

Mandant : Direction générale de l'environnement (DGE)
Unité des dangers naturels (UDN)
Avenue de Valmont 30b
1014 Lausanne



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

Cahier 2 Méthode d'analyse de site

Rapport



La Chaux-de-Fonds, le 2.7.2024

ISSKA
SISKA
ISSCA
SISKA



INSTITUT SUISSE DE SPÉLÉOLOGIE ET DE KARSTOLOGIE
SCHWEIZERISCHES INSTITUT FÜR SPELEOLOGIE UND KARSTFORSCHUNG
ISTITUTO SVIZZERO DI SPELEOLOGIA E CARSOGORIA
SWISS INSTITUTE FOR SPELEOLOGY AND KARST STUDIES

Titre :	Gestion des instabilités karstiques dans le canton de Vaud, Aléa « effondrement de dolines » - Cahier 2, Méthode d'analyse de site. 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 dans une doline située dans le gypse. Exemple d'un cas situé dans le canton du Valais (photo Isabelle Droz).
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 2, Méthode d'analyse de site. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie. Mandant : DGE – Direction des ressources et du patrimoine naturels, Unité des dangers naturels, 17 p.

Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 2 Méthode d'analyse de site

Table des matières

Clé de lecture du rapport	
1. Situations et typologie de danger	1
1.1. Situations de danger	1
1.2. Soubassement et couverture meuble.....	2
2. Démarche.....	4
3. Evaluation d'un site.....	5
3.1. Facteur 1 : Dangerosité de vide	7
3.2. Facteur 2 : Couverture meuble	8
3.3. Facteur 3 : Eaux souterraines naturelles.....	10
3.4. Facteur 4 : facteurs aggravants liés aux activités anthropiques (facteurs artificiels)	11
3.5. Combinaison des facteurs et évaluation de la dangerosité.....	12
3.6. Estimation de la taille des effondrements.....	13
3.7. Estimation des dangers d'abaissement.....	13
3.8. Investigations complémentaires.....	15
4. Conclusion.....	16
5. Bibliographie	16

Liste des annexes

Annexe A. Compléments sur l'évaluation des 4 facteurs de danger

- A1. *Evaluation de la lithologie*
- A2. *Couverture*
- A3. *Eau naturelle*
- A4. *Facteurs artificiels*

Annexe B. Exemples d'application de l'évaluation

Annexe C. Dispositions constructives de prévention et de remédiation (mesures de mitigation)

Annexe D. Grands tableaux : Mesures de mitigation

Liste des Figures

<i>Figure 1 Schéma des différentes situations de danger avec des phénomènes de différentes dimensions et des soubassements rocheux peu profonds ou profonds.....</i>	<i>1</i>
<i>Figure 2 Aperçu schématique des situations possibles à distinguer pour le choix de mesures constructives adéquates</i>	<i>2</i>
<i>Figure 3. Colonnes du tableau de l'Annexe D indiquant l'adéquation des mesures de mitigation en fonction de l'occupation du sol.</i>	<i>3</i>
<i>Figure 4. Recommandations de mesures de mitigation en fonction d'une situation de danger.</i>	<i>3</i>
<i>Figure 5 Schéma itératif montrant les trois niveaux d'investigation qu'il faut prendre en compte lors d'un soupçon de danger d'effondrement.</i>	<i>4</i>
<i>Figure 6 L'évaluation préventive d'un site passe par un modèle du type d'instabilité et de sa probabilité. Les investigations sont menées de manière itérative jusqu'à un niveau estimé suffisant par rapport à la vulnérabilité de l'ouvrage. Les mesures préventives à mettre en œuvre doivent toujours être proportionnées à la vulnérabilité de l'ouvrage concerné.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 7. Facteurs, sous-facteurs et classes pris en compte pour l'évaluation du danger d'effondrement (dangerosité) et les classes à identifier pour chacun d'eux (bat. = battement de la nappe ; couv. = couverture ; except. = la nappe atteint exceptionnellement la couverture ; mod. = la nappe est modifiée par les facteurs artificiels...).</i>	<i>6</i>
<i>Figure 8. Trois situations typiques pour lesquelles des abaissements sont observés plutôt que des effondrements.</i>	<i>14</i>

