

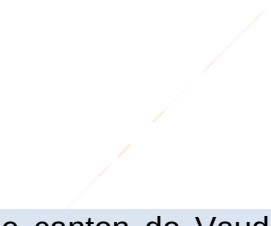
Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 1 Généralités sur l'aléa

Rapport



La Chaux-de-Fonds, le 15.6.2023



Titre :	Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud, Aléa « effondrement de dolines » - Cahier 1, Généralités sur l'aléa. Rapport et annexes.
Auteurs :	Pierre-Yves Jeannin, Denis Blant (collaboration H. Détraz et B. Deléard, bureau BG-Ingénieurs-Conseils SA)
1 ^{ère} de couverture :	Effondrement de type affaissement. Exemple d'un cas situé dans le canton de Neuchâtel (photo Rémy Wenger).
Mandant :	DGE – Direction des ressources et du patrimoine naturels, Unité des dangers naturels, Av. de Valmont 30b, 1014 Lausanne
Mots clés :	dolines, effondrement, affaissement, gypse, calcaire, dissolution, Jura vaudois, Préalpes, Vaud, Suisse

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

ISSKA (2023) – Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud, Aléa « effondrement de dolines » - Cahier 1, Généralités sur l'aléa. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie. Mandant : DGE – Direction des ressources et du patrimoine naturels, Unité des dangers naturels, 26 p.

Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 1 Généralités sur l'aléa

Table des matières

1. Introduction	1
2. Eléments de base	2
2.1. Nature des phénomènes	2
2.1.1. Phénomènes karstiques	2
2.1.2. Définition d'une doline	3
2.1.3. Dolines, affaissements, effondrements, abaissements, subsidences	3
2.1.4. Cas des effondrements dans une couverture épaisse	7
2.2. Vitesse des processus	8
2.2.1. Processus de dissolution	8
2.2.2. Formation des cavités souterraines	9
2.2.3. Formation des abaissements et des effondrements	9
2.3. Typologie géomorphologique	10
2.4. Activité et intensité des phénomènes	10
2.4.1. Caractérisation de l'activité du phénomène	10
2.4.2. Caractérisation de l'intensité du phénomène	10
2.5. Vulnérabilité du bâti, affaissements différentiels et nature des dommages associés	11
2.5.1. Généralités	11
2.5.2. Détermination de la vulnérabilité du bâti	12
2.5.3. Affaissement différentiels et nature des dommages associés	13
3. Méthodes d'investigations	15
3.1. Analyse des documents	15
3.2. Observations sur le terrain	15
3.3. Géophysique	16
3.4. Forages et sondages	16
3.5. Monitoring de niveau du sol	16
4. Mitigation	17
4.1. Mesures préventives ou de remédiation	17
4.2. Evaluation de l'évènement	18
4.3. Mesures de remédiation en cas d'évènement	19

4.4. Impacts des mesures constructives	20
4.4.1. Impacts liés aux mesures et liés aux objets construits	20
4.4.2. Eaux souterraines	20
4.4.3. Constructions avoisinantes et infrastructures	21
5. Données de base et documents	22
5.1. Carte indicative du danger d'effondrement	22
5.2. Carte des dangers naturels d'effondrement	23
5.3. Analyse de site selon l'EPFL	25
6. Conclusion	25
7. Bibliographie	26

Liste des annexes

- Annexe A. Tableau indicatif des principales lithologies rencontrées en Suisse**
- Annexe B. Types d'aménagements adéquats sur des dolines, dispositions préventives et/ou mesures de remédiation**

Liste des Figures

Figure 1	Bloc-diagramme schématisant le karst et les principaux phénomènes qui lui sont associés.	2
Figure 2	Les deux environnements principaux dans lesquels se forment les dolines : à gauche dans les calcaires et/ou alternance de marnes et de calcaires (Combe des Begnines, Jura vaudois), à droite dans les gypses (Col de la Croix, Préalpes).	3
Figure 3	Distinction entre les termes usuellement utilisés pour décrire les phénomènes de mouvements de terrain principalement verticaux (adapté de GEOLEP 2003 et de Waltham et al. 2010).	4
Figure 4	Principe de la suffosion induisant un abaissement à gauche. Il peut, si le terrain présente une certaine cohésion, conduire à un effondrement (image de droite).	5
Figure 5	Classification des différents types de dolines, différenciés entre affaissements et effondrements selon Waltham et al 2010. Il est probable que le type « subsidence sinkhole dropout » se transforme en « subsidence sinkhole suffosion » avec le temps. Dans bien des cas, les dolines de suffosion seraient des témoins d'anciens effondrements.	6
Figure 6	A gauche : abaissement dans la région de Couvet, NE (événement lent) ; à droite : effondrement (événement soudain) sur un terrain de football (Bex, VD).	6
Figure 7	Principe des affaissements sur une couverture meuble épaisse surmontant des calcaires.	8
Figure 8.	Bâtiment légèrement fissuré. Présence de doline non avérée, mais géologie favorable à l'apparition d'un phénomène d'effondrement par dissolution du gypse (Panex, UDN 2012).	11
Figure 9.	Bâtiment fissuré avec tassement différentiel à cause de la présence d'une doline sous-jacente (Huemoz, UDN 2015).	11
Figure 10.	Bâtiment fissuré par un abaissement de terrain (Bâle-Campagne) et effondrement sous un trottoir (Jura neuchâtelois).	12
Figure 11.	Détermination de la classe de vulnérabilité d'un bâtiment.	13
Figure 12.	Matrice de risques entre l'intensité des abaissements différentiels et la vulnérabilité d'un bâtiment.	14
Figure 13	Comblement classique de doline, selon Faculté polytechnique de Mons, modifié.	18
Figure 14.	Aperçu de la procédure d'évaluation d'un site en cas d'événement, en vue de prendre des mesures de mitigation. L'évaluation est globalement analogue à celle de l'évaluation préventive, mais c'est davantage la compréhension de l'événement que la probabilité d'occurrence qui est visée par les investigations.	19
Figure 15	Extrait de la carte indicative « plus » de l'aléa Effondrement (Vallée de Joux).	23
Figure 16	Légende des cartes de danger d'effondrement et d'affaissement selon matrice OFEV.	24
Figure 17	Extrait de la carte de dangers naturels de l'aléa Effondrement (Vallée de Joux).	24

Liste des Tableaux

Tableau 1	Impacts liés aux mesures de remédiation.	20
Tableau 2	Aperçu des impacts potentiels sur les eaux souterraines d'ouvrages construits à proximité des phénomènes (dolines).	21

Gestion des instabilités karstiques du canton de Vaud

Aléa « effondrement de dolines »

Clé de lecture du rapport

Ce document est séparé en deux cahiers qui comportent chacun *un rapport* et *des annexes* :

Cahier 1 : Généralités sur l'aléa « effondrement de dolines » (présentation du phénomène)

Cahier 2 : Méthode d'analyse de site (présentation d'une méthode permettant d'évaluer la dangerosité d'un phénomène ou la probabilité qu'un phénomène se produise)

Le **Cahier 1** présente les mécanismes du phénomène d'effondrement en terrain karstique. Il décrit la nature, la vitesse et les méthodes d'investigation pour la protection des biens (prévention) et les remédiations possibles lorsqu'un effondrement se produit.

Le **Cahier 2** présente une méthode d'analyse de site permettant d'évaluer la dangerosité d'un phénomène ou la probabilité qu'un phénomène se produise, selon des critères géologiques, hydrologiques, et d'aménagement du territoire. Le modèle est illustré avec la présentation de cinq cas pratiques. L'**annexe D** en trois tableaux est la clé de voûte de cette partie. Il permet de déterminer dans quelle situation de danger l'on se trouve, de faire une sélection des mesures de mitigation* en fonction du danger et de sélectionner les mesures de protection les mieux adaptées à l'occupation du sol.

Il est adapté au cas standard d'une construction de type chalet ou villa.

L'analyse d'un cas d'effondrement potentiel ou survenu peut se faire indépendamment avec ou sans le Cahier 2.

La présente partie constitue le **Cahier 1**.

**Mesures de mitigation = mesures de réduction d'un risque identifié ou non.*

Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 1

Généralités sur l'aléa

1. Introduction

La carte indicative et les cartes de dangers naturels de l'aléa effondrement du canton de Vaud localisent les secteurs qui présentent potentiellement un danger (de faible à élevé). Tout nouveau projet de construction ou d'aménagement dans un tel secteur peut faire l'objet d'une évaluation préventive. Les objets existants situés dans ces secteurs devraient aussi faire l'objet d'une évaluation, en particulier ceux pour lesquels les cartes indiquent des valeurs moyennes à élevées de danger d'effondrement.

Différentes problématiques liées à la présence de dolines ou d'effondrements entravent certains projets de développement, ou menacent des constructions et des infrastructures existantes. Nous relevons l'absence jusqu'à aujourd'hui de recommandations explicites pour décider des démarches à entreprendre afin de prévenir ou résoudre de tels problèmes.

Un élément jusqu'alors peu connu est aussi pris en compte dans ce rapport : les effondrements de couverture meuble épaisse (effondrements ou affaissements liés à l'infiltration d'une partie des matériaux de la couverture dans le karst sous-jacent). Ce cas de figure est présenté plus en détail dans le chapitre 2.1.4.

Le canton de Vaud, par l'Unité des dangers naturels, a souhaité la création d'un guide à l'usage des communes et des particuliers pour faciliter la gestion des dolines et des dangers qu'elles peuvent représenter. Le présent document doit donc permettre de reconnaître les phénomènes et donner des indications sur la prévention des risques et sur les remédiations possibles. Il doit en particulier inclure des recommandations techniques sur les aménagements de ces dolines (du simple comblement à la construction, par exemple, d'un pont pour répartir les contraintes).

Le présent guide est séparé en deux parties distinctes : les généralités, les mesures d'investigation et de remédiation dans le Cahier 1 et une méthode d'analyse de site dans le Cahier 2.

Cahier 1 : le rapport présente les généralités concernant l'aléa effondrement, la méthodologie de gestion de l'aléa, la manière de gérer les effondrements après qu'ils se soient produits (évaluation du cas, investigations éventuelles, mesures constructives de remédiation), et les mesures constructives qui peuvent être envisagées pour limiter le danger et les risques. Enfin, nous présentons une approche descriptive des impacts sur l'environnement des constructions et des mesures de protection.

Le Cahier 2 propose une méthode d'analyse de site, permettant de traiter chaque cas de manière particulière et de juger de la nécessité d'investigations complémentaires ou pas.

Le travail présenté ici constitue donc un guide qui facilitera la mise en œuvre d'une stratégie adaptée aux problématiques géotechniques et environnementales liées aux effondrements et affaissements de nature géologique et hydrogéologique.

Il a aussi pour but de montrer que la présence d'une doline ou d'un groupe de dolines n'est pas forcément un frein au développement d'un projet, mais un élément important dont il faut tenir compte et qu'il faut gérer selon les connaissances du terrain et les expériences existantes tout au long de l'établissement du projet et de la réalisation de celui-ci.

2. Eléments de base

2.1. Nature des phénomènes

2.1.1. Phénomènes karstiques

Le karst est un ensemble de phénomènes géomorphologiques et hydrologiques liés à la dissolution de la roche par de l'eau plus ou moins chargée en gaz carbonique. L'eau élargit les fissures du sous-sol et s'y infiltre, induisant des phénomènes des « phénomènes karstiques », tels que des dolines, grottes, gouffres, pertes et sources. Ces formes sont caractéristiques des « régions karstiques ». La présence de cavités et de circulation d'eau dans la masse rocheuse conduit à certaines instabilités du terrain en surface (affaissements, effondrements...). Le terme « karst » est originaire de la région éponyme du Carso ou Kras, haut-plateau calcaire situé entre l'Italie, la Slovénie et la Croatie, où ces phénomènes particulièrement impressionnants ont été décrits pour la première fois.

Le bloc-diagramme de la Figure 1 ci-dessous illustre les particularités du karst et des phénomènes qui y sont liés.

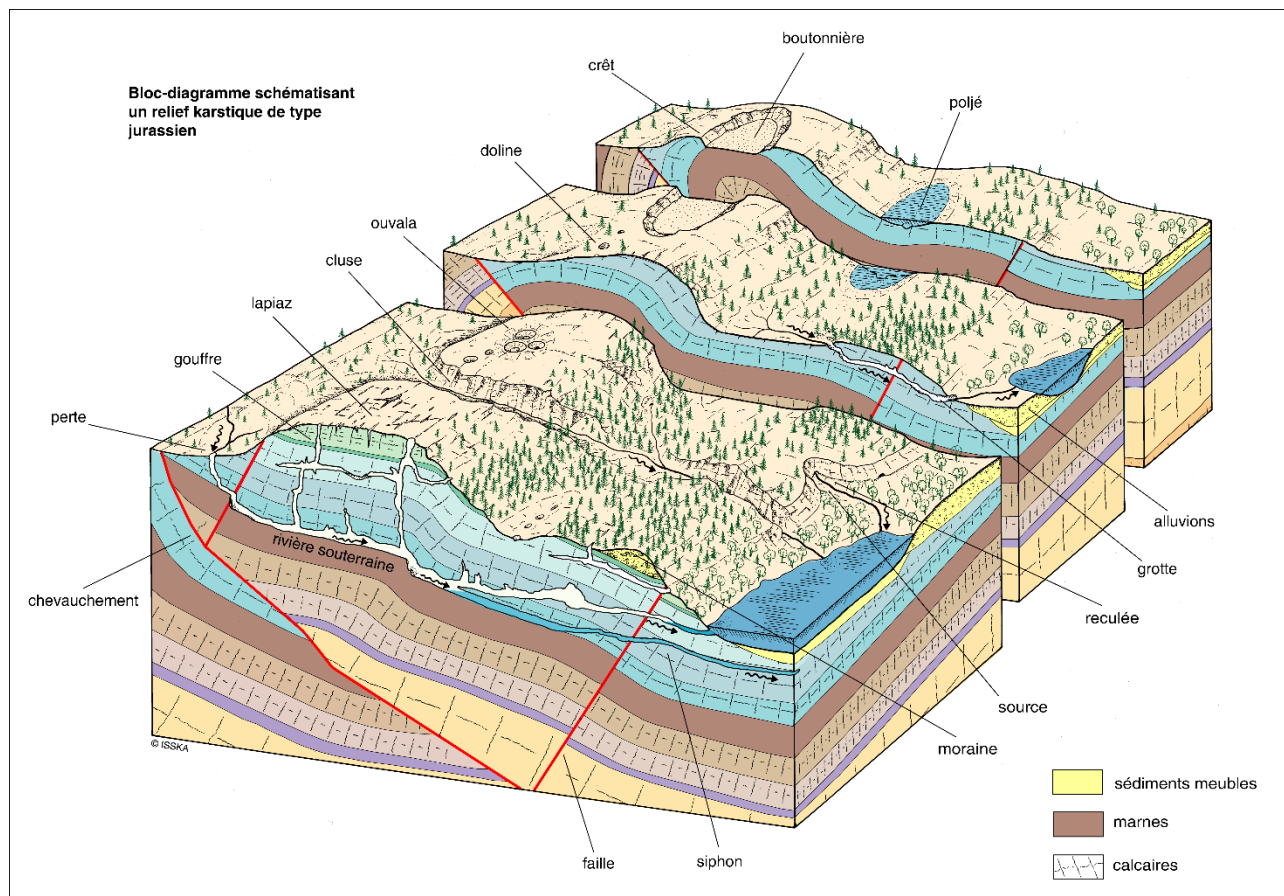


Figure 1. Bloc-diagramme schématisant le karst et les principaux phénomènes qui lui sont associés.

