

MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES A LA DISSOLUTION DU GYPSE : MECANISMES ET METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'ALEA

GROUND MOVEMENTS RELATED TO GYPSUM DISSOLUTION : MECANISMS AND METHODOLOGY TO HAZARD EVALUATION

Amélie LECOMTE¹, Arnaud CHARMOILLE², Charles KREZIAK³

¹ Ineris, Verneuil-en-Halatte, France

² Ineris, Verneuil-en-Halatte, France

³ Cerema, Trappes-en-Yvelines, France

RÉSUMÉ – Dans la plupart des contextes où le gypse est sous-jacent à la surface du sol, des mécanismes de dissolution peuvent se produire et conduire à la création de vides souterrains susceptibles de remonter à la surface. La compréhension des mécanismes et leur traduction en termes d'aléa sont définies au travers d'une méthodologie applicable à l'ensemble des contextes gypseux.

ABSTRACT – In most contexts where gypsum is underlying the ground surface, dissolution mechanisms can occur and lead to the creation of underground voids and potentially to severe ground movements on surface. The understanding of the mechanisms involved and their translation in terms of hazards are defined through a methodology applicable to all gypsum contexts.

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.

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.

Afin d'aider les acteurs de la gestion des risques naturels, l'Ineris et le Cerema ont établi un guide (Lecomte *et al.*, 2017) permettant de comprendre les mécanismes en jeu et fournissant des outils méthodologiques adaptés à la gestion de cette problématique. Ce document est le résultat de travaux d'expertise et de recherche réalisés depuis plusieurs années par les deux organismes.

La méthodologie mise en œuvre est basée principalement sur la combinaison de critères géologiques et hydrogéologiques. Leur croisement permet de définir la prédisposition 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 cette prédisposition avec l'intensité du phénomène retenu qui est évaluée à partir des dimensions théoriques des désordres attendus et/ou celles réellement observées *in situ*.

2. Compréhension des mécanismes en jeu

2.1. La 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). La dissolution va alors se poursuivre jusqu'à ce que la quantité d'ions en solution soit en équilibre avec le minéral. Les conditions pour atteindre cet équilibre dépendent principalement de la température et de la pression existante (Daupley *et al.*, 2015). Par exemple, dans des 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.

2.2. Création du vide

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, des plus simples aux plus complexes. Elle peut se faire, à titre d'exemple, par l'intermédiaire de fractures préexistantes. Dans ce cas, 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 1a). 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 1b). 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).

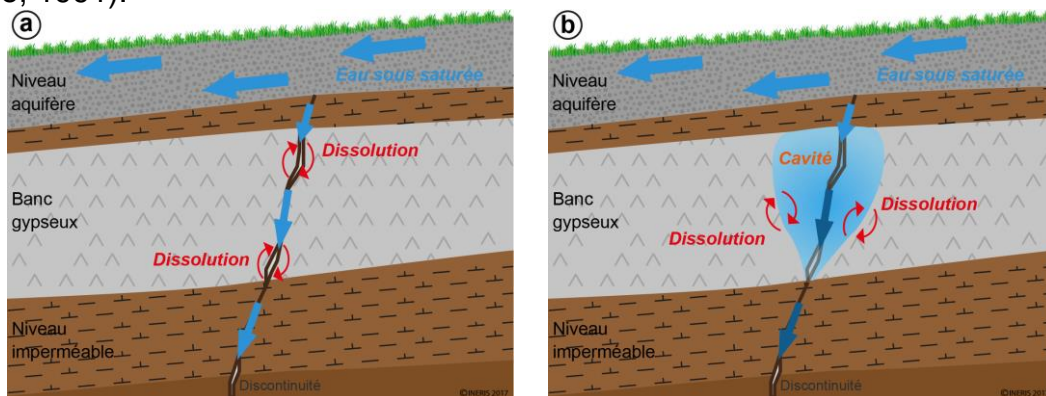


Figure 1 : Schéma représentant la mise en place d'un processus de dissolution via une fracture préexistante qui découpe le niveau gypseux. L'eau sous-saturée circule au sein de l'horizon gypseux (ici dans le cas d'une percolation descendante) par l'intermédiaire de la discontinuité (a) et la dissolution peut alors contribuer à la création d'un vide (b)

2.3. Mécanisme de déstabilisation du vide

Lorsque la cavité est créée par dissolution, sa déstabilisation peut se produire de deux façons différentes. Elle peut être liée à une dissolution active. Dans ce cas, 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.