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1. Description sommaire des causes d'instabilités dans les lithologies karstiques. Un texte plus détaillé est donné à l'Annexe A1.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 2. Tableau indicatif de dangerosité de vides par combinaison des trois éléments que sont la lithologie, la karstification et les autres facteurs. La combinaison de lithologie et karstification donne un indice de probabilité de vide compris entre 1 et 100 (les valeurs sont plafonnées à 100).</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 3. Description sommaire des causes de danger d'instabilité liées à la couverture meuble. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A2.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 4. Tableau indicatif de probabilité d'effondrement de la couverture meuble située au-dessus d'un vide métrique. Une couverture instable s'effondrera presque certainement (valeur ~1), une couverture consolidée aura une probabilité plus faible de s'effondrer (<<1). La valeur minimum est arbitrairement fixée à 0.1.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 5. Description sommaire des causes de danger d'instabilités liées aux eaux souterraines naturelles. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A3.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 6. Tableau indicatif de l'augmentation de probabilité d'effondrement d'une couverture meuble à cause de l'eau. Généralement l'eau augmente la probabilité d'effondrement (>1).</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 7. Description sommaire des causes de danger d'instabilités liées aux surcharges en région karstique. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A4.....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 8. Tableau indicatif de l'augmentation de probabilité d'effondrement d'une couverture meuble à cause d'aménagements artificiels. L'augmentation est estimée en multipliant les trois éléments du tableau. Elle peut donc être très importante (jusqu'à 32 fois).</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 9. Gammes de valeurs possibles pour chacun des 4 facteurs d'évaluation de la dangerosité d'effondrement. Les valeurs min. et max. bornent l'intervalle possible pour chaque paramètre. Les valeurs « normales » sont indicatives d'une situation assez usuelle et sont données à titre d'exemple. Ainsi un calcaire couvert avec des infiltrations artificielles sans surcharge aura une valeur de $50 \times 0.35 \times 1 \times (4 \times 1.5 \times 1) = 105$.</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 10. Classes de dangerosité d'effondrement en fonction du nombre de points obtenus par la combinaison des 4 facteurs de danger.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 11 Tableau de croisement type d'objet / niveau de danger permettant de savoir s'il faut envisager une investigation ou non. Attention, ce tableau simplifié est une aide à la décision et ne contient pas tous les cas de figure. Légende : Oui / Non / A voir au cas par cas.....</i>	<i>15</i>

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 2**.

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

Aléa « effondrement de dolines »

Cahier 2 Méthode d'analyse de site

1. Situations et typologie de danger

1.1. Situations de danger

La Figure 1 présente un exemple de bâtiment sur une doline (= lieu d'effondrement potentiel ou avéré) plus ou moins grande et avec un sol meuble plus ou moins épais.

