, pathologie sur ou à proximité d'un ouvrage existant).

4.3.2. Description synthétique des méthodes de traitement

4.3.2.1. Injections

Différentes techniques d'injection peuvent être mises en œuvre pour combler ou consolider une zone de dissolution. En présence d'une nappe ou d'un écoulement, ces travaux doivent impérativement s'accompagner de dispositions permettant de limiter les impacts hydrauliques (modifications de gradients, effet barrages...) au risque d'engendrer d'autres désordres. Le suivi de surface et l'ajustement des pressions d'injection au besoin sont alors nécessaires.

En fonction de l'état des masses gypseuses, les injections viseront soit à remplir les vides (injection de comblement), soit à consolider des terrains remaniés (injection de traitement) afin d'obtenir des valeurs de résistance des sols jugées suffisantes à la construction du projet ou à la mise en sécurité du site.

Pour le remplissage des vides, il est préconisé de déverser gravitairement un mortier de ciment (Figure 18, encadré a) comprenant une charge minérale importante (sable voire cendres volantes ou fillers pour des mortiers prêts à l'emploi) mais fluide, dans un réseau de forages disposés suivant une maille adaptée aux enjeux. Puis, après une période de 7 jours, un mélange comprenant une plus forte proportion de ciment (coulis) doit être injecté sous pression (environ 5 bars en tête de forage) dans les forages pour combler les vides résiduels : il s'agit du clavage.

À titre indicatif, les préconisations de l'Inspection Générale des Carrières de Paris sur les maillages de forage sont³ :

- 7 m x 7 m sous les espaces verts ;
- 5 m x 5 m sous le bâti ;
- 3,5 m x 3,5 m au droit de fontis.

Selon l'importance des désordres, ces injections de remplissage peuvent être complétées par des injections de traitement. Elles consistent à injecter les terrains et à imprégner le massif avec un coulis fluide plus fortement chargé en ciment. Ces injections sont réalisées avec des tubes à manchettes (dispositifs scellés au terrain permettant de choisir la zone à injecter (Figure 18, encadré b)).

En fonction des objectifs de l'injection (mise en sécurité, projet de construction), des caractéristiques minimales de résistance mécanique des produits et des terrains injectés sont exigées. En fin d'exécution, les caractéristiques des terrains en place sont vérifiées à l'aide de sondages de contrôle (méthode de caractérisation, de préférence similaire à celle mise en œuvre avant travaux). Si les valeurs obtenues sont inférieures à celles fixées, une reprise d'injection doit être réalisée.

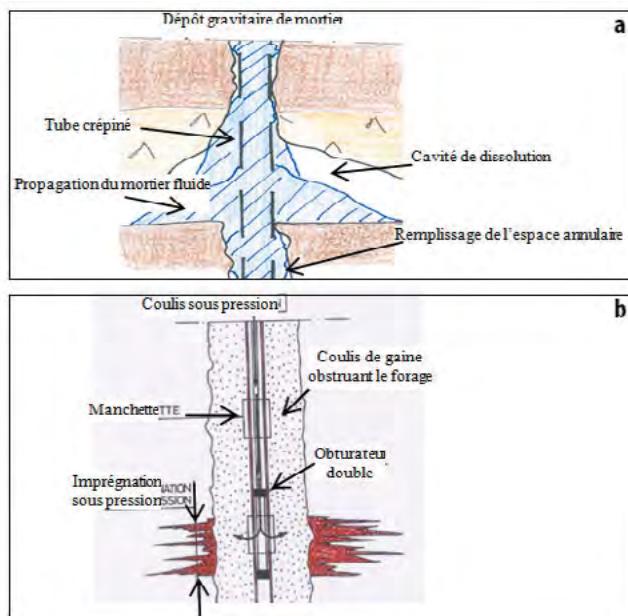
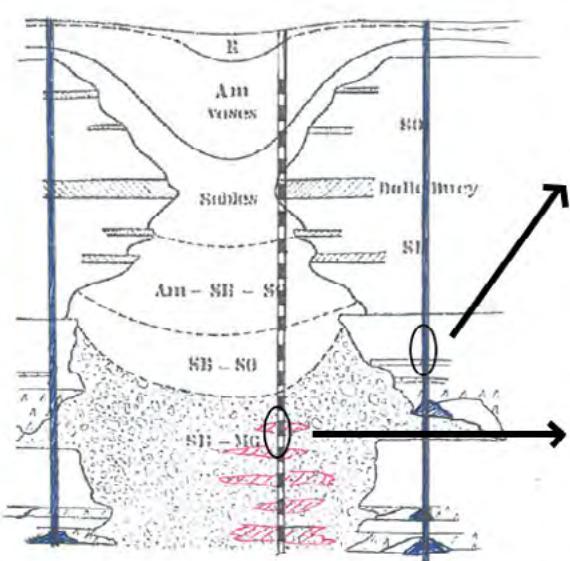