2.1.2. Définition d'une doline

Les dolines, appelées parfois aussi emposieux, sont un des éléments les plus caractéristiques du relief karstique. Ces dépressions plus ou moins circulaires, qui font le plus souvent quelques mètres de largeur et de profondeur, sont formées par la dissolution de la roche encaissante par l'eau. Elles sont essentiellement présentes dans les roches calcaires et gypseuses.

L'annexe A donne un tableau des principales lithologies karstifiables en Suisse.

Les dolines sont de dimension très variable. Elles peuvent être à peine perceptibles à l'œil nu quand elles sont peu profondes, marquer une faible incurvation du terrain, ou faire plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Il arrive parfois qu'elles s'ouvrent subitement en donnant naissance à un véritable gouffre. Leur diamètre peut varier d'un à deux mètres jusqu'à plus de 100 m pour les plus vastes.

Les dolines se forment par dissolution progressive du substrat rocheux ou par effondrement brusque du toit d'une cavité sous-jacente. Le moteur de la formation de ces phénomènes est appelé érosion karstique. Cette érosion est liée au fait que les eaux chargées de gaz carbonique (CO₂) dissolvent le calcaire. Pour le gypse, sa solubilité au contact de l'eau est encore bien plus élevée.

Les dolines sont situées principalement sur des discontinuités du terrain (croisement de fissures, limites entre deux couches de roche, bancs particulièrement solubles). Elles constituent des points d'infiltration préférentielle des eaux de surface. Cet écoulement vers le fond de la doline n'est généralement pas visible car il se produit pour l'essentiel dans la zone d'altération des calcaires appelée « épikarst » ou dans une couverture (sol, moraine ou autre) tapissant le fond et les côtés de la doline. L'écoulement et le point où l'eau se perd sont parfois visibles. C'est le cas des dolines dans lesquelles se jette un ruisseau (on nomme celles-ci des *pertes* ou des *emposieux*).



Figure 2. Les deux environnements principaux dans lesquels se forment les dolines : à gauche dans les calcaires et/ou alternance de marnes et de calcaires (Combe des Begnines, Jura vaudois), à droite dans les gypses (Col de la Croix, Préalpes).

2.1.3. Dolines, affaissements, effondrements, abaissements, subsidences

Toutes ces définitions ont un élément commun, elles décrivent des phénomènes dans lesquels une zone du territoire s'abaisse par des mouvements principalement verticaux par rapport aux zones voisines. Certains nomment affaissements ce phénomène générique, d'autres subsidence, d'autres encore dolines.

La plupart des classifications incluent une composante liée à la genèse du phénomène.

Dans ce rapport, nous reprenons, en l'adaptant légèrement la nomenclature proposée par Parriaux *et al.* (2003) et décrite à la Figure 3. Après différentes discussions, nous avons cependant décidé

d'utiliser le mot « abaissement » plutôt que « subsidence » estimant que ce dernier terme avait une signification différente dans le langage géologique usuel, du moins en français.

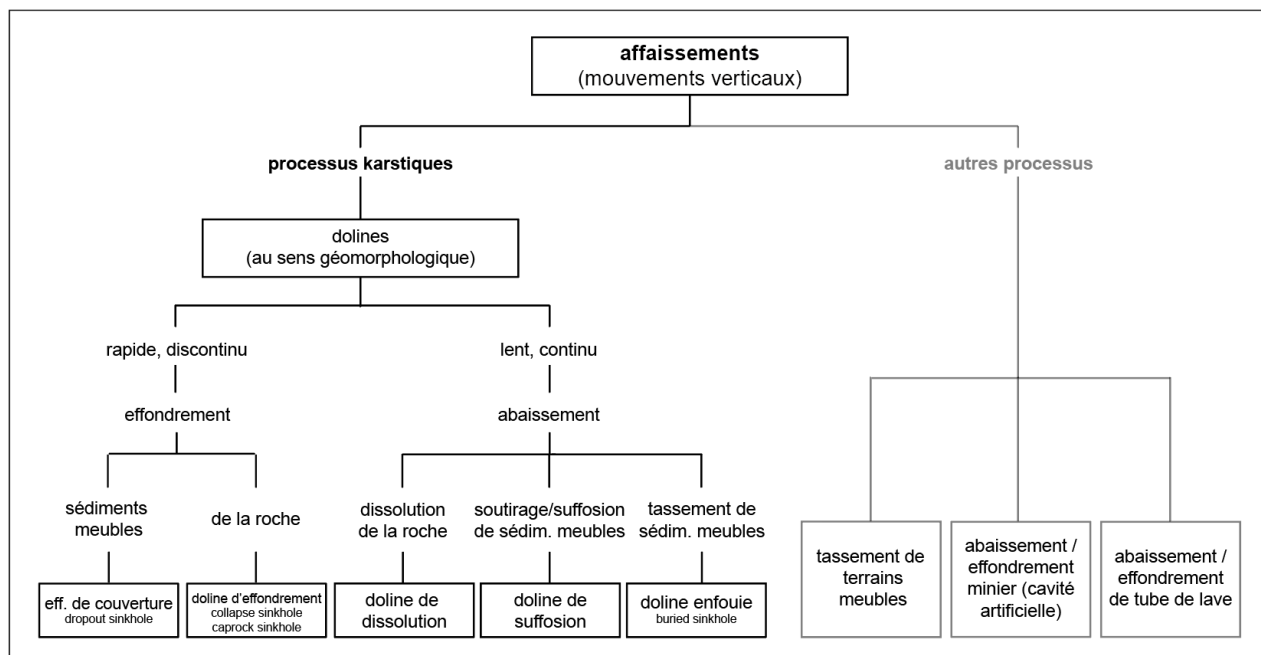


Figure 3. Distinction entre les termes usuellement utilisés pour décrire les phénomènes de mouvements de terrain principalement verticaux (adapté de GEOLEP 2003 et de Waltham et al. 2010).

Nous y ajoutons une nuance : les « dolines » représentent l'ensemble des affaissements karstiques (abaissements et effondrements).

Le présent guide est focalisé sur la question des dolines, et ne couvre pas la question des abaissements et effondrements d'origine anthropique (p. ex. miniers), même s'il existe des similitudes entre ces deux cas (les directives de la Confédération sur les dangers naturels ne prennent pas en compte les effondrements d'origine anthropique). Il ne traite pas non plus les tassements par consolidation des terrains meubles.

Concernant la classification des dolines (les 5 classes en bas à gauche de la Figure 3), nous reprenons en l'adaptant légèrement celle de Waltham et al. 2010, qui différencie les dolines liées à des effondrements de celles liées à des abaissements (subsidence en anglais). Les détails sont présentés en Figure 5.

Principe de la *suffosion*

La suffosion est un phénomène très répandu de soutirage de matériaux fins d'une couverture peu consolidée dans les vides de la roche sous-jacente. L'érosion « par-dessous » de la couverture fait remonter le vide qui finit par atteindre la surface et créer un affaissement à cet endroit. On parle alors de dolines de suffosion.

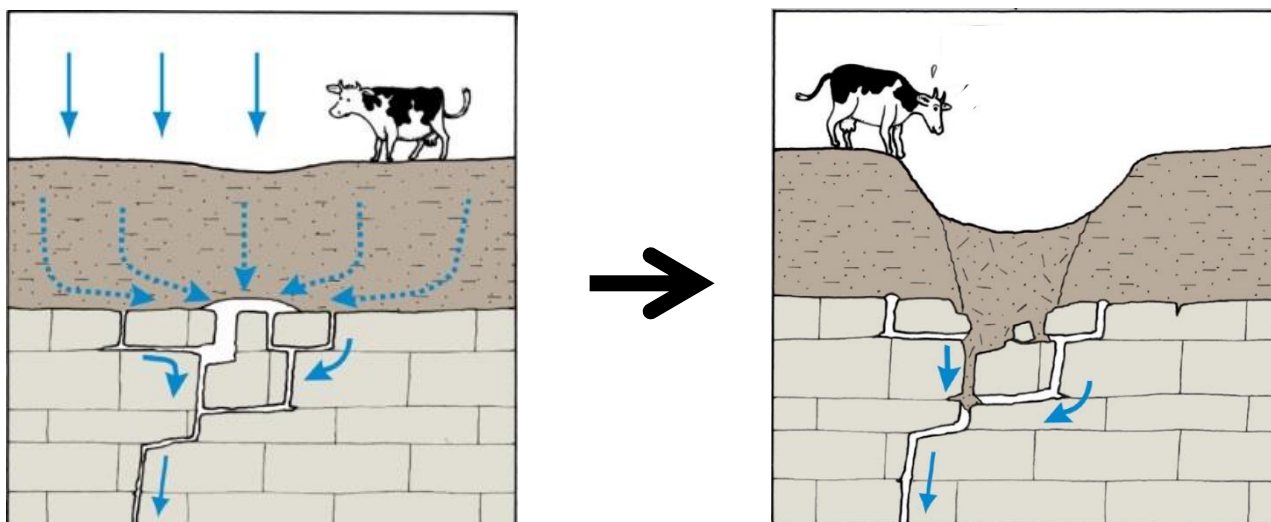
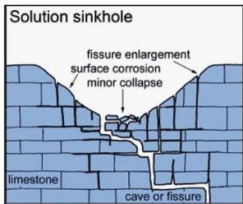
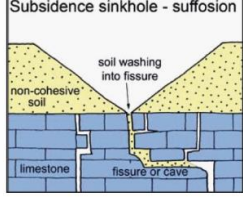
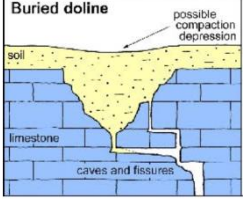


Figure 4. Principe de la suffosion induisant un abaissement à gauche. Il peut, si le terrain présente une certaine cohésion, conduire à un effondrement (image de droite).

Abaissements

Entraînement progressif du matériau vers la profondeur :

Doline de dissolution		Processus de formation	Abaissement de la surface par dissolution de la roche
		Type de roche	Roches sensibles à la karstification (surtout calcaire et gypse)
		Vitesse de formation	Morphologie évoluant sur une échelle de 20'000 ans*
Doline de suffosion		Danger géotechnique	Visible en surface, présence de cavité et fissure en subsurface
		Processus de formation	Soutirage de sédiments meubles dans un vide existant
		Type de roche	Sédiments non-cohésifs sur une roche karstifiée
Doline remplie		Vitesse de formation	Abaissement évoluant sur une échelle de mois ou d'années
		Danger géotechnique	Abaissement lent de sédiments meubles
		Processus de formation	Soutirage/tassement des sédiments remplissant une doline
		Type de roche	Sédiments non-cohésifs sur une roche karstifiée
		Vitesse de formation	Abaissement évoluant à l'échelle de décennies
		Danger géotechnique	Abaissement lent de sédiments meubles

* mais beaucoup plus rapide dans les gypses et les cornieules

Effondrements

Rupture brutale du toit d'une cavité formant une excavation dans le sol :

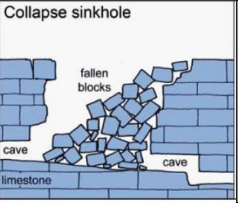
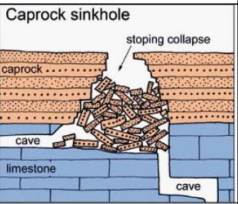
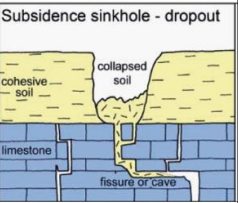
Effondrement rocheux		Processus de formation	Effondrement de la voûte rocheuse sur un vide existant
		Type de roche	Roches sujettes à la karstification et peu stable (surtout gypse)
		Vitesse de formation	Instantané, très rare en calcaire, assez fréquent en gypse
		Danger géotechnique	Roche en place instable, peut être lié à augmentation de charge
Effondrement de couverture indurée		Processus de formation	Effondrement de la voûte rocheuse d'une roche peu stable
		Type de roche	Roche non karstique ou semi-karstique sur cavité
		Vitesse de formation	Instantané ou presque
		Danger géotechnique	Roche en place instable, peut être lié à augmentation de charge
Effondrement de couverture meuble		Processus de formation	Effondrement de la couverture meuble sur un vide existant
		Type de roche	Sol cohésif recouvrant une cavité
		Vitesse de formation	Quelques minutes, dans un vide ayant évolué en quelques heures à années
		Danger géotechnique	Effondrement brutal de la couverture meuble

Figure 5. Classification des différents types de dolines, différenciés entre affaissements et effondrements selon Waltham et al 2010. Il est probable que le type « subsidence sinkhole dropout » se transforme en « subsidence sinkhole suffosion » avec le temps. Dans bien des cas, les dolines de suffosion seraient des témoins d'anciens effondrements.

Dans la plupart des cas d'effondrement sur calcaire, c'est le type « Effondrement de couverture meuble » qui intervient. Dans le gypse (ou le sel), le cas d'effondrement rocheux peut être observé, dans la mesure où un vide métrique peut se former à l'échelle de quelques décennies, voire années. Les autres types sont beaucoup plus rares mais peuvent cependant se rencontrer dans le canton de Vaud.



Figure 6. A gauche : abaissement dans la région de Couvet, NE (événement lent) ; à droite : effondrement (événement soudain) sur un terrain de football (Bex, VD).