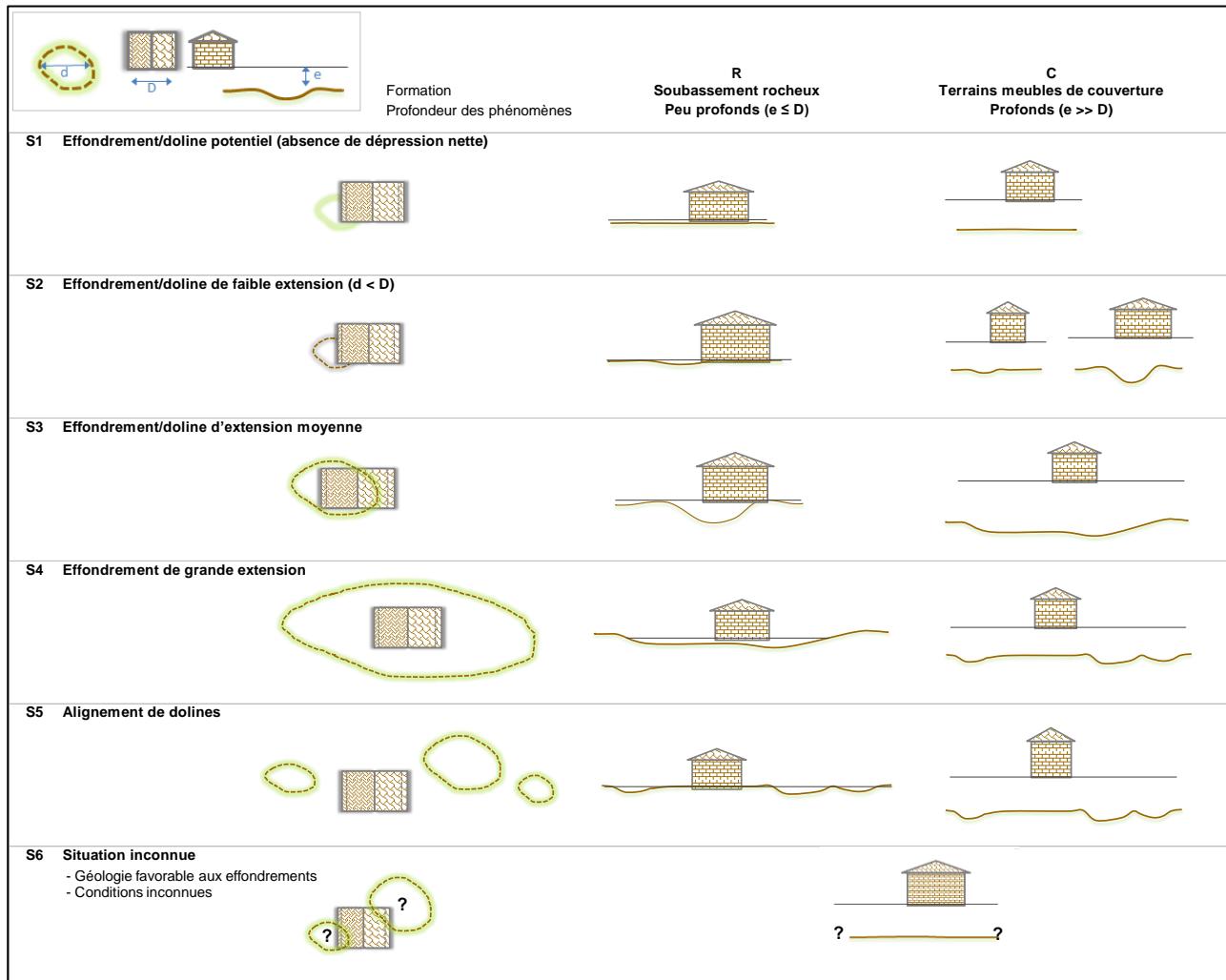


Figure 1. Schéma des différentes situations de danger avec des phénomènes de différentes dimensions et des soubassemens rocheux peu profonds ou profonds.

Les cas présentés dans la figure montrent cinq situations correspondant à cinq typologies de tailles d'effondrement potentiel, avec à chaque fois absence ou présence de terrain meuble de couverture :

- S1 : pas de dépression nette
- S2 : effondrement de faible extension
- S3 : effondrement d'extension moyenne
- S4 : effondrement de grande extension
- S5 : alignement de dolines

Un sixième cas (S6) présente la situation où le soubassement est inconnu, mais qui ne fera pas l'objet d'investigations supplémentaires (p. ex. par manque d'enjeu sur le bien à protéger).

1.2. Soubassement et couverture meuble

Deux cas sont distingués : les cas avec couverture « C » et sans couverture « R ».