Figure 18 : traitement par injection (mortier de comblement en bleu, coulis de traitement en rouge) d'un fontis de dissolution dans le gypse du Lutétien du Bassin parisien (Cerema)

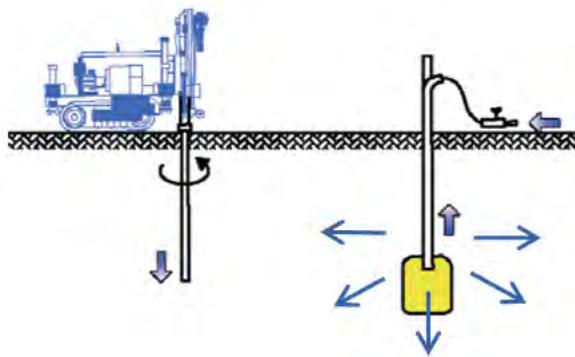


Figure 19 : schéma de principe de l'injection solide (Grand Rapids convention center - USA - Thome et al., 2006)

Dans les zones où la dissolution se traduit par une décompression des sols, il est possible, sous réserve de la nature des terrains, de les « redensifier » via l'injection d'un mortier très épais qui va refouler les terrains autour du forage : on parle d'injection solide (Figure 19).

Les différentes techniques d'injection décrites dans ce paragraphe agissent directement sur les niveaux gypseux. Elles sont donc de nature à limiter la probabilité d'apparition des désordres et par conséquent à réduire le niveau d'aléa. Néanmoins, une attention particulière doit être portée quant à l'influence des travaux de comblement par injection qui peuvent avoir une influence sur l'écoulement des eaux souterraines et par conséquent déplacer les problèmes liés aux phénomènes de dissolution.

4.3.2.2. Comblement depuis la surface

Cette technique est mise en œuvre lors de l'apparition d'un effondrement en surface (à proximité d'un ouvrage existant ou lors d'une phase de terrassement).

Le remplissage avec du « tout venant » est une stratégie généralement perdante. En effet, la stabilité n'étant assurée qu'à court terme, il est probable qu'un nouvel affaissement/effondrement apparaisse de nouveau au même endroit quelques années plus tard, notamment suite à des variations du niveau de la nappe ou à des infiltrations importantes d'eau.

Pour garantir la stabilité dans le temps du remplissage, y compris sous l'effet de l'eau (à minima, les précipitations), deux approches peuvent être proposées :

- soit une obturation du conduit de l'effondrement avec, par exemple, une dalle en béton posée sur les niveaux sains environnants (Figure 20) ;
- soit un remplissage par des matériaux granulaires frottants présentant une granulométrie correctement graduée depuis la surface (éléments fins) jusqu'en profondeur (éléments grossiers) (Figure 21).

Seul le remblaiement par des matériaux granulaires permet de limiter l'incidence des travaux sur les circulations aquifères sous-jacentes.

Cette technique vise essentiellement à mettre en sécurité les désordres apparus en surface. Elle permet

de diminuer les risques résiduels. Néanmoins, elle n'a aucune incidence sur le niveau d'aléa.

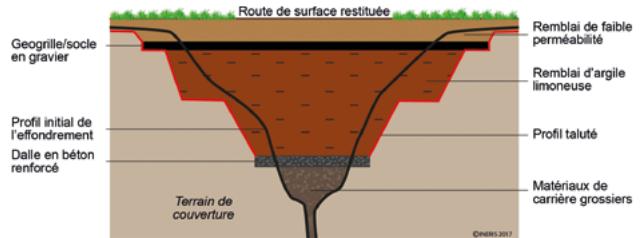


Figure 20 : remblaiement bloqué à sa base par une dalle en béton armé (D'après Bonaparte et Berg (1987) dans Waltham et al., 2005)



Figure 21 : remblaiement d'un effondrement à l'aide de matériaux granulaires présentant une granulométrie étagée (D'après Waltham et al., 2005)

4.3.2.3. Renforcement des structures

En fonction de la sensibilité des constructions à réaliser et de la possibilité de traiter les sols, la mise en œuvre de dispositions constructives particulières peut s'avérer nécessaire pour garantir la stabilité des fondations ou limiter les dommages aux structures en cas de mouvement de sol.

Prise en compte d'un effondrement localisé pour des fondations superficielles

Cette approche consiste à dimensionner les structures d'appui (fondations + murs porteurs) pour résister, sans dommage grave, à l'apparition d'un effondrement de diamètre prédéfini en tout point de l'emprise des fondations de l'ouvrage.

La rigidification et l'augmentation de la géométrie des éléments de fondation (radier ou semelle) doit permettre d'assurer le « pontage » de l'effondrement, la surface de contact restante entre le sol et la fondation devant s'avérer suffisante pour transmettre les charges.