Petit glossaire des phénomènes d'affaissements karstiques :

Abaissement	Affaissement de terrain caractérisé par un mouvement lent et continu ;
Activité du phénomène	Caractérisation de la vitesse d'évolution du processus d'abaissement (effondrement ou affaissement) de la doline. On distingue en général <i>actif</i> , <i>peu actif</i> , <i>inactif</i> . Certaines investigations permettent de donner une valeur en mm/a ;
Affaissement (phénomènes d')	Ensemble des phénomènes lents ou rapides liés à la descente essentiellement verticale de la surface du sol. En milieu karstique, les dolines représentent les principaux phénomènes d'affaissement.
Aléa :	Événement naturel susceptible de provoquer des dégâts ;
Effondrement	Affaissement de terrain caractérisé par un mouvement rapide et discontinu ;
Événement (naturel)	Changement brutal d'état du phénomène, p. ex. effondrement ;
Intensité du phénomène	Multiplication de la taille par l'activité, ce qui donne une idée du volume annuel soutiré ;
Mitigation (mesures de)	Mesures de réduction d'un danger identifié ou non, et/ou de la vulnérabilité d'un enjeu. ;
Phénomène	Objet au sein duquel se passe l'évènement ou l'aléa (dans le cas présent, une doline) ;
Prévention (mesure de)	Mesures permettant de réduire le risque lié à un aléa.
Probabilité d'occurrence	Possibilité en rapport avec une situation ou une période donnée qu'un événement se produise.
Remédiation	Intervention humaine (processus de réparation) permettant au phénomène de revenir à un état stable après la survenue d'un événement.
Subrosion	Lessivage et transport souterrains de sédiments meubles emportés par un flux d'eau souterraine s'infiltrant dans le soubassement rocheux.
Suffosion	Phénomène de soutirage de matériaux fins d'une couverture peu consolidée dans les vides de la roche sous-jacente.
Taille du phénomène	Caractérisation en mètres de la zone touchée par le phénomène. Il peut s'agir d'un groupe de dolines ;
Typologie	Classification de phénomènes en diverses classes géomorphologiques.

2.1.4. Cas des effondrements dans une couverture épaisse

Si les cas d'effondrement de couverture meuble peu épaisse (moins de 10 mètres) sont nombreux, ceux se produisant avec une couverture épaisse (plus de 10 mètres et potentiellement plus de 50 mètres) ne sont souvent pas reconnus comme tels. Le phénomène de suffosion ou soutirage des matériaux meubles dans les vides ou fissures sous-jacentes est le même que pour les effondrements de couvertures de faible épaisseur. Dans les deux cas, une infiltration concentrée d'eau dans la couverture (p.ex. fuite de conduite) pourra initier le processus. Dans une couverture épaisse, le phénomène pourra prendre des années voire des décennies pour que le vide remonte près de la surface et crée un affaissement ou un effondrement visible. La quantité de matériaux érodés peut alors être importante, induisant un effondrement conséquent. A partir d'une certaine épaisseur de couverture, la probabilité qu'une couche consolidée puisse bloquer la remontée du

vide vers la surface augmente, diminuant la probabilité d'effondrement. Il est toutefois difficile de fixer une limite franche à l'épaisseur à partir de laquelle cette probabilité diminue. Dans nos régions, un ordre de grandeur de 50 mètres a été admis, mais il devrait être justifié par des investigations si l'enjeu est important.

Un exemple de ce type est connu dans le demi-canton de Bâle-Campagne, dans la région de MuttENZ. La couverture, qui présente une épaisseur de 20 à 40 mètres repose sur des calcaires très karstifiés. On y observe de nombreux effondrements dans le périmètre d'un abaissement d'une surface de l'ordre de 1 km².

Un exemple d'effondrement dans une couverture épaisse a été documenté sur la commune de Saint-Cergue (VD).

Le phénomène peut se rencontrer dans les roches carbonatées et les roches sulfatées.

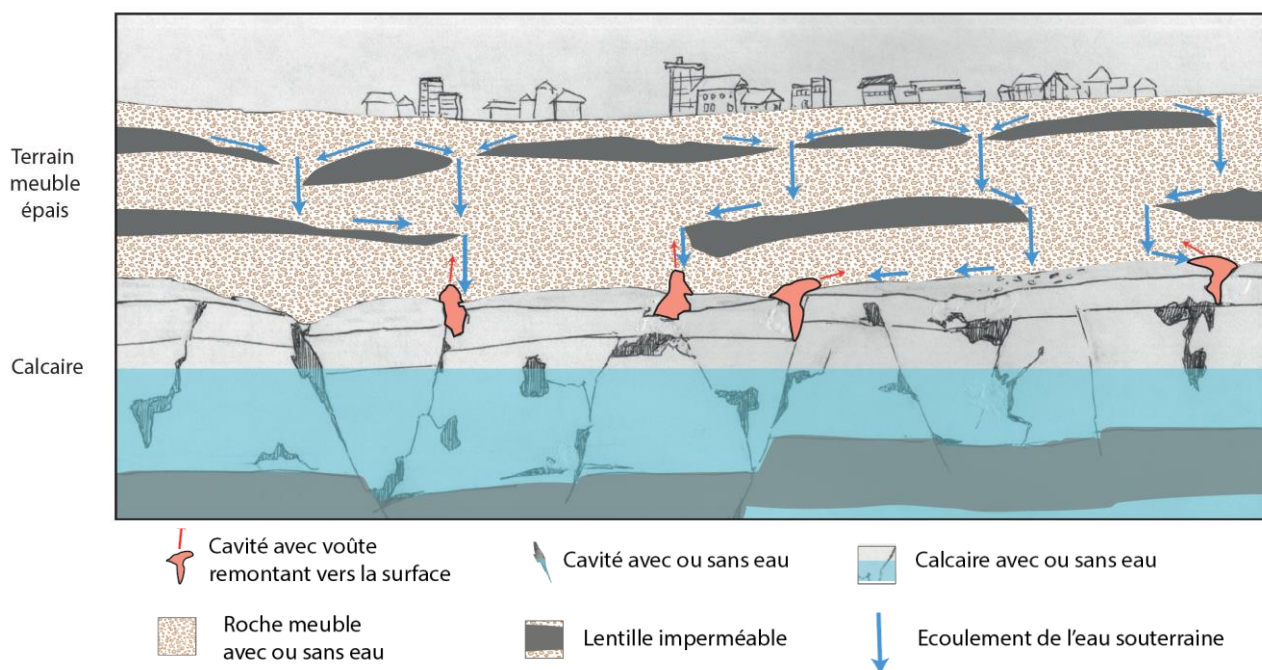


Figure 7. Principe des affaissements sur une couverture meuble épaisse surmontant des calcaires.

2.2. Vitesse des processus

La formation des dolines et la genèse des effondrements sont pratiquement toujours liées à la présence d'une cavité souterraine, ou au moins d'une fissure permettant à de l'eau de circuler.

2.2.1. Processus de dissolution

Certaines roches, telles les calcaires, les dolomies, les roches salines ou le gypse, sont plus ou moins facilement dissoutes par les eaux souterraines. La dissolution des roches calcaires dépend aussi de la charge en gaz carbonique de l'eau. Dans ces roches, des cavités et des conduits souterrains peuvent se former et s'élargir au fil du temps, en particulier lorsque les écoulements d'eau se concentrent en certains endroits (processus de karstification, cf. définition en page 2). Ces phénomènes conduisent entre autres à la formation de grottes, de dolines, de lapiez et autres formes

géomorphologiques bien connues sur les plateaux calcaires du Jura ou dans les zones à gypse du Chablais.

La création de vides au sein du massif rocheux diminue sa résistance à la charge, et il peut s'ensuivre des tassements, voire un effondrement partiel ou total des terrains situés au-dessus des cavités. Les effondrements sont particulièrement fréquents si le toit des cavités est formé de terrains faiblement consolidés.

2.2.2. Formation des cavités souterraines

Dans certaines lithologies (typiquement le gypse, éventuellement les cornieules) la formation même des cavités peut être rapide, de l'ordre de quelques années, si une circulation d'eau est créée ou modifiée. Si le flux d'eau est conséquent et continu, une cavité peut même se former en quelques semaines.

Dans les autres lithologies, les cavités se forment généralement en plusieurs milliers d'années. Dans ces lithologies, l'évaluation porte sur la présence ou l'absence de cavité, sans considérer l'évolution possible de celle-ci. Dans certains cas très particuliers, p.ex. un flux d'eau important, continu et très agressif, des cavités peuvent se former en quelques décennies, ce qui peut être pris en compte dans l'évaluation.

Dans quelques rares cas bien spécifiques (roche facilement érodable et configuration qui permet à l'eau de creuser sous la surface du sol), l'érosion mécanique peut jouer un rôle et permettre la formation de cavités assez rapidement dans la roche en place.

2.2.3. Formation des abaissements et des effondrements

La plupart du temps, les dolines (abaissements et effondrements) se produisent en raison du soutirage de la couverture meuble qui recouvre un vide sous-jacent situé au toit du soubassement rocheux. Dans le cas des dolines d'effondrement de couverture, le vide remonte à travers la couverture.

Dans les zones karstiques de nos régions, qu'elles soient de nature calcaire ou gypseuse, le nombre de cavités (ou points d'infiltration des eaux dans la roche) présentes au sommet du toit rocheux est important, probablement de l'ordre de 1 à 10 cavités par hectare. Un équilibre mécanique s'est généralement établi entre la cohésion de la couverture et les flux érosifs. Si la cohésion de la couverture diminue soudainement (p.ex. par une perte soudaine de cohésion des argiles) ou si le flux érosif augmente (p.ex. par une augmentation du flux d'infiltration ou une remontée de la nappe d'eau souterraine), alors la couverture s'effondre dans la cavité.

La plupart du temps le phénomène est assez rapide (quelques jours à quelques mois) après un changement de conditions (p.ex. la mise en service d'un système d'infiltration ou une fuite dans une conduite). Il arrive cependant souvent que le vide remonte dans la couverture et se bloque sous une partie plus cohésive de celle-ci. La cavité peut rester stable plusieurs années. Elle tendra cependant à s'élargir par érosion des parois, rendant la portée de la voûte de plus en plus grande, jusqu'à la rupture. Si la couverture est épaisse, plusieurs blocages successifs peuvent se produire et la cavité peut mettre plusieurs années ou même décennies pour remonter jusqu'en surface.

En roche nue, les effondrements ne se produisent (presque) que dans les roches les plus solubles (gypse, cornieules). La dynamique a été décrite au § précédent.

2.3. Typologie géomorphologique

Les dolines ont des formes et des tailles très variables. Il peut s'agir d'une légère dépression dépassant à peine un mètre de diamètre pour une profondeur de quelques centimètres, ou d'un effondrement vertical de plusieurs dizaines de mètres de diamètre (parfois plusieurs centaines de mètres dans les régions tropicales). Les critères principaux de description sont :

- La forme (indice d'asymétrie, forme particulière)
- La taille (en mètres, diamètre ou largeur max. et min.)
- La pente (pente moyenne, pente max)
- La profondeur (dénivelé entre le fond et le bord le plus bas, respectivement le plus haut)
- La présence de roche visible (nulle part, en haut, dans la pente, partout)
- La végétation (végétation typique de zone humide, intermédiaire, sèche, autre)
- La présence d'un écoulement visible (permanent, trace d'écoulement temporaire, jamais)
- Les indices d'activité (continuité du sol, pentes variables et emboîtées...)

2.4. Activité et intensité des phénomènes

2.4.1. Caractérisation de l'activité du phénomène

De manière générale, une dépression karstique qui ne se comble pas est active, impliquant que le taux d'ablation est supérieur ou égal à l'accumulation de matériaux dans le creux.

La profondeur et la forme sont donc des indices d'activité. La mesure du taux d'abaissement par lidar ou photogrammétrie permet une évaluation plus précise. L'analyse de documents cartographiques anciens, ou les traces de dommages sur des bâtiments ou infrastructures, ou des mesures de nivellement permettent aussi d'évaluer l'activité des dolines.

Pour les dolines d'abaissement, on distinguera les catégories suivantes :

Inactif : taux d'abaissement nul ou positif (soulèvement par comblement) = dépression très peu marquée à fond plat, avec peu d'indices d'abaissement dans les alentours.

Peu actif : taux d'abaissement de l'ordre du mm/an = dépression bien visible sans être très marquée (profondeur de l'ordre de 1 à 3 m).

Actif : taux d'abaissement de l'ordre du cm/an = dépression marquée avec des pentes abruptes et une profondeur de plusieurs mètres, apparition de roches dans les flancs de la doline.

Très actif : taux d'abaissement de plusieurs cm/an = dépression marquée et profonde avec des indices de rupture de la continuité du sol.

Pour les dolines d'effondrement, c'est souvent plus difficile à évaluer, l'activité étant abrupte. Il conviendra de surveiller l'activité après effondrement pour voir si le phénomène a atteint un point d'équilibre (profil d'équilibre atteint ou poursuite de l'élargissement et/ou de l'approfondissement).

2.4.2. Caractérisation de l'intensité du phénomène

En multipliant l'activité par la taille du phénomène ou groupe de phénomènes, on obtient une évaluation de l'intensité, c'est-à-dire un ordre de grandeur de la quantité de matière soutirée annuellement par le karst.

2.5. Vulnérabilité du bâti, affaissements différentiels et nature des dommages associés

2.5.1. Généralités

La présence de cavités souterraines est la cause essentielle d'apparition des désordres en surface. L'amplitude des phénomènes dépend notamment de la lithologie du soubassement rocheux et de l'épaisseur de la couverture de sol (moraine ou alluvions par exemple) recouvrant la formation. Ils peuvent se manifester sur un bâtiment se situant sur ou à proximité d'une zone d'abaissements de différentes façons selon la spatialisation du phénomène :

- Une fissuration du bâti est le signe d'un abaissement relativement homogène.
- Lorsque des abaissements affectent un bâtiment de manière différenciée selon les endroits, ils engendrent une fissuration plus importante, voire des déformations visibles de sa structure.

Des abaissements lents permettront plus facilement des réparations et un entretien du bâtiment que s'ils sont rapides.

La valeur de la construction et son rendement éventuel seront déterminants dans le choix des mesures de mitigation qui pourront être mises en œuvre. La capacité de la construction à résister ou non aux instabilités entre aussi en ligne de compte.

A noter que les tassements géotechniques issus d'un mauvais compactage des remblais ne sont pas considérés comme aléa naturel.



Figure 8. Bâtiment légèrement fissuré. Présence de doline non avérée, mais géologie favorable à l'apparition d'un phénomène d'effondrement par dissolution du gypse (Panex, UDN 2012).



Figure 9. Bâtiment fissuré avec tassement différentiel à cause de la présence d'une doline sous-jacente (Huemoz, UDN 2015).