Les cas « R » (pour « rocher ») sont relativement faciles à évaluer car les dolines et cavités sont visibles ou relativement faciles à investiguer (quelques coups de pelle mécanique). Les cas « C » (pour « couverture ») sont nettement plus difficiles à appréhender.

L'évaluation du danger et de la vulnérabilité d'un ouvrage peuvent mettre en évidence des conditions justifiant des dispositions constructives préventives. Il importe alors de choisir la bonne manière de traiter le cas. La Figure 2 présente de manière schématique les cas possibles.

Gestion intégrée des dangers naturels - Aléa effondrement

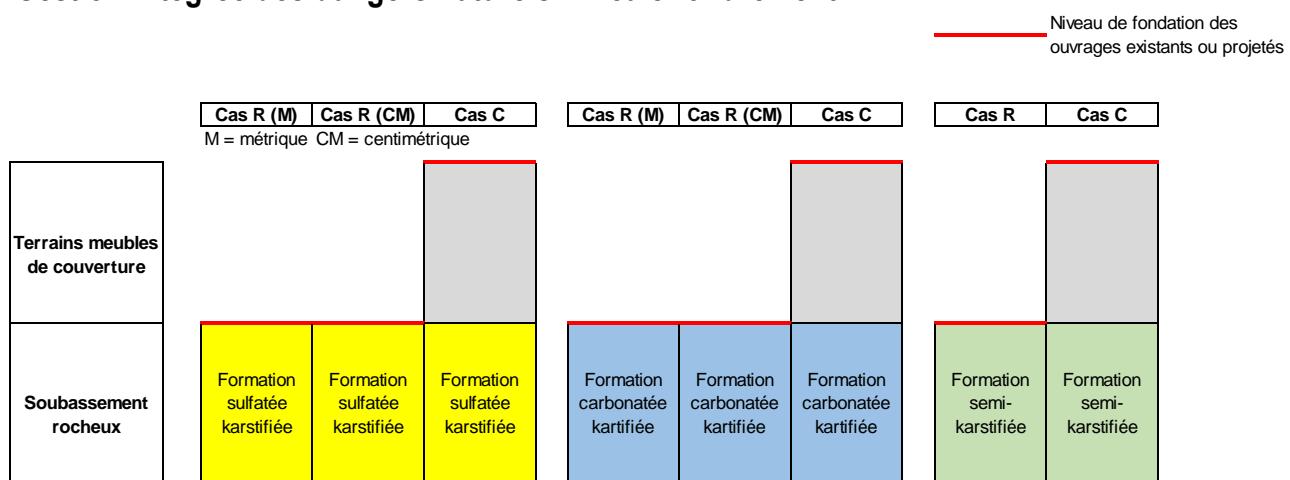


Figure 2. Aperçu schématique des situations possibles à distinguer pour le choix de mesures constructives adéquates.

Ces différents cas sont présentés plus en détail dans l'annexe C, *dispositions constructives de prévention et de remédiation (mesures de mitigation)*.

Cet annexe C introduit le fonctionnement des trois tableaux de l'annexe D, *sélection des mesures de mitigation*. Ces tableaux permettent selon le type de roche et de soubassement de choisir les mesures constructives les plus adéquates.

Ces trois tableaux sont :

- Sélection des mesures de mitigation en fonction du danger
- Méthodes et mesures de mitigation
- Situations de danger (repris de la Figure 1)

Le fonctionnement de l'annexe est décrit schématiquement ci-dessous :