Elle peut également être la conséquence 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 soit par décolmatage de cavités anciennes comblées après leur formation par des dépôts sédimentaires. Pour ce dernier cas, par exemple, la baisse des niveaux piézométriques, implique une modification des gradients d'écoulement. Ces variations hydrodynamiques provoquent le décolmatage des vides comblés, par entrainement hydraulique des matériaux de remplissage (Toulemont, 1981). Il en résulte des cavités partiellement ou totalement vides. 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 celle-ci (Figure 2b).

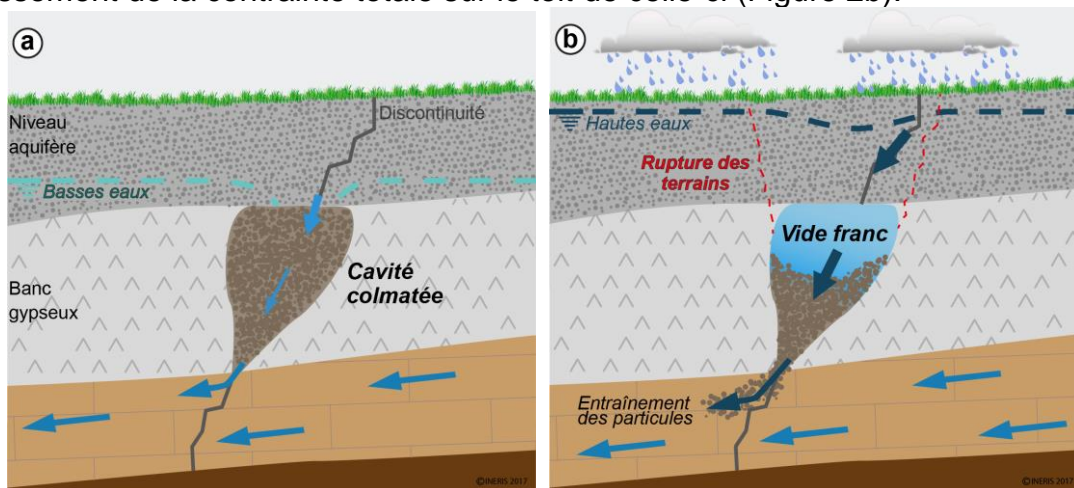


Figure 2 : Schéma représentant la déstabilisation d'une cavité de dissolution ancienne. La cavité colmatée est stable tant que le niveau piézométrique varie peu (a). En cas de variation hydrodynamique importante, la variation du gradient peut induire un entrainement des matériaux de remplissage provoquant l'apparition d'un vide franc et la rupture des terrains (b)

2.4. 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 « auto-comblement ». 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. Elle peut modifier les caractéristiques de foisonnement et donc 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 (Toulemont, 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 3) :