Figure 10. Bâtiment fissuré par un abaissement de terrain (Bâle-Campagne) et effondrement sous un trottoir (Jura neuchâtelois).

Vulnérabilité des bétons associée aux roches sulfatées

Dans certaines roches qui contiennent des sulfates (ion SO_4^{--}), telles que le gypse, l'anhydrite ou les cornieules, ce composant chimique peut entrer en réaction avec le ciment et réduire la qualité et la durée de vie des bétons. Il convient dans ces cas d'utiliser des ciments spéciaux résistants aux sulfates. L'analyse du besoin se fera au cas par cas avec des spécialistes.

2.5.2. Détermination de la vulnérabilité du bâti

La vulnérabilité d'un bâtiment existant peut être déterminée en fonction des critères et sous-critères suivants (:

- Le type de ses fondations (radier général, filantes/ponctuelles, autre) ;
- Le type de sa superstructure (bois, béton armé, maçonnerie, mixte) ;
- Son état (fissuration existante marquée, modérée, insignifiante) ;
- Son affectation (logement, industriel/agricole, autre) ;
- La forme de son périmètre en situation (régulière/symétrique, présence d'annexes secondaires, régulière/asymétrique) ;
- Son standing de construction (bas, standard, élevé).

Cette vulnérabilité est évaluée en attribuant des points à chacun des sous-critères précités et en appliquant une pondération aux différents critères selon la méthode suivante qui permet de classer les bâtiments selon une échelle de vulnérabilité allant de très peu sensible (classe V1) à très sensible (classe V5).

Détermination de la classe de vulnérabilité d'un bâtiment					
Critères	Pondération des critères	Sous-critères	Nb de points attribuables aux différents sous-critères	Nombre de points attribués au bâtiment considéré pour chaque critère	Total de points pondéré par critère pour le bâtiment considéré
Type de fondation	2	Radier général sur fondations profondes	1		0
		Radier général	2		
		Semelles filantes / ponctuelles	3		
		Autre (ancien / maçonnerie)	4		
Type de superstructure	2	Bois	1		0
		Béton armé	2		
		Maçonnerie	3		
		Mixte	4		
Etat (fissuration actuelle)	2	Médiocre (fissuration marquée)	1		0
		Moyen (fissuration modérée)	2		
		Bon (fissuration insignifiante)	3		
Affectation	1	Agricole/Industriel	1		0
		Logement	3		
		Autre			
Forme du périmètre du bâtiment en situation	2	Régulière / symétrique	1		0
		Avec des annexes secondaires	2		
		Irrégulière / asymétrique	3		
Standing de construction	1	Bas	1		0
		Standard	2		
		Elevé	3		
				Total pondéré	0
		Classes de vulnérabilité	V1	10 à 14 points	
			V2	15 à 19 points	
			V3	20 à 24 points	
			V4	25 à 29 points	
			V5	30 à 34 points	
		Classe de vulnérabilité du bâtiment considéré			

Figure 11. Détermination de la classe de vulnérabilité d'un bâtiment.

2.5.3. Affaissement différentiels et nature des dommages associés

Le bâti est particulièrement sensible aux affaissements différentiels. Un bâtiment de grandes dimensions situé en bordure d'une zone d'affaissement subira ainsi des dommages plus conséquents qu'un bâtiment de faible extension situé au centre d'une zone affaissée.

Les affaissements différentiels affectant un bâtiment sont obtenus en faisant la différence des affaissements absolus affectant les extrémités du bâtiment et en divisant cette différence par la longueur du bâtiment selon l'axe considéré. Généralement, ces affaissements différentiels s'expriment en % ou en fraction (exemple 0.2% ou 1/500).

La nature des dommages susceptibles d'affecter un bâtiment donné est donc principalement fonction de sa vulnérabilité et des affaissements différentiels qui l'affectent. La matrice de risque donnée ci-après permet d'apprécier quels sont les dommages prévisibles sur un bâtiment d'une vulnérabilité donnée (V1 à V5) affecté par des affaissements différentiels d'ampleur variable.

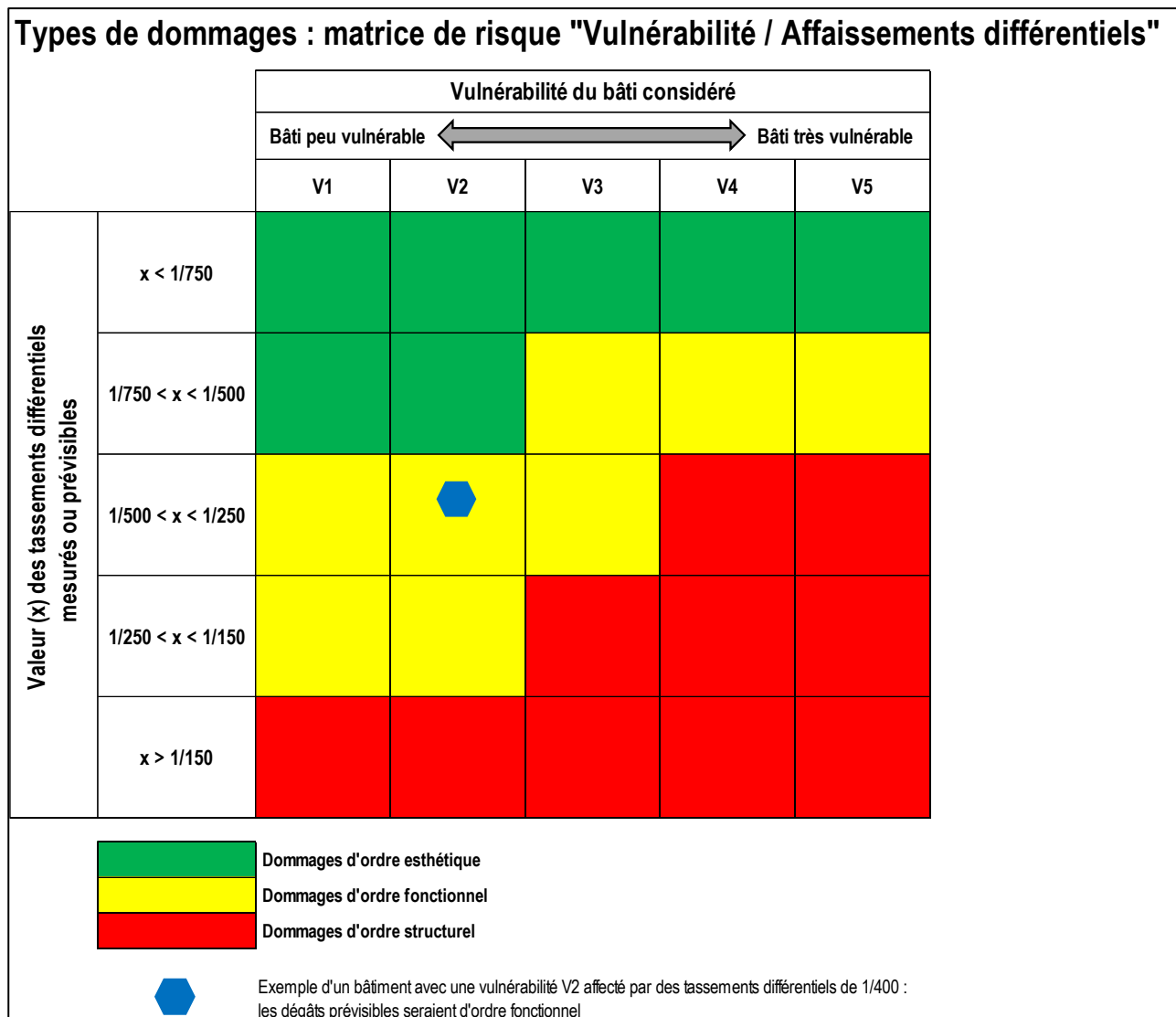


Figure 12. Matrice de risques entre l'intensité des abaissments différentiels et la vulnérabilité d'un bâtiment.

En fonction de leur nature, les dommages aux bâtiments peuvent être classés selon les trois catégories suivantes :

- Dommages esthétiques sans conséquence sur l'usage ou la sécurité du bâti mais nécessitant des travaux de réparation légers (traitement des fissures et peintures) ;
- Dommages fonctionnels plus ou moins importants affectant l'usage du bâti (fissures nombreuses et de largeur pluri-millimétrique), portes/fenêtres bloquées, système d'étanchéité défaillants, interruption des services) nécessitant des travaux de réparation conséquents ;
- Dommages structurels affectant la stabilité du bâti pouvant nécessiter une évacuation et des travaux de réparation lourds ou une reconstruction partielle ou totale du bâtiment (portes/fenêtres tordues ou cassées, murs très fortement fissurés (fissures nombreuses et d'une largeur supérieure à 10-15 mm), murs bombés et/ou inclinés pouvant nécessiter un étaillage, planchers inclinés, services rompus).

3. Méthodes d'investigations

De manière générale, quatre méthodes d'investigation peuvent être entreprises :

1. Analyse des documents existants
2. Observations sur le terrain
3. Géophysique
4. Sondages (par forages ou excavations)

Pour une investigation de base, l'analyse tablera d'abord sur des études de type 1 et 2. Si l'enjeu est important, l'analyse sera plus détaillée, pouvant aller jusqu'à des campagnes complètes de géophysique et/ou de sondages.

Un point important est la prise en compte explicite de chacun des 4 facteurs de dangerosité et de leurs sous-facteurs pour l'évaluation. L'Annexe A du Cahier 2 fournit des informations spécifiques sur les investigations propres à chaque facteur et sous-facteur.

Les sous-chapitres suivants apportent des informations générales sur les quatre méthodes d'investigation précitées.

3.1. Analyse des documents

Il existe souvent des notices de cartes géologiques, des monographies, des travaux de thèse et de diplôme, des rapports d'étude. Certains de ces documents sont identifiables grâce aux archives géologiques suisses. Evidemment si des cadastres d'événements ou de phénomènes ont été établis, il faut les utiliser. Tout indice d'horizon d'inception¹, via par exemple des inventaires spéléologiques, est utile.

Les documents cartographiques suivants apportent aussi des informations utiles : cartes géologiques, géomorphologiques, de sols, modèles numériques de terrain (MNT), photos aériennes, etc. Avec des MNT détaillés, il est possible de rechercher des indices très ténus de dolines à l'aide de petits algorithmes. Informations disponibles en ligne : geocad1.vd.ch, map.geo.admin.ch.

3.2. Observations sur le terrain

Pour le soubassement rocheux, on cherchera les affleurements. Ceux-ci correspondent généralement aux bancs les plus compacts, les roches tendres et/ou solubles étant le plus souvent couvertes de sol. On cartographiera la nature des roches et leur position. On recherchera des indices d'horizons d'inception¹. Il est alors souvent nécessaire d'inspecter la région avoisinante, typiquement des zones d'affleurement (bords de routes, falaises...) qui peuvent donner des indices, même s'ils sont situés à quelques centaines de mètres, voire quelques kilomètres.

Pour le sol, il est généralement efficace de faire quelques sondages avec une tarière pour déterminer l'épaisseur minimum du sol et observer sa nature.

Pour l'eau naturelle, on cherchera les indices d'écoulement et d'infiltration. Idéalement une visite en conditions très humides permet de se faire une meilleure idée à ce sujet.

Pour les aménagements, il faut rechercher toute trace d'activité anthropique, mais c'est souvent aussi dans des documents que l'on peut trouver des informations à ce sujet.

¹ Horizon d'inception : surface géologique, souvent un joint stratigraphique ou une fracture, le long de laquelle la karstification s'est développée de manière préférentielle.

Les observations de terrain sont donc très classiques : cartographie géologique, géomorphologique, du quaternaire, indices de ruissellement, présence de sources, analyses et cartographie des sols à la tarière.

3.3. Géophysique

Les méthodes géophysiques mettent en évidence de manière indirecte des anomalies de certains paramètres physiques qu'il convient d'interpréter dans leur contexte géomorphologique et géologique. Pour des résultats fiables, il est souvent nécessaire de croiser deux méthodes et de les étalonner sur des affleurements ou des sondages.

Le géoradar est une méthode relativement efficace pour évaluer l'épaisseur du sol et certaines de ses caractéristiques, pour autant que celui-ci ne soit pas un trop bon conducteur électrique. La profondeur de pénétration des ondes est alors trop faible.

La tomographie géoélectrique peut être utile et précise, mais elle est relativement fastidieuse. Elle peut être utilisée pour une imagerie dynamique (différents états hydriques du sol).

La cartographie électromagnétique (EM) permet de descendre un peu plus bas dans un sol conducteur que le géoradar. Son application est relativement rapide.

Des profils sismiques ou encore microgravimétriques peuvent être utiles dans certains cas, mais leur application est généralement assez onéreuse.

3.4. Forages et sondages

Il peut s'agir de forages destructifs ou carottés, de sondages par battage (pénétromètre) ou de sondages à la pelle mécanique.

Ils fournissent des informations directes (ou indirectes dans le cas des forages destructifs) et précises sur la couverture et le rocher. Selon l'étendue et l'épaisseur des terrains à investiguer, ainsi que l'envergure du projet, l'une ou l'autre des méthodes sera préférée. Deux méthodes peuvent parfois être conjuguées.

En général, les forages sont plus onéreux et conviennent pour un terrain étendu et/ou une couverture épaisse ou potentiellement épaisse. Les forages carottés sont les plus complets, mais aussi les plus chers. Les sondages par battage sont assez rapides et efficaces, mais fournissent une information plus indirecte. Il est souvent efficace de procéder à des sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage (EPF) et d'étalonner ces mesures sur un forage carotté. Dans les forages destructifs, il est recommandé d'appliquer la mesure de vitesse d'avancement (VA et VA1000²), le couple de rotation (CR) et le Vibralog (VIB) qui donne une indication de la réponse du terrain à la frappe du marteau fond-de-trou.

Les sondages, effectués en général à la pelle rétro, sont limités en profondeur (2 à 3 m), et conviennent donc aux terrains à couverture peu épaisse.

Quelle que soit la méthode de reconnaissance choisie, il faut s'assurer d'une densité suffisante de sondages pour éviter de manquer certaines informations. Le contexte géologique doit être bien analysé au préalable pour positionner ces sondages le plus judicieusement possible.

3.5. Monitoring de niveau du sol

Une mesure précise de niveau du sol permet de voir, après un certain laps de temps (années, décennies...) si celui-ci a bougé ou s'est affaissé. Des mesures précises de surfaces sont possibles actuellement avec des relevés laser depuis un aéronef (voir site cantonal :

² Enregistrement de la vitesse d'avancement instantanée sur une échelle de 0 à 1000 m/h.

www.vd.ch/themes/territoire-et-construction/informations-sur-le-territoire/geodonnees/altimetrie-lidar).