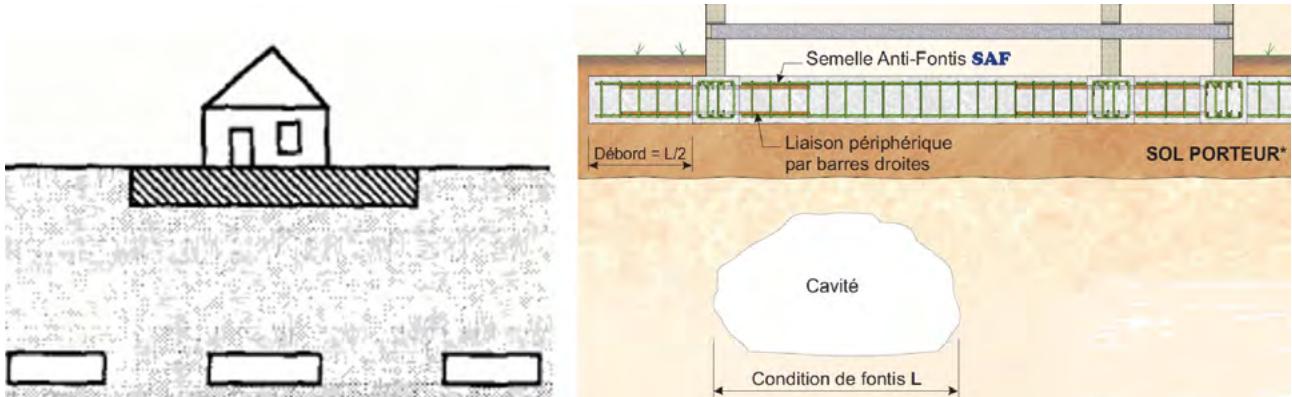


Figure 22 : schéma du principe de rigidification des fondations (source IGC Versailles) et exemple de principe de dimensionnement de semelle anti-fontis (source FIMUREX)

Cette méthode se traduit par un dimensionnement plus lourd par rapport à des fondations classiques afin d'obtenir une rigidité plus importante de la fondation. La longueur des semelles est éventuellement allongée et l'épaisseur des radiers augmentée (Figure 22).

Ajustement des fondations profondes

Dans le cas où les niveaux gypseux se situent à une profondeur limitée, il est possible de mettre en œuvre des fondations profondes dont la base s'ancre sous les horizons affectés par la dissolution. Le dimensionnement considère des fondations travaillant essentiellement en pointe et prend en compte des efforts parasites (frottements négatifs) au droit des terrains décomprimés ou affectés par la dissolution.

La réalisation de ce type de fondation peut nécessiter un remplissage préalable des vides de dissolution ou la mise en œuvre d'un chemisage pour éviter des pertes de béton (Figure 23).

Adaptation de la structure de l'ouvrage

Dans certains cas, la géométrie des événements redoutés peut être telle que la rigidification de la superstructure est plus adaptée que le renforcement des fondations ou le traitement des sols.

Il a notamment été constaté, pour certains projets d'infrastructures linéaires, la défaillance locale d'appuis suite à l'apparition d'un effondrement localisé en surface. Afin de pallier ce problème, la stabilité des ouvrages est renforcée par la mise en place de « ponts » permettant de rigidifier la structure. La Figure 24 présente un exemple de renforcement de structure (pont routier) par la mise en place de poutres de béton.

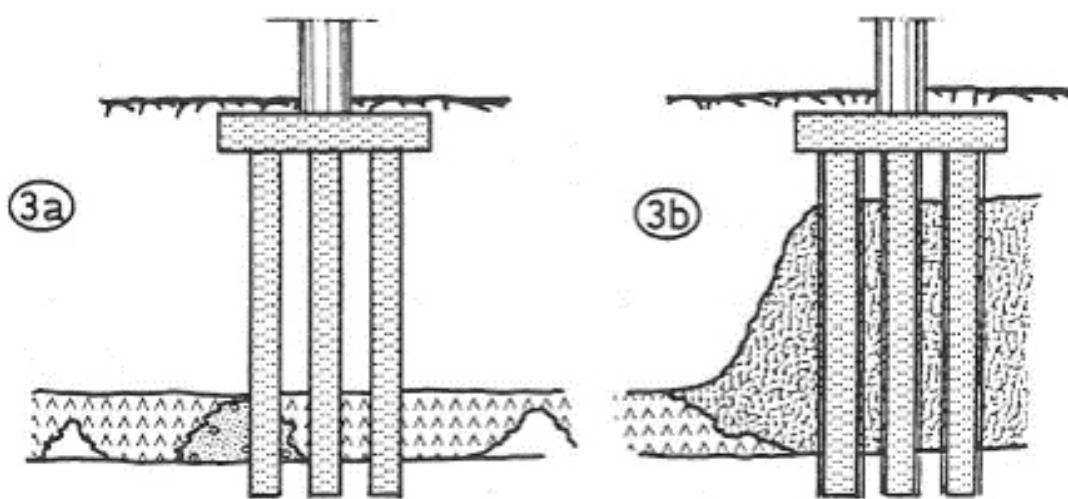


Figure 23 : fondations profondes ancrées sous une zone de dissolution avec un remplissage gravitaire des cavités (3a) ou un chemisage des pieux (3b) (Toulemon, 1987)