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

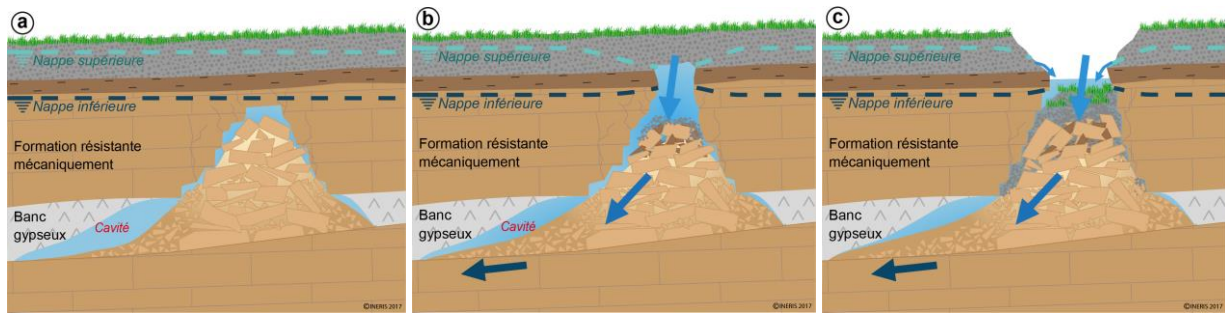


Figure 3 : Schémas représentant la propagation du vide jusqu'à la surface par rupture de l'écran imperméable de la nappe sus-jacente. Le vide proche de l'autocomblement (a), continue sa progression vers la surface grâce aux processus d'érosion et de suffosion qui se mettent en place (b et c)

Ce type de désordre, en contexte gypseux, se caractérise par des extensions horizontale et verticale d'ordre plurimétrique. 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.

2.5. Cas particulier de l'affaissement

Lorsque la dissolution s'opère à l'interface entre la roche soluble et les terrains qui la surmontent 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 pas réunies. La perte de matière issue de la dissolution est, dans ce cas, directement compensée par l'abaissement des terrains surincombants. De façon continue, le vide créé se referme. Si le phénomène de dissolution intéresse une surface suffisamment importante relativement 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.

3. Méthodologie d'évaluation de l'aléa

3.1. Problématique en termes d'aléa

La méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain liés à la dissolution du gypse tient compte de l'ensemble des spécificités liées aux environnements solubles et à leur évolution. Elle se heurte donc à plusieurs difficultés qui existent peu ou pas dans d'autres contextes comme celui par exemple de l'aléa lié aux cavités anthropiques (carrières, mines). Il s'agit :

- du rôle important joué par l'eau dans l'initiation et le développement des cavités de dissolution. Il est donc nécessaire de s'intéresser de près aux interactions eau/roche ;
- du caractère évolutif de ces systèmes naturels ;
- de 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 associé peu aisée et induit inévitablement la prise en compte d'incertitude de localisation parfois importante.

Compte tenu de ces spécificités, l'évaluation de l'aléa doit s'appuyer sur la prise en compte de l'existence de mécanismes de dissolution actifs dans le sous-sol en mesure d'être à l'origine de cavités instables mais également sur la préexistence de vides, résultant de processus de dissolution antérieurs.

3.1. Principes généraux de la démarche

Les grands principes de la méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain liés à la dissolution du gypse s'appuient sur l'acquisition d'un certain nombre de données qui caractérisent les contextes géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques d'un site. Ces données permettent d'évaluer, dans un premier temps, les secteurs pour lesquels des mécanismes de dissolution sont possibles et/ou les secteurs où des vides sont susceptibles de remonter en surface. Le croisement de ces informations permet de définir la prédisposition à l'apparition d'un effondrement ou d'un affaissement. C'est cette prédisposition, croisée à l'intensité du phénomène redouté, qui va définir l'aléa attendu en surface. La figure 4 présente schématiquement la démarche d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain liés 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.

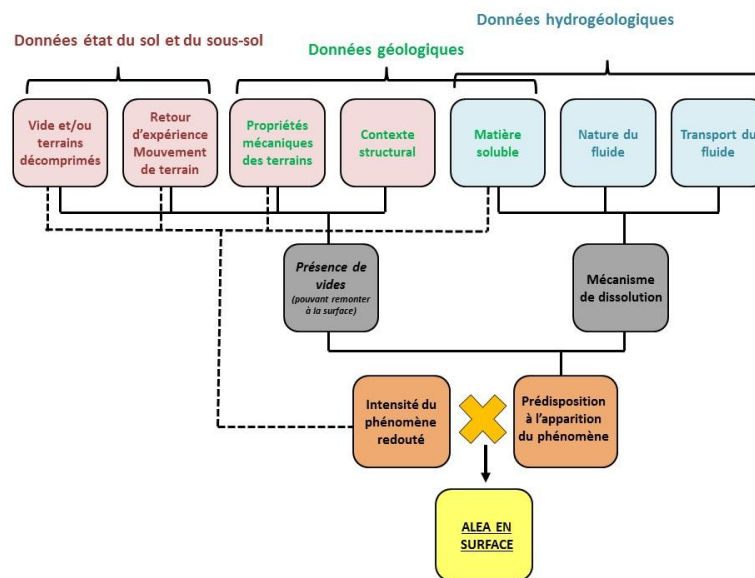


Figure 4 : Présentation de la démarche d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution

3.2. Evaluation de la prédisposition

3.2.1. Critères principaux

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. Néanmoins, même si les données 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 et à une profondeur susceptible d'occasionner des mouvements de terrain perceptibles 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).

L'utilisation et/ou l'acquisition de données hydrogéologiques est un élément primordial dans l'évaluation de la prédisposition. Ces données permettent de comprendre le fonctionnement du système de dissolution et les paramètres qui l'influencent : 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.

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, couplée à des analyses chimiques, permet d'évaluer si les différents flux d'eau dans le sous-sol ont déjà été en contact avec du gypse. 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.

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.

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.

Le Tableau 1 présente la prédisposition définie par croisement des deux critères principaux dont les classes ont été déterminées en considérant des données sommaires. Il constitue une base de raisonnement, les critères devant être adaptés en fonction du contexte et des données disponibles tels que décrit précédemment.

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	
		Circulation peu probable ou eaux saturées	Circulation d'eaux agressives vis-à- vis du gypse
Gisement	Absent	Nulle	Nulle
	Suspecté	Peu Sensible	Sensible
	Avéré	Peu Sensible	Sensible à Très Sensible

3.2.1. Facteurs aggravants

Afin de tenir compte de 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).

L'évaluation de la prédisposition 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 existants 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).

3.2. Evaluation de l'intensité

L'évaluation de l'intensité passe en premier lieu par une caractérisation géométrique des désordres en surface. 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.

Le tableau 2 présente les classes d'intensité retenue. Ce tableau présenté dans le guide PPRN cavité (MEDDE, 2012) a 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 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.

Tableau 2. Classes d'intensité retenues

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 < 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 < 10 m	Cratère +/- profond et suffisamment large pour ruiner une construction récente en béton même sur radier
Elevée	Affaissement	Mise en pente > 6 %	Désordres structurels importants. Bâtiments inhabitables
	Effondrement localisé ou effondrement en masse de la surface	Diamètre > 10 m	Cratère important avec parois abruptes et risque d'engloutissement du bâti ou ruine complète et immédiate de plusieurs constructions.

3.3. 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).

Tableau 3. Grille d'aléa mouvements de terrain

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

4. Conclusions

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 est déterminée en fonction de la dimension des désordres attendus. 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 dont l'épaisseur et la profondeur sont suffisantes 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.

Le croisement de ces deux paramètres permet d'obtenir le niveau de prédisposition, 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).

A 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.

5. Références bibliographiques

- Charmoille A., Lecomte A. (2011), Etude des processus de dissolution affectant le sous-sol du Bois de la Tussion (Seine-Saint-Denis), Evaluation de l'aléa et proposition de solutions d'aménagement adaptées. INERIS DRS-11-100905-02718A.
- Daupley X., Laouafa F., Billiotte J., Quintard M. (2015), La dissolution du gypse : quantifier les phénomènes. Mines et Carrières, Hors-Série, 35-43.
- Lecomte A., Charmoille A., Kreziak C. (2017), Guide méthodologique - Analyse et Gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement liés aux mécanismes de dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. INERIS DRS-17-164710-03375A.
- MEDDE (2012). Guide méthodologique – Plan de prévention des risques naturels – Cavités souterraines abandonnées. 81 pages.
- 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.
- 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.
- Toulemont, M. (1981), Evolution actuelle des massifs gypseux par lessivage, cas des gypses lutétiens de la région parisienne. Bulletin de liaison du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'est parisien, 35-47.