Des mesures sur une petite surface sont aussi possibles avec un drone par lidar ou photogrammétrie. Les variations normales de niveau du sol, dépendant de la température et de la végétation, impliquent généralement de procéder aux mesures pendant l'hiver et sur plusieurs années.

Pour mettre en évidence des affaissements et effondrements, il convient de comparer les cartographies lidar prises à quelques années d'intervalle. La mise en évidence de dolines ou zones de dépressions dans le sol peut se faire de façon semi-automatique par des méthodes de recherche de « creux » topographiques dans les courbes de niveau.

Il est aussi possible d'utiliser les nivellements effectués par les géomètres et services de géodésie. Parfois, d'anciennes cartes topographiques peuvent donner des résultats utiles.

Les méthodes d'interférométrie infrarouge à partir de satellites (DInSAR, SBAS, PSInSAR) sont aussi envisageables. Toutefois, leur résolution spatiale et surtout le nombre de réflecteurs disponibles sont souvent insuffisants pour le levé de dolines.

4. Mitigation

4.1. Mesures préventives ou de remédiation

Les mesures de mitigation sont nombreuses et dépendent de l'évaluation du danger (résultat des investigations) et du type de projet envisagé (construction d'un bâtiment, d'une voie de circulation, d'un pont, de structures légères (p. ex. serre) ou d'un simple aménagement paysager tel qu'un parc).

Dans un premier temps, il faut procéder à une analyse coûts / bénéfices par rapport à la valeur du bien à protéger, respectivement à construire. Les mesures constructives doivent être adaptées et leurs coûts acceptables et proportionnés.

De manière générale, on évitera les infiltrations d'eau : mise en œuvre de raccordements souples et visitables aux interfaces terrain/bâti, suivi régulier du réseau, collecte des eaux météoriques (bâti + terrain) et drainage des eaux souterraines (terrain) avec une évacuation hors de la zone à risque.

Une information ciblée aux propriétaires et habitants d'une région présentant un danger d'effondrement reconnu permet d'éviter certaines erreurs de gestion, p.ex. éviter des arrosages excessifs, éviter les infiltrations à proximité de bâtiments ou dans des dolines, vigilance aux fuites dans les canalisations, etc. Un remblayage de doline non répertorié et non pratiqué dans les règles de l'art est aussi fortement déconseillé.

En concertation avec des ingénieurs civils, nous proposons un catalogue de mesures constructives sous forme de deux tableaux (**Annexe D** du Cahier 2), dépliant en fin de rapport). Il donne une vision d'ensemble et permet de choisir les mesures de renforcement les mieux adaptées aux différentes situations. L'Annexe C (du Cahier 2) donne un descriptif de ce tableau et une clé de lecture.

A titre d'exemple, pour le cas simple de remblayage d'une doline (simple aménagement paysager), la Figure 13 présente le schéma de la mesure de remédiation la plus classique. Le principe est de dégager la couverture meuble jusqu'à atteindre le rocher, puis de remblayer avec une gradation de blocs de gros diamètre en bas et de plus en plus fins vers le haut. Ce système permet d'éviter que les éléments plus fins ne partent dans les fissures du karst. Les gros blocs au fond, posés sur le rocher, assurent une stabilité après comblement. Selon les cas, des dalles ou géotextiles peuvent être mis en place dans les parties basse et haute du comblement. Il est important d'éviter l'étanchéification de la doline. L'eau trouverait en effet un autre chemin et pourrait créer de nouvelles cavités par érosion de la couverture. On devrait plutôt essayer d'approcher une perméabilité identique à celle des terrains environnants.

Quelques autres exemples sont présentés en 0. Ils illustrent quelques-unes des méthodes constructives liées à des mesures préventives ou de remédiation (comblement, radiers, pieux, injections...). La plupart sont tirées et adaptées d'un rapport de la Faculté polytechnique de Mons (2004).

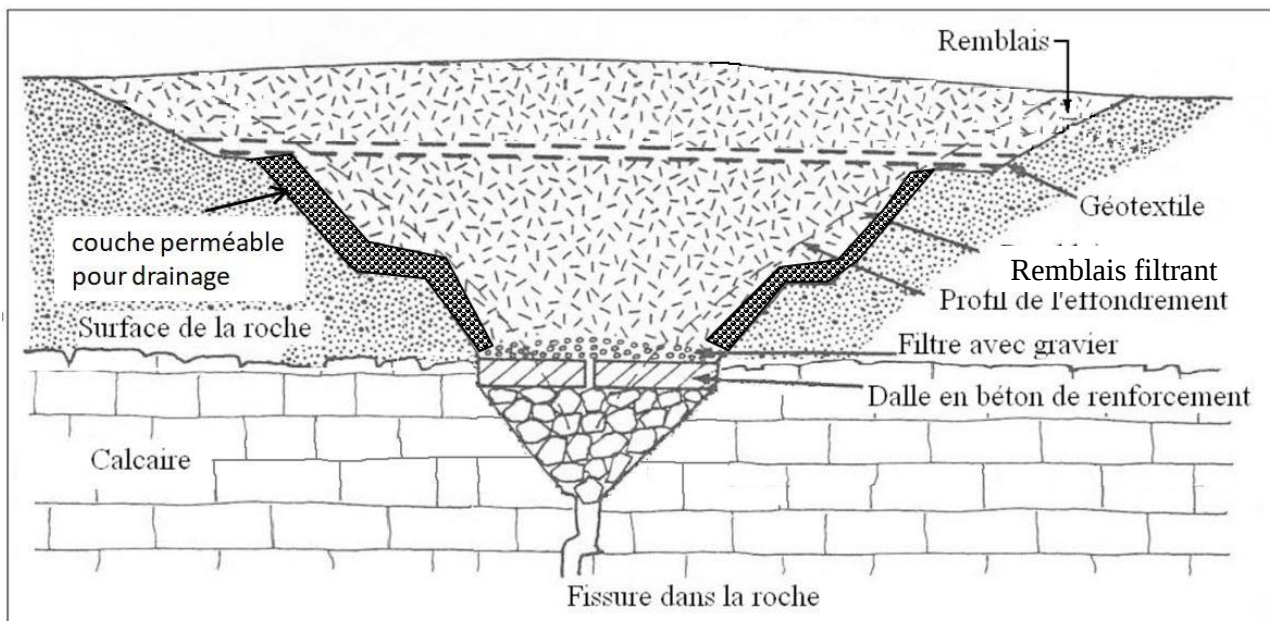


Figure 13. Comblement classique de doline, selon Faculté polytechnique de Mons, modifié.

4.2. Evaluation de l'évènement

Il est difficile de parler « d'évènement » pour les cas d'abaissement en raison de leur caractère généralement progressif et lent. Toutefois, dans les cas rapides (semaines ou mois) et/ou lorsque des dégâts sont constatés sur des constructions, il est légitime de parler d'évènements d'abaissement.

Lorsqu'un évènement « effondrement en terrain karstique » s'est produit et a été porté à la connaissance des spécialistes, la première mesure à prendre par les autorités et/ou propriétaires est la sécurisation des lieux et leur évacuation.

Ensuite, une inspection du site permettra notamment (en appliquant les principes décrits au chapitre 3 / Cahier 2) d'évaluer si l'évènement est dû à une doline effondrée, ou à la présence d'une cavité artificielle. Si c'est le cas il correspond aux critères émis dans le présent rapport. Si l'évènement est dû à d'autres facteurs, p.ex. un phénomène de glissement, il conviendra d'appliquer une approche correspondante.

Nous préconisons lors de cette inspection une documentation précise du phénomène où l'évènement est survenu (topographie, photos, descriptif, géologie, traces de circulation d'eau, stabilité du site lors de l'inspection).

Il s'agit de comprendre le mécanisme et le déroulement du processus qui a eu lieu pour le gérer et tenter de protéger ce qui peut encore l'être de la construction touchée et des alentours. Le déclencheur de cet évènement devra aussi être évalué pour tenter de le mitiger. La probabilité d'effondrement devra être évaluée et, le cas échéant, on procédera à une nouvelle évaluation de la zone environnante.

Les déclencheurs les plus fréquents d'évènements sont les fuites dans les canalisations, les infiltrations d'eau claires et les évènements météorologiques extrêmes. Il s'agit donc souvent en premier lieu d'arrêter les fuites et/ou de collecter et d'évacuer les eaux de surface pour arrêter d'entretenir le phénomène.

La Figure 14 donne un aperçu de la procédure d'évaluation d'un site en cas d'événement, en vue de prendre des mesures de mitigation.

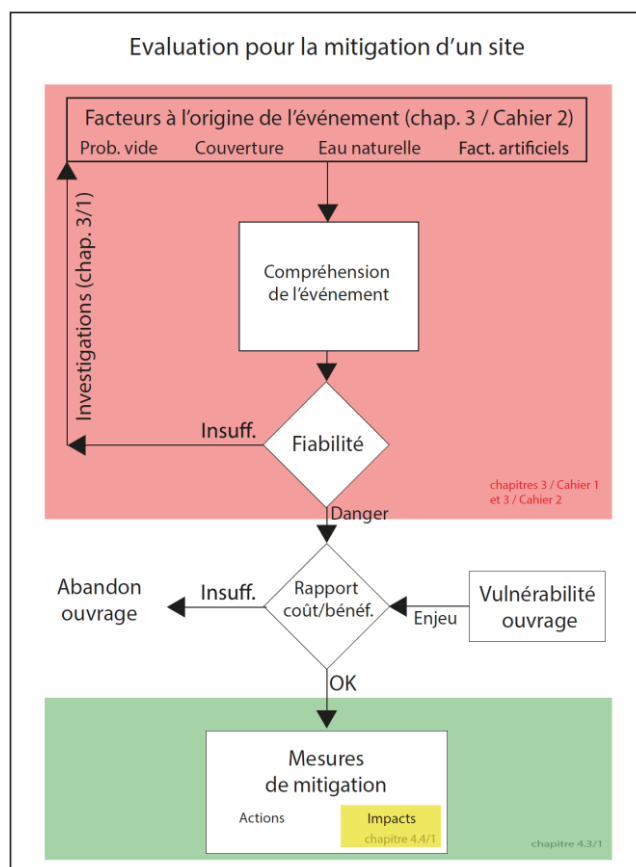


Figure 14. Aperçu de la procédure d'évaluation d'un site en cas d'événement, en vue de prendre des mesures de mitigation. L'évaluation est globalement analogue à celle de l'évaluation préventive, mais c'est davantage la compréhension de l'événement que la probabilité d'occurrence qui est visée par les investigations.

4.3. Mesures de remédiation en cas d'évènement

La remédiation (ou réparation) a pour but de revenir à un état antérieur stable après la survenue d'un aléa et la réparation des dégâts.

Les tableaux de l'Annexe D du Cahier 2 permettent d'évaluer la méthode de remédiation la mieux adaptée et son adéquation au site et au bien considéré. L'Annexe C (Cahier 2) donne un descriptif et une clé de lecture du tableau.

Comme pour la prévention, la remédiation va beaucoup dépendre du bien à protéger, du danger encouru par les personnes, des risques de pollution, etc... En d'autres termes, le rapport coûts/bénéfices de la mesure par rapport à la valeur d'un bien jouera un grand rôle dans la décision d'entreprendre ou non des mesures de remédiation. En dernier ressort l'abandon et la destruction du bien devront parfois être envisagés.

L'aménagement d'un moyen d'accès au phénomène (p. ex. chambre de visite) doit être analysé au cas par cas en fonction des dimensions de l'aléa et des biens à protéger.

4.4. Impacts des mesures constructives

4.4.1. Impacts liés aux mesures et liés aux objets construits

Les impacts les plus fréquents induits par les mesures constructives (prévention et remédiation) sont d'une part la pollution (sous-sol, eaux souterraines, sources, biodiversité, ...), d'autre part des mouvements de terrains provoqués aux alentours du lieu d'intervention.

	Mesures de remédiations			
Type d'impact	Comblement	Radier, pieux, etc.	Injection	Drainage
Pollution des eaux souterraines et des sources				
Impact sur les constructions avoisinantes et sur les infrastructures avoisinantes				

Tableau 1. Impacts liés aux mesures de remédiation.

Risque d'impact : **Oui** / **Non** / **A voir au cas par cas.**

Dans certains cas, les constructions envisagées ou existantes, érigées au-dessus ou à proximité immédiate d'un phénomène de type doline, peuvent, de par leur seule présence, avoir un impact indépendamment des mesures constructives spécifiques à garantir leur stabilité, principalement sur les eaux souterraines. Par exemple, les dolines étant des points préférentiels d'infiltration, toute construction à proximité immédiate est une source potentielle de pollution des eaux souterraines.

4.4.2. Eaux souterraines

Autant du point de vue de la prévention (avant construction) que de la remédiation (aléa sur une structure déjà existante), il convient de veiller à ce que les travaux de consolidation ou de réparation n'altèrent pas les eaux, qui plus est dans une zone de protection de source ou une aire d'alimentation.

L'aspect le plus important et potentiellement problématique est l'utilisation de ciment ou de béton dans les différentes mesures constructives ou de remédiation. Les produits liés aux ciments (adjuvants) ou pouvant le remplacer (mousses expansives ou matériaux de bourrage) sont aussi concernés. L'usage de produits d'injection à base de silicates (gel) est également problématique. En cas d'usage de produits de type mousse ou résine polyuréthannes à deux composants, il faut privilégier un mélange en tête des cannes d'injection de manière à maîtriser le dosage des deux composants.

Le Tableau 2 présente de manière synthétique les principaux impacts potentiels sur les eaux souterraines.

Type de construction	Type de mesure de remédiation			
	Comblement	Radier, pieux, poutrelles	Injection	Drainage (avec ou sans comblement)
Parc, jardin sans produits phytosanitaires		-	-	
Jardin, terrain de sport, avec utilisation de produits phytosanitaires		-	-	
Hangar, entrepôt				
Bâtiments		(phase de construction)	(phase de construction de ou redressement d'un bâtiment)	
Usine, route, voie de chemin de fer, etc.		(radier étanche)	(phase de construction)	
Réseau d'eau, gaz, électricité (tranchées)	(phase de construction)	(phase de construction)	(phase de construction)	(phase de construction)
Pont, pile de pont	-	(phase de construction)	(phase de construction)	-
Eolienne, pylône, antenne	-	(phase de construction)	(phase de construction)	-

Tableau 2. *Aperçu des impacts potentiels sur les eaux souterraines d'ouvrages construits à proximité des phénomènes (dolines).*

Risque d'impact sur les eaux souterraines : **Oui** / **Non** / **A voir au cas par cas.** - : cas non réaliste.