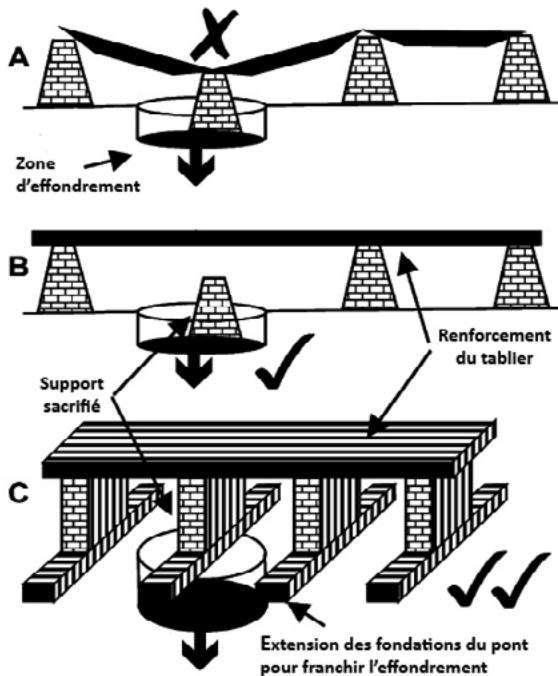


Figure 24 : renforcement d'un tablier de pont pour une route (Cooper et al., 2002)

La dimension des « ponts » capable de travailler en poutre au-dessus de la fondation défaillante dépend de la géométrie de l'effondrement et éventuellement de son extension dans les matériaux de surface mis en place pour la réalisation de l'ouvrage (remblai).

Ces dispositions constructives peuvent être complétées par des dispositifs de surveillance permettant de suivre, pendant la vie de l'ouvrage, les éventuelles déformations associées à l'évolution des niveaux gypseux (décompressions ou montées de cavité) et/ou l'évolution des structures (déformations, variations de contraintes au niveau des appuis) et/ou des sols supports (tassements des sols supports).

Elles visent essentiellement à réduire la vulnérabilité des enjeux face à l'apparition d'un désordre (effondrement ou affaissement) en lien avec la dissolution du gypse.

4.3.2.4. Géogrille de renforcement

Ce type de dispositif est employé lorsqu'il est impossible de délimiter suffisamment finement les zones

susceptibles d'être impactées par des effondrements et/ou que les enjeux à protéger peuvent admettre des déplacements de sols significatifs (au moins de façon temporaire).

Le principe consiste à limiter les déformations au droit d'un effondrement en interposant dans le sol proche de la surface un système (géogrille) qui retient les terrains sus-jacents et ne répercute qu'un affaissement/tassement d'une amplitude limitée.

Lors de la progression d'un vide vers la surface, la géogrille, enterrée à une profondeur variable selon le dimensionnement (en particulier selon l'amplitude des déformations admises en surface), se met en tension en mobilisant du frottement dans la zone non effondrée (Figure 25). Les efforts mobilisés vont compenser le poids des terres reposant sur la géogrille au droit de l'effondrement.

Avec les caractéristiques des géogrilles disponibles sur le marché, ce procédé peut être utilisé pour se prémunir d'effondrement allant jusqu'à 5 m de diamètre. Il est également possible d'instrumenter ces géogrilles afin de détecter une première mise en tension et prévenir l'affaissement avant qu'il ne soit visible.

Ce type de dispositif est en particulier adapté pour la mise en sécurité de voiries ou la protection d'espaces recevant du public (espaces verts, cheminements piétons...). Face à un aléa effondrement diffus, les géogrilles présentent un intérêt économique important par rapport aux autres techniques présentées ci-dessus.

Cependant, le système de géogrille ne constitue pas une protection définitive. Les géogrilles retiennent les terrains pendant une période limitée après l'effondrement, mais leurs caractéristiques mécaniques ne permettent pas un maintien en tension sur le long terme.

L'identification d'un effondrement (affaissement/tassement dans la zone protégée par la géogrille) impose la réalisation ultérieure de consolidation des sols (cf. paragraphe injection).

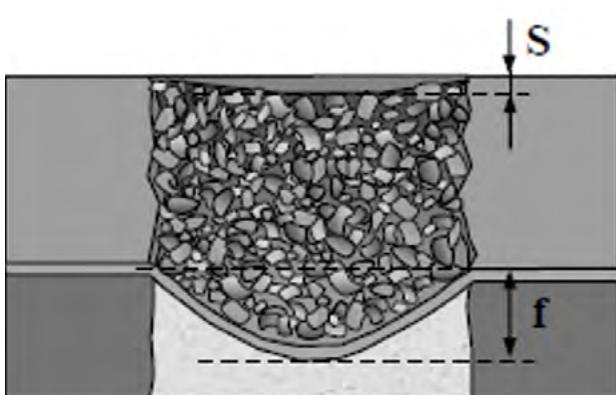


Figure 25 : mise en tension d'une géogrille au-dessus d'une cavité sous l'effet de l'effondrement des terrains sus-jacents (P. Villard, 2006)

4.4. Récapitulatif des moyens de prévention et des méthodes de traitement

Le Tableau 4 synthétise les moyens de prévention et les méthodes de traitement définis dans les paragraphes précédents. Il caractérise chacune des techniques vis-à-vis des critères suivants :

- facilité/simplicité de mise en œuvre ;
- coût relatif ;
- pertinence et efficacité vis-à-vis de l'aléa mouvement de terrain.

Tableau 4 : principales méthodes de prévention et de traitement des zones de dissolution de gypse

Méthodes de gestion du risque	Techniques	Coût	Faisabilité		Aléa résiduel	Risque résiduel	Conséquences redoutées
			Sur le neuf	Sur l'existant			
Mesures de prévention	Gestion des eaux	€	Aisée	Possible	=	➡	Mesure à pérenniser dans le temps. évite d'aggraver le phénomène. Dans certains cas, permet de diminuer le niveau d'aléa
	Suivi piézométrique	€	Aisée	Aisée	=	➡	Mesure à pérenniser dans le temps
	Suivi des manifestations en surface	€	Aisée	Possible	=	➡	Difficulté en milieu urbain
Mesures de protection	Injections / Traitement des sols	€€€	Aisée	Aisée	➡	➡ ➡	Incidence possible aux alentours
	Comblement en surface	€/€€	Aisée	Possible / Compliquée	=	➡ ➡	Mise en sécurité du désordre Emprises importantes nécessaires
	Rigidification des structures	€€/€€€	Aisée	Possible / Compliqué	=	➡ ➡	Nécessite une bonne évaluation des phénomènes en amont
	Structure souple	€€	Aisée	Compliquée	=	➡	Peu envisageable pour l'existant Nécessite un suivi et d'éventuelles reprises

€ : technique peu coûteuse à mettre en œuvre

€€ : technique coûteuse à mettre en œuvre

€€€ : technique très coûteuse à mettre en œuvre

= : critère inchangé

➡ : Critère diminué

5

CONCLUSION

Les phénomènes de dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol peuvent être à l'origine de mouvements de terrain susceptibles d'impacter des enjeux en surface. Pour mieux appréhender cet aléa, l'Ineris et le Cerema ont réuni leurs expériences respectives afin d'établir une méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution naturelle du gypse.

Cette méthodologie est basée sur la connaissance des contextes géologiques et hydrogéologiques du milieu, sur l'état du sol et du sous-sol mais aussi sur la compréhension des mécanismes mis en jeu depuis le phénomène de dissolution jusqu'à l'apparition de désordres en surface.

L'intensité des phénomènes redoutés se détermine en fonction de la dimension des désordres attendus. Pour un affaissement, c'est la mise en pente engendrée en surface par la compensation du vide en profondeur qui est utilisée et pour les effondrements localisés, c'est principalement le diamètre du fontis en surface qui est pris en compte.

La probabilité d'occurrence de l'aléa, ou plutôt ici la prédisposition du site vis-à-vis de l'apparition d'un désordre en surface, dépend principalement de deux critères :

- le « gisement », c'est-à-dire la présence ou non de gypse dans le sous-sol et, plus précisément, son épaisseur et sa profondeur qui doivent être suffisants pour occasionner des mouvements de terrain perceptibles en surface (en tenant compte des propriétés du recouvrement) ;
- les « potentiels hydrodynamique et hydrochimique des eaux », c'est-à-dire la présence ou non d'une circulation d'eaux agressives vis-à-vis du gypse. Ces potentiels sont évalués par une analyse fine du contexte hydrogéologique et si possible par la réalisation d'analyses chimiques et par le calcul des indices de saturation.

Le croisement de ces deux paramètres permet d'obtenir le niveau de prédisposition. Il peut être corrigé voir aggravé par la présence de vides dans le sous-sol ou la connaissance de mouvements de terrain associés à la dissolution.

Le croisement de l'intensité et de cette prédisposition permet d'évaluer l'aléa selon trois classes (faible, modéré et fort).

À cette approche générale, doit également être ajoutée la prise en compte d'éventuelles sollicitations extérieures anthropiques ou non (infiltrations, pompages, événements pluviométriques extrêmes...) qui pourraient modifier l'intensité des phénomènes de dissolution et/ou déstabiliser des zones antérieurement dissoutes.