Le ruissellement de l'eau sur le ciment puis son infiltration dans le sous-sol est potentiellement polluant pour les eaux souterraines, par rapport à une structure bétonnée confinée et non drainée. Les injections de coulis de ciment ou autres produits sont aussi potentiellement polluants, car parfois non contrôlables dans le sous-sol. L'augmentation du pH, du Cr VI et des métaux lourds (cendres volantes) peuvent être problématiques dans certains cas.

Des mesures permettent toutefois de limiter les risques à un niveau acceptable : ciments ou bétons de qualité ménageant les eaux, limitation, voir arrêt d'injections de ciment en cas d'inefficacité, chaussettes et cavibags, injections dans un ordre donné en commençant par des mortiers ou coulis épais...

Toute modification des conditions de circulation des eaux souterraines (augmentation du débit et/ou modification des cheminements) est également une source d'impact sur le bâti riverain, surtout en présence d'un soubassement rocheux constitué d'anhydrite et/ou de gypse.

4.4.3. Constructions avoisinantes et infrastructures

Tout projet contenant un volet de prévention ou de remédiation proche d'une construction devra en tenir compte et prendre des mesures adaptées et adéquates en accord avec l'exploitant de l'infrastructure. Ne pas oublier que certaines infrastructures ne sont pas toujours visibles : canalisations, gazoducs, oléoducs, câbles et lignes électriques... Il est recommandé de bien se renseigner sur le cadastre souterrain.

Toutes les techniques de renforcement des terrains meubles par injection (étanchement, consolidation, compactage) ou par remplacement d'une fraction du sol traité (jetting) doivent être asservies à des dispositifs de contrôle de nivellement du sol en temps réel. Le risque de déformation brutale est ainsi fortement réduit. Attention aux cas particuliers tels qu'un claquage lors d'injections

de sols (vides granulaires) ou de rocher (fissuration) en raison d'une erreur (non maîtrise de la pression et/ou du débit d'injection) ou lors de la réalisation de colonnes jettées subhorizontales à proximité de la surface topographique (quelques mètres) en raison de pertes de coulis.

En cas de réalisation de fouille à proximité d'un bâti existant, il faudra tenir compte des caractéristiques du sol de fondation et de la profondeur de la fouille pour que le soutènement des parois de la fouille soit en mesure de reprendre la poussée des terres.

5. Données de base et documents

5.1. Cartes de danger d'effondrement

Plusieurs outils sont disponibles sous forme de cartes pour préciser l'acuité de l'aléa effondrement sur un site ou une région.

Il y a d'abord la carte indicative de danger – Effondrements, disponible sur le guichet cartographique de l'UDN : www.cdn.vd.ch/map.htm, qui indique les zones potentiellement exposées au danger d'effondrement (voir Figure 15).

Sur le guichet cartographique cantonal (www.geo.vd.ch/themes.htm), l'on trouve sous le thème dangers naturels la carte des dangers naturels d'effondrement dans les zones liées à l'activité humaine (voir Figure 17).

5.2. Carte indicative du danger d'effondrement

Les cartes indicatives identifient les processus dangereux et localisent les zones potentiellement exposées à l'échelle régionale, sans toutefois préciser les intensités et la dangerosité des phénomènes. Elles sont le résultat de modélisations informatiques appliquées à l'ensemble d'une région et n'ont pas été, sauf exceptions, vérifiées sur le terrain. De ce fait, elles peuvent présenter des imprécisions et ne décrivent pas précisément la menace. De façon simplifiée, on estime qu'elles indiquent l'extension maximale d'un aléa de fréquence très rare.

La carte indicative des effondrements désigne les territoires potentiellement exposés aux phénomènes d'affaissement et d'effondrement, essentiellement dans les régions du Jura et des Préalpes. Elle a été établie à partir d'une analyse de sensibilité permettant de calculer semi-automatiquement la susceptibilité aux processus de dissolution des formations rocheuses affleurant sur le territoire. Les trois critères utilisés sont :

- i. Géologie régionale : sensibilité à la karstification des lithologies présentes sur le territoire (roches calcaires, roches salifères, gypse, cornieules).
- ii. Tectonique régionale : distance aux axes des grandes structures relevées sur les cartes géologiques nationales (failles et plis).
- iii. Géomorphologie : détection et localisation des phénomènes avérés de dissolution d'origine karstique (dolines, ouvalas, gouffres, grottes, bassins fermés) à partir du MNT, de l'inventaire des dolines et des cartes géologiques.

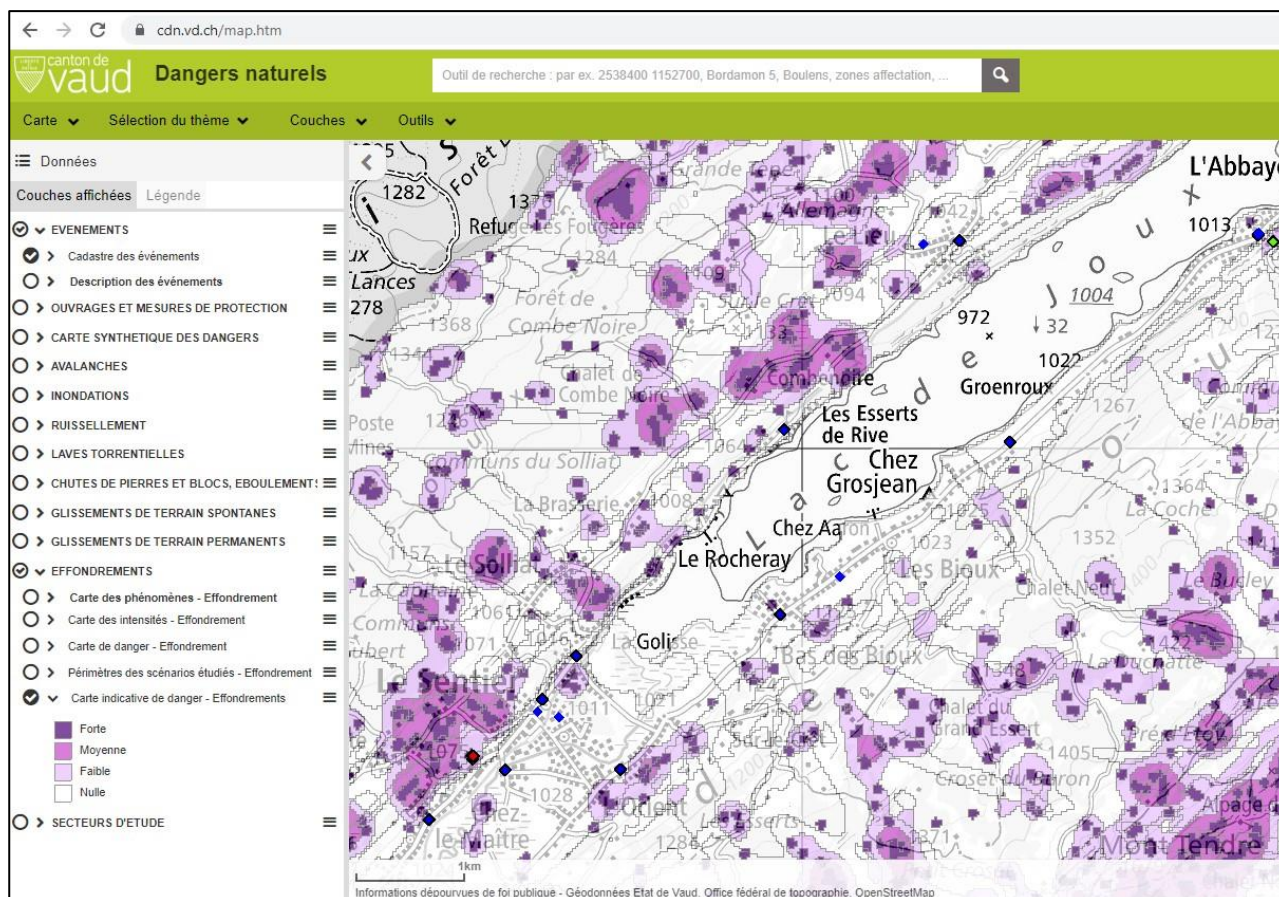


Figure 15. Extrait de la carte indicative de danger - Effondrement (Vallée de Joux).

5.3. Carte des dangers naturels d'effondrement

Les cartes de dangers naturels sont établies pour l'ensemble des zones à bâtir, les routes cantonales principales, les routes communales exposées, les voies ferrées et certains secteurs hors zone à bâtir présentant des enjeux ou un intérêt particulier. Elles qualifient le niveau de danger des territoires exposés avec des couleurs selon une échelle à cinq degrés : élevé (rouge), moyen (bleu), faible (jaune), imprévisible (hachuré jaune) et nul ou négligeable "en l'état actuel des connaissances" (blanc) ; voir la matrice des cartes de dangers naturels en page suivante.

Les cartes de dangers sont construites en superposant les cartes d'intensité établies pour quatre scénarios de fréquence différents (temps de retour T30, T100, T300, T exceptionnel), en conservant la classe de danger la plus défavorable (1 à 10). Cependant, les phénomènes d'effondrement étant des processus permanents, plus ou moins continus, la notion de temps de retour est peu pertinente et les différents scénarios fréquentiels sont très difficiles à établir.

Dès lors, les degrés de dangers sont attribués sur des considérations géomorphologiques. Par défaut, le degré de danger considéré est "moyen" dans les zones avec doline isolée, alignement de dolines et ouvalas (coalescence de plusieurs dolines). Il devient élevé en présence d'indice d'activité élevée ou d'accélération des processus. Quand c'est possible, des critères plus précis sont appliqués.

Degré DN	Danger selon matrice OFEV		EFF1 (CH)	Situation type	Couverture
	Degré	Danger	Classe		
	Rouge	Elevé	8	Phénomènes avérés Dolines actives Massif ruiniforme Zone subsidente Fonti	- absente ou faiblement épaisse
	Bleu	Moyen,	5	Zones potentielles d'affaissement Dolines peu ou pas actives Alignement dépressions karstiques	- capacité de charge insuffisante
	Jaune	Faible	2	2c Roches solubles Galeries d'exploitation minière Tracé tunnel	- épaisse - capacité de charge suffisante
	Hachuré jaune blanc	Résiduel (ou « imprévisible »)	10		

Figure 16. Légende des cartes de danger d'effondrement et d'affaissement selon matrice OFEV.

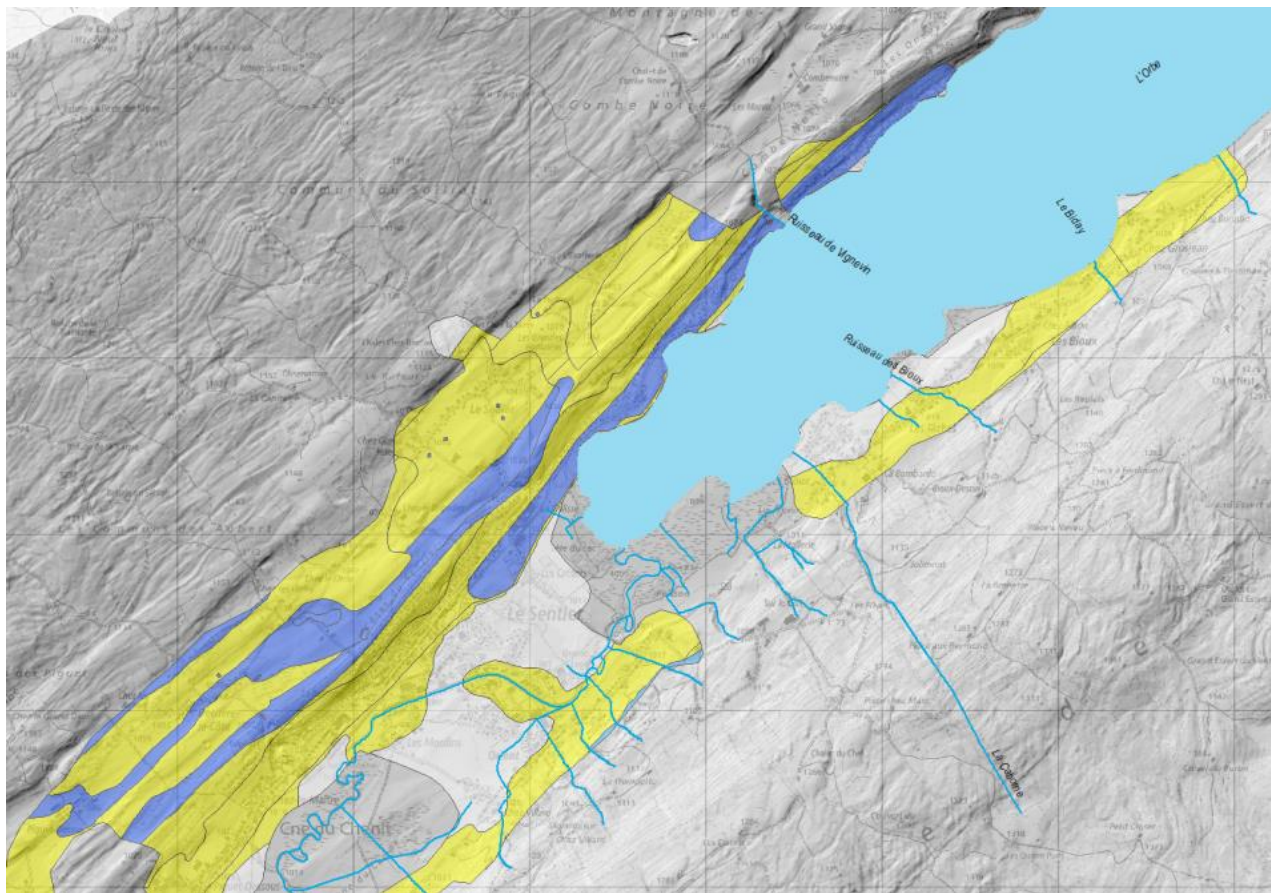


Figure 17. Extrait de la carte de dangers naturels de l'aléa Effondrement (Vallée de Joux).

5.4. Analyse de site selon l'EPFL

Le laboratoire GEOLEP de l'EPFL a élaboré en 2003, à la demande de l'établissement cantonal d'assurance du canton de Vaud (ECA), un document sur la problématique des dolines. Plusieurs éléments de l'étude de 2003 sont repris dans le présent rapport. Les différences principales sont les suivantes : le rapport GEOLEP ciblait avant tout les bâtiments, il avait une composante plus générale (incluait l'identification de zones de dangers), il était moins concret sur certains aspects de l'évaluation, et insistait moins sur le rôle déterminant de la couverture meuble. Il en résulte une méthode d'évaluation un peu différente avec l'approche présentée dans le présent rapport.