Afin de limiter les risques associés à la présence d'enjeux en surface, des mesures de prévention et de protection peuvent être adoptées. Il s'agit principalement :

- de traiter, si nécessaire, les vides et les zones décomprimées en utilisant les méthodes appropriées techniquement et économiquement (injection, comblement, renforcement des structures, géogrilles...) ;
- de suivre la piézométrie des nappes baignant les niveaux gypseux afin d'obtenir des indications sur la localisation et l'évolution du phénomène de dissolution ;
- de suivre l'apparition de désordres en surface pour caractériser au mieux l'intensité des désordres attendus et identifier les zones actives et leur possible progression géographique ;
- de mettre en place des pratiques de bonne gestion des eaux afin de ne pas modifier les gradients hydrauliques existants, ce qui pourrait accentuer les phénomènes de dissolution ou déstabiliser des zones dissoutes.

Au travers de ce guide, il ressort que l'eau joue un rôle essentiel depuis l'initiation des phénomènes de dissolution jusqu'à la remontée du désordre en surface. De ce fait, sa prise en compte dans l'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse est primordiale. Les travaux réalisés dans ce sens mettent en exergue le rôle primordial des sollicitations anthropiques dans les processus d'évolution des cavités. Afin d'acquérir une compréhension plus fine des mécanismes en jeu, des travaux d'expertises et de recherche sont réalisés par l'Ineris et le Cerema sur cette thématique.

6

GLOSSAIRE

Aquifère : formation hydrogéologique perméable permettant le drainage et la captation de nappes d'eau.

Automorphe : se dit d'un minéral se présentant sous la forme d'un cristal parfait ou, au moins, limité par des faces cristallines planes.

Cavité souterraine : vide présent dans le sous-sol, et dont l'origine est anthropique ou naturelle.

Charge hydraulique : différence de niveau piézométrique entre deux points d'une ligne de courant qui donne naissance à un écoulement.

Cohésion : propriété permettant aux particules d'un sol de rester associées les unes aux autres.

Cône d'influence (ou de rabattement) : zone d'abaissement du niveau d'eau de la nappe autour du point de pompage.

Diagenèse : ensemble des processus physico-chimiques et biochimiques par lesquels les sédiments sont transformés en roches sédimentaires.

Discontinuité (dans un massif) : surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain. Les discontinuités peuvent être de diverse nature : diaclases, failles, fentes ou fractures d'extension, joints stratigraphiques...

Érosion : processus chimique, mécanique ou microbiologique provoquant l'altération des roches.

Évaporite : dépôt riche en chlorures (sel gemme, sylvine, carnallite, etc.) et sulfates (gypse, anhydrite) alcalins, solubles dans l'eau et résultant de l'évaporation de masses d'eau de surface.

Foisonnement : augmentation du volume d'une roche consécutive à sa fragmentation.

Gradient hydraulique : quotient de la différence de charge hydraulique entre deux points d'un milieu poreux saturé, sur une même ligne de courant, par la distance les séparant sur cette ligne de courant.

Indice de saturation : nombre sans dimension permettant de déterminer la stabilité d'un matériau soluble dans l'eau. Il indique si l'eau va précipiter, dissoudre ou être en équilibre avec celui-ci.

Infiltration : pénétration de l'eau de surface dans le sol.

Masse : banc géologique mesurant plusieurs mètres voire dizaines de mètres.

Montée de voute : éboulement localisé et progressif du toit d'une cavité prenant naturellement la forme d'une voûte.

Nappe d'eau souterraine : eau contenue dans les interstices ou les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère.

Niveau piézométrique : niveau d'eau relevé dans un forage caractérisant la pression de la nappe en un point donné.

Poreux : relatif au milieu comportant des vides.

Pression hydrostatique : pression exercée par un fluide sur une surface du fait de sa pesanteur.

Soluble : se dit d'un corps solide qui peut se dissoudre dans un liquide en formant un mélange homogène.

Suffusion : phénomène d'entraînement hydraulique de matériaux fins.

Taux de dissolution : vitesse à laquelle un soluté se dissout dans un solvant.

7

BIBLIOGRAPHIE

- BENITO G., PEREZ DEL CAMPO P., GUTIERREZ-ELORZA M., SANCHO C. (1995).** "Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain", *Environmental Geology*, Vol. 25, pp. 156-164.
- BOULVAIN F. (2011).** *Éléments de Sédimentologie et de Pétrologie sédimentaire*. Cours du Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Liège, www://www2.ulg.ac.be/geolsed/sedim/sedimentologie.htm
- CAILLEUX J.-B., TOULEMONT M. (1982).** « La reconnaissance des cavités souterraines par méthodes diagraphiques », *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, Vol. 26, Issue 1, pp. 33-42.
- CHARMOILLE A., LECOMTE A. (2011).** *Étude des processus de dissolution affectant le sous-sol du Bois de la Tussion (Seine-Saint-Denis, Évaluation de l'aléa et proposition de solutions d'aménagement adaptées*, INERIS DRS-11-100905-02718A.
- CHARMOILLE A., LECOMTE A. (2014).** *Évaluation de l'aléa « mouvements de terrain » lié aux mécanismes de dissolution dans le sous-sol*, INERIS DRS-14-135671-00258A.
- CHAROLA A.E., PUHRINGER J., STEIGER M. (2007).** "Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials", *Environmental Geology*, Vol. 52, pp. 339-352, DOI 10.1007/s00254-006-0566-9.
- COOPER A.H., CALOW R.C. (1998).** "Avoiding gypsum geohazard: Guidance for planning and construction", British Geological Survey, *Technical Report WC/98/5*.
- COOPER A.H., WALTHAM A.C. (1999).** "Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 32, pp. 305-310.
- CUBILLAS P., KÖHLER S., PRIETO M., CHAÏRAT C., OELKERS E.H. (2005).** "Experimental determination of the dissolution rates of calcite, aragonite, and bivalves", *Chemical Geology*, Vol. 216, 1-2, pp. 59-77.
- DAUPLEY X., LAOUFA F., BILLIOTTE J., QUINTARD M. (2015).** « La dissolution du gypse : quantifier les phénomènes », *Mines et Carrières*, Hors-série, pp. 35-43.

- DIDIER C., POKRYSZKA Z., LEDOUX E., JOSIEN J.P. (2006).** *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers – Guide Méthodologique – Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa – Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine*, INERIS-DRS-06-51198/R01
- DIFRE P. (1969).** *Hydrogéologie de Paris et de sa banlieue*. Thèse-Paris.
- FAUCHARD C. et POTHERAT P. (2004).** *Guide technique « Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques »*, Laboratoire central des ponts et chaussées.
- FEUGUEUR L. (1964).** *Sur l'origine possible de quelques effondrements de terrain dans la région Nord et Nord-Est de Paris*, C.R. Société Géologique de France, Vol. 7, p. 283.
- GUTIERREZ M., IBANEZ M.J., PENA J.L., RODRIGUEZ J., SORIANO A. (1985).** « Quelques exemples de karst sur gypse dans la dépression de l'Ebre », *Karstologia*, n°6, pp. 29-36.
- IGC (2016).** *Notice technique, travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéjudien*.
- JARDIN J. (1975).** « Fondations sur le gypse : expérience acquise en région parisienne », *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, n°78, pp. 53-63.
- KREZIAK C. (2013).** *Bassin de risque de Sevran, Villepinte et Tremblay-en-France : cartographie de l'aléa dissolution du gypse*. Rapport CETE IdF n°121000249.
- LECOMTE A., CHARMOILLE A., DAUPLEY X., GOMBERT P. (2012).** *Méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain résultant de la dissolution naturelle de gypse : exemple du bois de la Tussion, Seine-Saint-Denis, France*. Journées Nationales de Géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012). pp. 731-738.
- LECOMTE A., CHARMOILLE A. (2016).** *Étude des mécanismes initiateurs de désordres dans les contextes de dissolution de gypse, retour d'expériences et approche bibliographique*. INERIS DRS-15-149562-12454A.
- MARÇOT N., MIRGON C., ARNAL C., MATHON C., GENOIS J.-L., VEERRHIEST-LEBLANC G., CHAMPION H., SPINOUSA N. (2016).** *Gestion et prévention du risque mouvements de terrain lié à la présence de gypse en PACA - Guide à l'usage des Maires*.