6. Conclusion

Les généralités sur l'aléa « **effondrement de dolines** » présentées dans ce **cahier 1** apportent au lecteur les connaissances de base nécessaires à appréhender cet aléa. Les éléments de base décrits au chapitre 2.1 décrivent les phénomènes et définissent la nomenclature spécifique à la fois au karst et aux problèmes d'instabilités de terrain. Le chapitre 2.2 précise la vitesse des processus, qui varie notablement si le site concerné se trouve en région calcaire, gypseuse ou même dans le sel. Dans les calcaires, la dissolution est relativement lente et les effondrements sont généralement liés à la rupture d'une couverture peu consolidée sur une cavité préexistante. Dans le gypse ou le sel, la dissolution est rapide et des vides métriques peuvent se former en quelques années ou décennies. Dans les deux cas, l'eau joue un rôle essentiel. Les formes de dolines résultant de ces processus sont décrites au chapitre 2.3. Il est aussi important de pouvoir reconnaître les dolines les plus actives, ce qui est décrit au chapitre 2.4. Le chapitre 2.5 donne un aperçu de la vulnérabilité du bâti et de la manière de l'évaluer.

Le chapitre 3 donne un aperçu des méthodes d'investigation utilisables pour évaluer le danger d'instabilité karstique d'un site spécifique. La manière d'appliquer ces méthodes est décrite plus en détail dans le cahier 2.

Le chapitre 4 présente les grandes lignes des stratégies possibles de mitigation du danger, qu'il s'agisse d'actions préventives ou de remédiation. Dans les deux cas, le choix stratégique résultera d'un compromis entre l'évaluation du danger lié au site, la valeur de l'ouvrage, sa vulnérabilité et les coûts des mesures de mitigation. Il est par conséquent impossible de donner des recommandations applicables à toutes les situations imaginables. Dans ce cahier, nous décrivons les principes généraux, qui sont détaillés de manière plus concrète, incluant des exemples, dans le cahier 2. Les mesures de mitigation pouvant avoir des impacts, en particulier sur les eaux souterraines et les constructions avoisinantes, le chapitre 4.4 esquisse les éléments à prendre en considération pour limiter les problèmes de ce type.

Le chapitre 5 donne un bref aperçu des documents existants dans le canton de Vaud, et qui permettent une première orientation pour l'évaluation d'un site.

Le cahier 1 doit donc donner au lecteur l'ensemble des notions de base préalablement nécessaires, pour un ouvrage existant ou futur, à l'évaluation du danger, du risque et des mesures de mitigation liés à l'aléa effondrement. Le cahier 2 devrait le guider de façon plus pratique pour son évaluation.

Le cahier 1 intéressera non-seulement les géologues qui seraient appelés à faire ces évaluations, mais toutes les personnes concernées par cette problématique, en premier lieu les propriétaires, mais aussi les administrations qui doivent pouvoir comprendre les problématiques potentiellement liées à ce genre d'aléa.

7. Bibliographie

- BRGM et CEREMA (2020) : ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AU KARST : CONTEXTES, METHODE ET CAS TYPE TRAITES EN VUE D'UN GUIDE NATIONAL. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Lyon 2020. 8 p.
- Champod E (2011) Carte Indicative du Danger d'Effondrement (CID-EFF) - Méthodologie développée pour le Jura et le Chablais Vaudois, unpubl. rep. Canton de Vaud, Département de la sécurité et de l'environnement, Cellule de projet CDN-VD, 1014 Lausanne, Suisse.
- Filipponi M, Schmassmann S, Jeannin PY, Parriaux A (2012) Karstalea: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA.
- ISSKA (2016) Carte indicative du karst - Jura vaudois. Rapport d'étude. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - rapport non publié – mandant : Direction générale de l'environnement (DGE), Division Géologie, Sols et Déchets (GEODE), Dangers Naturels. 21 p.
- ISSKA (2017) Carte indicative du karst - Préalpes vaudoises. Rapport d'étude. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - rapport non publié – mandant : Direction générale de l'environnement (DGE), Division Géologie, Sols et Déchets (GEODE), Dangers Naturels. 29 p + Annexes.
- ISSKA, CSD Ingénieurs (2012) Méthodologie pour la digitalisation manuelle de dolines sur le territoire du Jura vaudois. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - rapport non publié – mandant : Canton de Vaud ; Cellule Dangers naturels. 10 p.
- Kopp L, Chantry R, Vouillamoz J, Jeannin PY (2012) Etat de Vaud - Dangers naturels gravitaires - Méthodologie pour l'établissement de la carte de danger d'effondrement par dissolution (CD-EFF). Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - rapport non publié. 20 p.
- Parriaux A, Turberg P, Barras A (2003) Expertise géologique des phénomènes d'effondrement et de subsidence karstiques dans le cadre de permis de construire, GEOLEP. 50 p.
- Vouillamoz J, Rickerl D (2012) Description de la base de données des risques d'effondrement lié au karst dans le Jura vaudois, unpubl. rep. ISSKA.
- Wenger R, Blant D, Blant M, Jeannin PY (2017) Les Dolines. Processus de formation, fonctions et conservation, conseils pratiques. ISSKA, La Chaux-de-Fonds. 12 p.

Internet

Formulaire 43-EFF (Site internet DGE-VD) : https://www.eca-vaud.ch/images/prevention/pdf/Dangers_naturels/Effondrements/formulaire_43_EFF.pdf.

La Chaux-de-Fonds, le 15.6.2023



Pierre-Yves Jeannin
Hydrogéologue, Dr.



Denis Blant
Hydrogéologue, Msc

Liste des annexes

Annexe A. Tableau indicatif des principales lithologies rencontrées en Suisse

Annexe B. Types d'aménagements adéquats sur des dolines, dispositions préventives et/ou mesures de remédiation

Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 1 Généralités sur l'aléa

Annexes



La Chaux-de-Fonds, le 15.6.2023

Titre :	Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud, Aléa « effondrement de dolines » - Cahier 1, Généralités sur l'aléa. Rapport et annexes.
Auteurs :	Pierre-Yves Jeannin, Denis Blant (collaboration H. Détraz et B. Deléard, bureau BG-Ingénieurs-Conseils SA)
1 ^{ère} de couverture :	Effondrement de type affaissement. Exemple d'un cas situé dans le canton de Neuchâtel (photo Rémy Wenger).
Mandant :	DGE – Direction des ressources et du patrimoine naturels, Unité des dangers naturels, Av. de Valmont 30b, 1014 Lausanne
Mots clés :	dolines, effondrement, affaissement, gypse, calcaire, dissolution, Jura vaudois, Préalpes, Vaud, Suisse

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

ISSKA (2023) – Gestion des instabilités karstiques du canton de Vaud, Aléa « effondrement de dolines » - Cahier 1, Généralités sur l'aléa. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié – Mandant : DGE – Direction des ressources et du patrimoine naturels, Unité des dangers naturels, 26 p.

Liste des annexes

- Annexe A. Tableau indicatif des principales lithologies rencontrées en Suisse
- Annexe B. Types d'aménagements adéquats sur des dolines, dispositions préventives et/ou mesures de remédiation

Classification des principales lithologies potentiellement karstifiables de Suisse en catégories

Tableau indicatif des principales lithologies potentiellement karstifiables rencontrées en Suisse et des caractéristiques de la karstification qui s'y développe (d'après *Filipponi et al. 2012*, modifié).

Lithologie (formation)	Capacité de karstification ^{a)}	Solubilité ^{a)}	Joint stratigraphiques initiaux ^{b)}	Joint tectoniques initiaux ^{b)}	Domaines spéléogénétiques ^{c)}	Caractéristiques de la karstification
Calcaire	3	2	3	2	3	Formes classiques, systèmes karstiques largement développés, souvent multiphasiques (voir chapitre 3.2)
Dolomie	2	2	2	3	2	Karstification plus lente et à plus petite échelle que dans le calcaire ; dans les petits gisements, la karstification dépend de la capacité de karstification de la roche environnante
Marne	1	1	3	1	1	Karstification surtout dans les bancs calcaires, rarement continue dans les formations marneuses épaisses
Schiste calcaire	2	1	2	3	2	Capacité de karstification très variable, dépendant, entre autres, de la teneur en calcite ; avec une forte teneur en calcite, karstification semblable à celle du calcaire ; formes de surface peu prononcées
Marbre	3	2	0	3	3	Pour les dépôts massifs, karstification classique ; pour les bancs de marbre de faible épaisseur dans des formations difficilement solubles (par exemple le gneiss), système 2D
Brèches et conglomérats calcaires (y compris Jura-Nagelfluh)	1	2	0	2	1	La stabilité et la karstification dépendent de la proportion de la matrice et du degré de cimentation (silicate ou calcique) des composants, dans certains cas la karstification est largement empêchée (exception : grottes importantes connues dans la Nagelfluh du Jura / "gompholithes")
Craie	2	2	1	2	1	En raison de la grande porosité et de l'homogénéité de la masse rocheuse, les cavités sont plutôt rares ; l'érosion joue un rôle important ; aucun dépôt important en Suisse
Grès (à matrice calcaire)	2	1	3	3	1	En fonction de la teneur en calcite karstification semblable au calcaire
Cornieule (Rauhewacke)	2	2	2	2	1	Sélectivement forte karstification, instabilités
Gypse et anhydrite	3	3	1	3	2	L'anhydrite se karstifie à peine (autrement transformée en gypse) ; le gypse développe rapidement une karstification dans la zone proche de la surface ; structures de karstification fortement dépendantes des couches intermédiaires
Sel	3	3	2	1	1	Peu d'affleurements, développement très rapide de la karstification, donc sensible aux changements des conditions hydrologiques ; pas de dépôts importants en Suisse

a) 0 = très faible ; 1 = faible ; 2 = moyen ; 3 = élevé

b) 0 = très petit ; 1 = petit ; 2 = moyen ; 3 = degré élevé de développement du système de tubes karstiques sur les joints stratigraphiques ou tectoniques initiaux

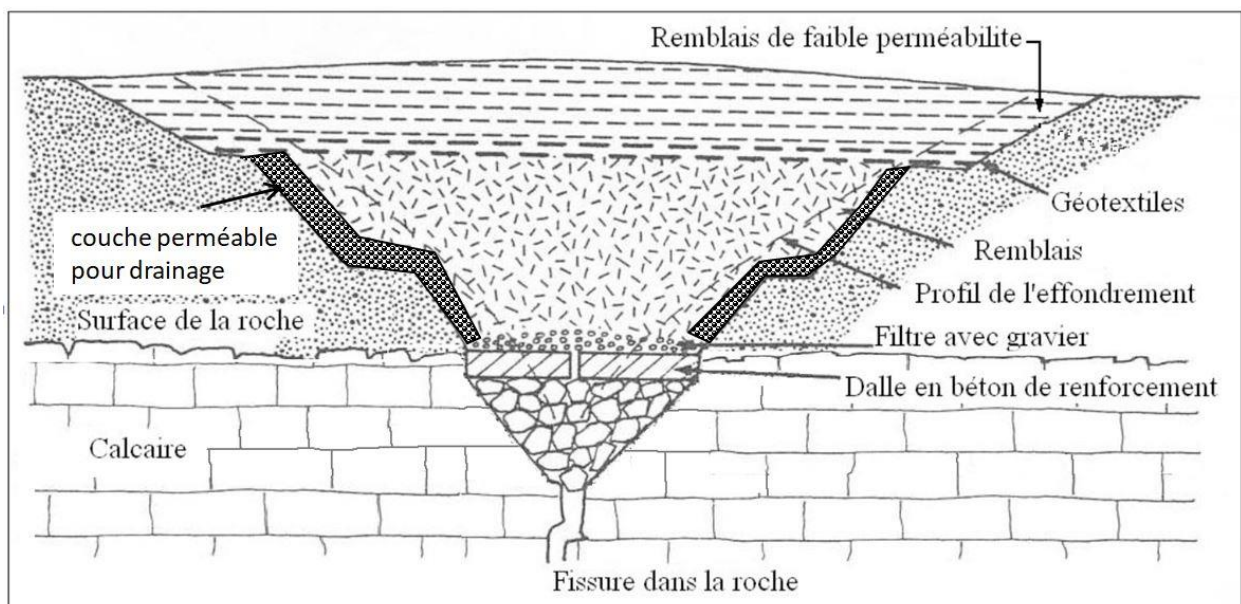
c) 0 = très petit ; 1 = petit ; 2 = moyen ; 3 = haut degré de développement des domaines spéléogénétiques (formes classiques, densité des tubes karstiques, etc.)

Types d'aménagements adéquats sur des dolines : dispositions préventives et/ou mesures de remédiation

Les quelques exemples ci-dessous sont tirés ou adaptés de la littérature. Chaque cas d'aménagement devra toutefois faire l'objet d'une étude particulière, voire de l'analyse d'un bureau d'ingénieurs ou autres experts.

Cas du comblement d'une doline

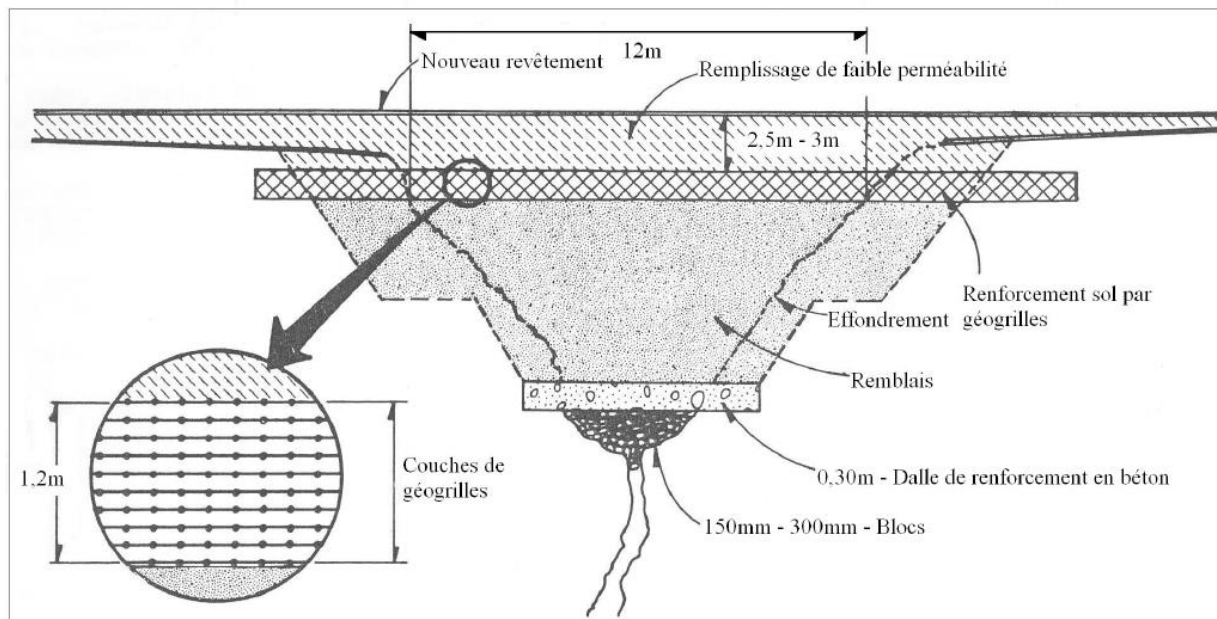
Le schéma est pratiquement toujours le même suivant les auteurs, avec un filtre inversé gros blocs en bas et éléments plus fins en haut. :



Comblement classique de doline, Modifié, d'après Faculté polytechnique de Mons 2004, Figure 71 : comblement d'un effondrement par une dalle en béton de renforcement (édition Blackie).