- MARTEAU P. (1993).** Mémento roches et minéraux industriels, Gypse et anhydrite. BRGM R37722.
- MEGNIEN C. (1970).** Atlas des nappes aquifères de la région parisienne, BRGM.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE (2012).** Guide méthodologique, Plan de Prévention des Risques Naturels, Cavités souterraines abandonnées.
- NICOD S. (1976).** « Karst des gypses et des évaporites associées », *Annales de Géologie*, n°471, pp. 513-554.
- PAQUETTE Y. (1991).** Analyse des risques d'effondrements karstiques sur le dôme de La Mure à l'aplomb des travaux miniers de l'U.E. Dauphiné. INERIS GAI-YPa/JS 91-71-6106/R01.
- PERRIN J., NOURY G., CARTANNAZ C., GUTIERREZ T., VAN LAERE A. (2014).** Aléa-Karst : vers une approche liée aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volumes 1 et 2. BRGM RP-63771-FR.
- PINON C. et DEGAS M. (2016).** Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique. INERIS DRS-15-149564-02401A.
- REIFFSTECK P. (2010).** Paramètres de forage en géotechnique : méthode d'essai n°79, Laboratoire central des ponts et chaussées, Méthode d'essai ME79 - 54p.
- RIVET F., CARY L., MATHON C., THIEBAUD E., GIROUX H. (2014).** Analyse des phénomènes de dissolution du gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement - commune de Draguignan (Var). BRGM/RP-63399-FR, CEREMA-H14-029.
- RIVET F. et GIRARD A. (2012).** Carte régionale de l'aléa effondrement/glisserment lié à la présence de terrains gypseux en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. BRGM RP-60896-FR.
- SORIANO M.A., SIMON J.L., GRACIA J., SALVADOR T. (1994).** "Alluvial sinkholes over gypsum in Ebro basin (Spain): genesis and environmental impact", *Hydrological Sciences Journal*, pp. 257-268.
- THIEBAUD E. (2017).** Dissolution des évaporites - Revue bibliographique. Rapport de recherche - Opération de recherche PRECAS (Prévention du Risque d'Effondrement des Cavités Souterraines). Rapport Cerema.
- THOME D. (2006).** Low Mobility Grouting Applications in Karstic Gypsum. Ohio River Valley Seminar XXXVII, Lexington, Kentucky.
- TOULEMONT M. (1970).** Observations géologiques sur les accidents de dissolution du gypse dans la région parisienne. Congrès International de Géologie de l'Ingénieur, pp. 89-98.
- TOULEMONT M. (1974).** « Les problèmes de reconnaissance générale des zones gypseuses à urbaniser, cas du nord-est parisien », *bulletin de liaison du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'est parisien* (70), pp. 85-95.
- TOULEMONT M. (1981).** « Évolution actuelle des massifs gypseux par lessivage, cas des gypes lutétiens de la région parisienne », *bulletin de liaison du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'est parisien*, pp. 35-47.
- TOULEMONT M. (1987).** « Les risques d'instabilités liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne, prévision et cartographie », *bulletin de liaison du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'est parisien* (150/151), pp. 109-116.
- VEZOLE P. (2002).** « Prise en compte des vides de dissolution de gypse dans les projets de construction ». *Revue Française de Géotechnique*, n°100, pp. 71-74.
- VILLARD P., GOURC J.-P., BLIVET J.-C. (2002).** « Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires », *Revue française de Géotechnique*, n° 99, pp. 23-34.
- WALTHAM T., BELL F., CULSHAW M. (2005).** *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*.

Ce guide, réalisé conjointement par l'Ineris et le Cerema pour le compte des pouvoirs publics et à destination des acteurs de la gestion des risques naturels, est le résultat de travaux d'expertise et de recherche réalisés depuis plusieurs années.

Dans tous les contextes où du gypse est présent dans le sous-sol, une dissolution naturelle ou occasionnée par des activités anthropiques peut se mettre en place et créer des vides souterrains de dimensions plus ou moins importantes. Lorsque les conditions géomécaniques sont réunies, la déstabilisation de la cavité ainsi créée peut conduire à l'apparition de désordres importants en surface.

Pour évaluer les aléas effondrements localisés et affaissements liés à ce type de mécanisme, il convient d'en comprendre le fonctionnement et ce, depuis les processus de création des vides jusqu'à leur évolution vers un désordre en surface. Cette compréhension fait appel à un certain nombre de disciplines et compétences qui couvrent les domaines de la géologie, de l'hydrogéologie, de la géotechnique et de l'analyse de risque.

La méthodologie mise en œuvre et détaillée dans ce guide est basée principalement sur la combinaison de critères géologiques et hydrogéologiques. Le croisement de ces critères permet de définir la prédisposition (ou susceptibilité) à l'apparition de mouvements de terrain liée à la présence de gypse dans le sous-sol. L'aléa est ensuite défini par l'association de la prédisposition et de l'intensité du phénomène retenu qui est évaluée à partir des dimensions théoriques des désordres attendus et celles réellement observées *in situ*.

Le caractère soudain et inattendu du mécanisme d'effondrement le rend potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise. Afin de prévenir ce risque, des mesures de prévention, de mitigation et de protection sont proposées dans ce guide.

This handbook, produced conjointly by Ineris and Cerema, is addressed to public authorities and risk managers. It is the result of studies and research works carried out over the past decade.

In most contexts where gypsum is underlying the ground surface, dissolution mechanisms can occur and lead to the creation of underground voids. Whenever the geomechanical conditions are favorable, the destabilization of such cavities can lead to severe ground movements on surface.

The objective of this handbook is to guide hazard assessment studies related to collapse and subsidence phenomena induced by dissolution mechanisms. For that purpose, it is important to describe the global physical process, from the progressive development of voids to their evolution throughout the geological layers up to land surface. This description relies on some disciplines and skills that include hydrogeology, geotechnics and risk analysis.

The methodology proposed by the authors is based on the combination of both geological and hydrogeological criteria. The crossing of these criteria makes it possible to define the predisposition to ground collapses. This hazard is then assessed by the association of the predisposition of the land area and the intensity of the dreaded phenomenon. The magnitude is assessed considering the dimensions of the phenomenon observed in situ or calculated.

The sudden and diffuse nature of ground collapses mechanism makes it potentially dangerous for people and property. To deal with such risks, prevention, mitigation and protection measures are then proposed in this handbook.