Doline à remblayer sous une route (selon Faculté Polytechnique de Mons)

Les géogrilles sont souvent utilisées lors de la construction de routes en terrains karstiques ou pour des cas de remédiation lors d'effondrements (figure 75). Les géogrilles réduisent les contraintes et tensions dans le revêtement permettant ainsi de minimiser la maintenance et d'allonger la durée de vie de la construction.



Comblement de doline sous une route d'après Faculté polytechnique de Mons 2004
(Figure 75 : utilisation de géosynthétiques pour les routes sur terrains karstiques;
d'après R. Bonaparte & R.R.Berg, 1987).

236 Prevention and remediation of sinkholes

[Ch. 11

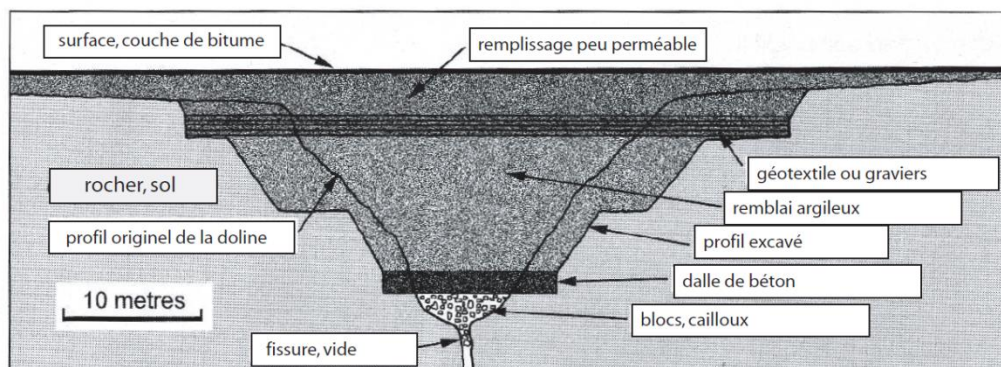


Figure 11.6. Incorporation of a concrete plug and a geogrid mattress in the remedial filling of the sinkhole under a road in the Saucon Valley, Pennsylvania; the scale is approximate.
After Bonaparte and Berg (1987).

Comblement de doline d'après Waltham et al. 2005.

Autres méthodes de remédiation (selon Fac. Poly. Mons 2004)

Fondations superficielles : semelles, radiers, longrines

Les fondations superficielles transmettent les efforts directement sur les couches proches de la surface. On les utilise quand les couches géologiques sont capables de supporter la construction.

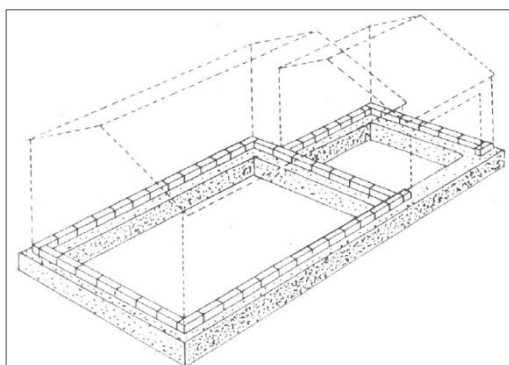


Figure 81 : Fondations sur semelles filantes (d'après Ernst Reuter)

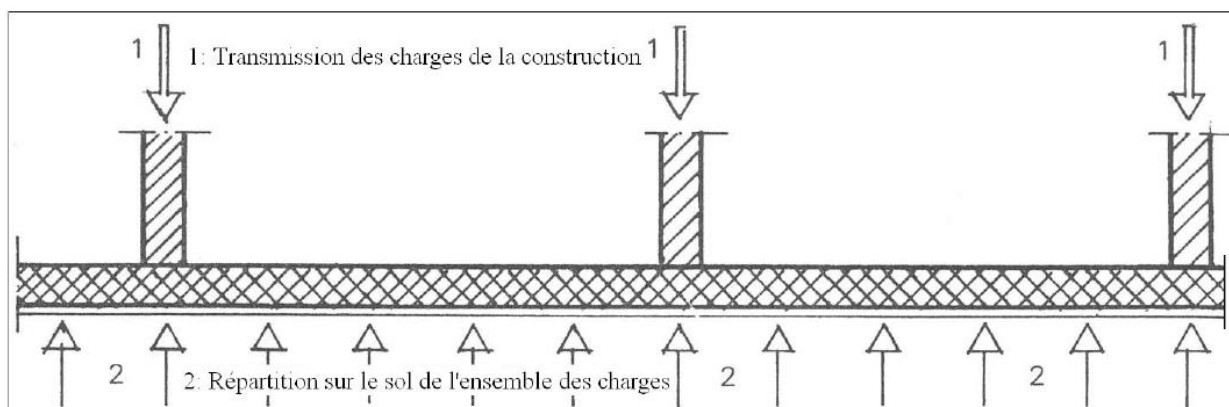


Figure 82 : Fondation sur radier (d'après Ersnt Reuter)



Longrine (source : internet)

Fondations profondes : Pieux

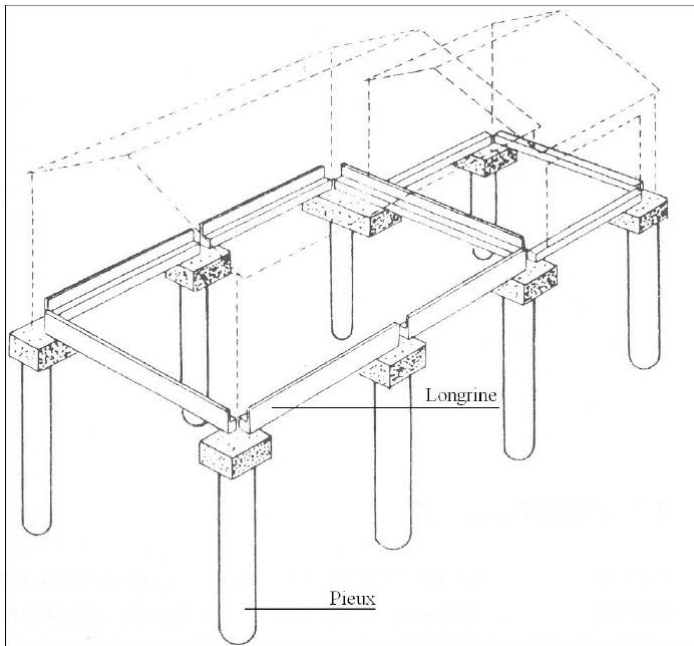


Figure 85 : Fondations sur pieux (d'après Ersnt Reuter)

Injection / grouting :

Ces techniques peuvent s'avérer complexes et demandent une solide expérience. Elles seront mises en œuvre dans des cas liés à des projets complexes ou des biens à protéger de valeur élevée...

Compaction grouting : principe

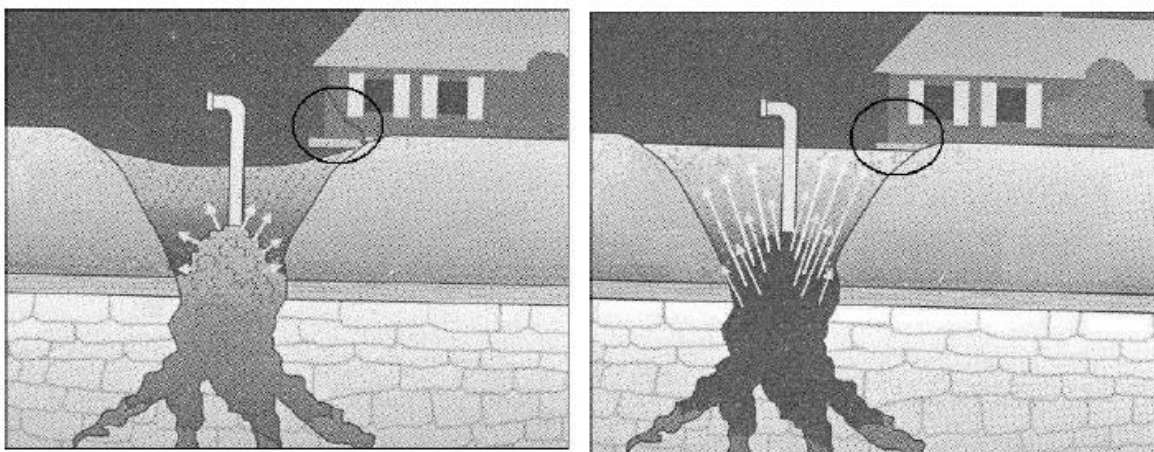
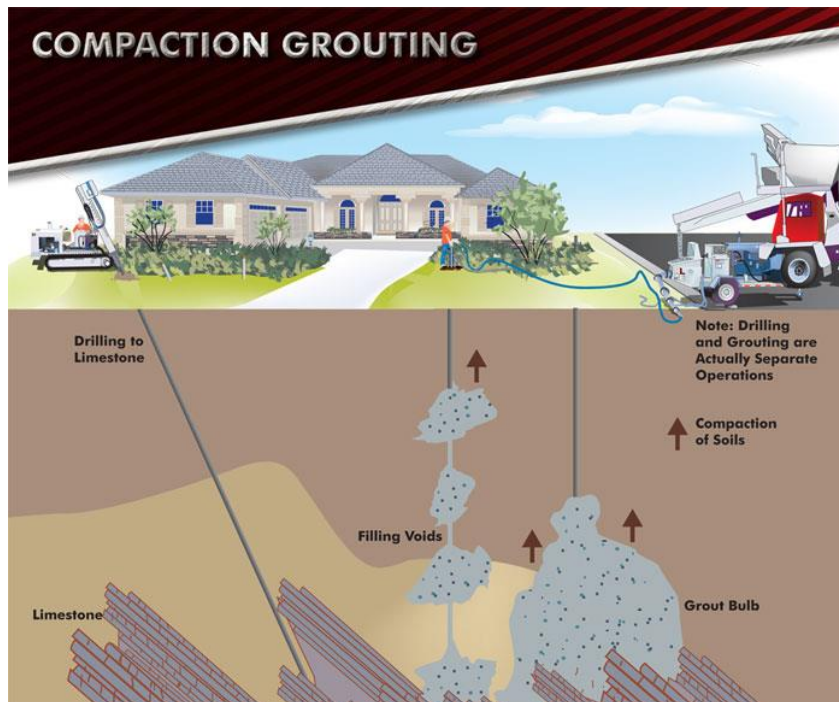


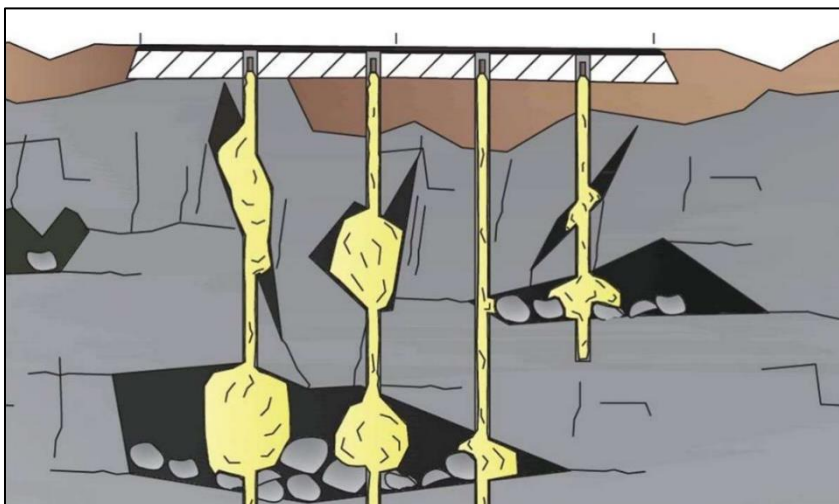
Figure 77 : amélioration du sous-sol (d'après M.P. Moseley, 1993)

Différents types d'injection (grouting) existent, mais elles exigent toutes une bonne connaissance des terrains, des vides potentiels et des risques environnementaux liés à leur mise en œuvre.



Compaction grouting : injection de ciment à haute pression (source : internet)

Injection en chaussette



Le procédé Cavibag consiste à conforter les sols présentant tous types de cavités par un comblement confiné dans un géosynthétique étanche renforcé par une armature de type micropieu. Ce traitement permet le blocage des parois de la cavité et élimine le risque

d'apparition de mouvements de terrain en surface. Il est opérationnel dans des endroits non accessibles (www.cerema.fr).

Références

Bonaparte R., Berg R.R., 1987 – The use of geosynthetics to support roadways over sinkhole prone areas, *Proceeding of the 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst*, edited by Beck B.F., A.A. Balkema, p.437 – 445.

Moseley M.P., 1993 – Ground improvement, published in the USA and Canada by CRC Press, Inc. ISBN 0 8493 7717 X.

Reuter F., Stoyan D., 1993 – Sinkholes in carbonate, sulphate, and chloride karst regions: principles and problems of engineering geological investigations and predictions, with comments for the construction and mining industries, *Applied Karst Geology*, Proceeding of the fourth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and Engineering and Environmental Impact on karst (Panama City, Florida), edited by Beck B.F., A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p.3 – 25, ISBN 90 5410 305 1.

Waltham T, Bell F, Culshaw M (2005) – Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer Praxis, Series: Geophysical Sciences.
Cavibag :

www.cerema.fr – <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cavibag-innovation-prevenir-risque-effondrement-cavites>