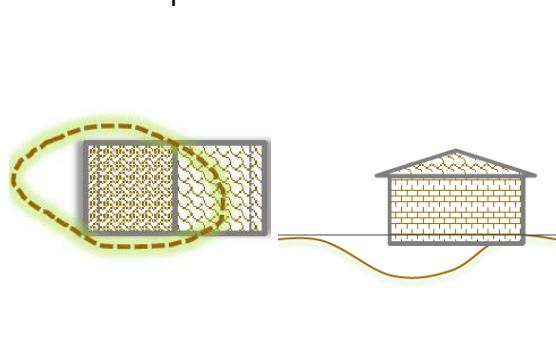
Nous entrons dans le premier tableau ***Eventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)***. Le tableau de la Figure 3 indique les mesures de mitigation qui sont en adéquation avec l'occupation du sol. Ce tableau permet d'évaluer l'intérêt des mesures de mitigation proposées sur divers types de constructions ou d'infrastructures simples (jardins, hangars) ou complexes tels que usines, HLM, etc...

Sélection des mesures de mitigation			Annexe D				
Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol *				
			A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâtiments	E Spéciales
100	Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête				
		102 Relèvement d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre				
200	Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compatibles (principe du filtre inversé)	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire				
		202 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compatibles (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au fond du soubassement karstifié					
		203 Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravette), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étalement ou de consolidation (voir ci-dessus) est envisageable				
300	Report de la charge en profondeur – sur le soubassement rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire				
		302 Micropieux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tubage perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités récupérées par les micropieux				
		303 Pleux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tubage perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités récupérées par les pleux				
		304 Pleux préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tubage	Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un béton). Attention également au risque de flambage en fonction du rapport entre le diamètre des pleux et la hauteur des cavités récupérées par les pleux				
400	Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + filer) ou de coulis minéraux (ciment, micromciment + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'étalement (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de la porosité – vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limono-argileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes				
		402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains) ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration))					
		403 Injections de compactage verticales ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compactés				
		404 Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles gravellier avec matrice fine (sableuse à argileuse)				
		405 Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différends d'ampleur limitée (exemple société Uretek)	②	③		④

Figure 3. Colonnes du tableau de l'Annexe D indiquant l'adéquation des mesures de mitigation en fonction de l'occupation du sol.

Selon les situations de danger S1 à S6, qui figurent en dessous et à la Figure 1, nous entrons dans le deuxième tableau ***Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison***, qui nous permet de nous situer selon la lithologie et la situation de danger dans une ligne du tableau (

Figure 4). Nous pouvons y voir les mesures de mitigation conseillées (++) ou plutôt conseillées (+). Il est normé pour le cas standard d'un chalet ou d'une villa de taille moyenne.



Lithologie	Situation de danger considérée (d/D)	100 Décapage			200 Comblement			300 Report de la charge en profondeur		
		101	102	201	202	203	301	302	303	304
S1	R	M	++	++	++					
		CM	++	++	++					
S2	R	M	+	+						
		CM	++	++	++					
S3	R	M	+	+						
		CM	++	++	++					
S4	R	M	++	++	++					
		CM	++	++	++					
S5	R	M	+	+						
		CM	++	++	++					

A - Rochers karstiques sulfatés
A - Rochers karstiques sulfatés (en présence de roches friables, il faut démanteler avant recours à des ciments résistants aux sulfates)

Figure 4. Recommandations de mesures de mitigation en fonction d'une situation de danger.

2. Démarche

Le schéma itératif de la Figure 5 présente l'approche proposée pour l'évaluation et la gestion de cas à l'échelle de la parcelle. Trois niveaux d'investigation doivent être pris en compte lors d'un soupçon de danger d'effondrement :

- une analyse rapide (**Etape I**) ;
- si l'enjeu et les dangers sont jugés suffisants, procéder à une analyse détaillée (**Etape II**) ;
- si le danger mis en évidence dans cette étape est inacceptable, mettre en place des mesures de mitigation (**Etape III**).

La situation de danger telle que décrite à la Figure 1 ne peut généralement être évaluée de manière fiable qu'au terme de l'analyse détaillée. Si le phénomène est visible dans sa taille et son emplacement, on peut directement passer à l'**Etape III**, mesures de remédiation.

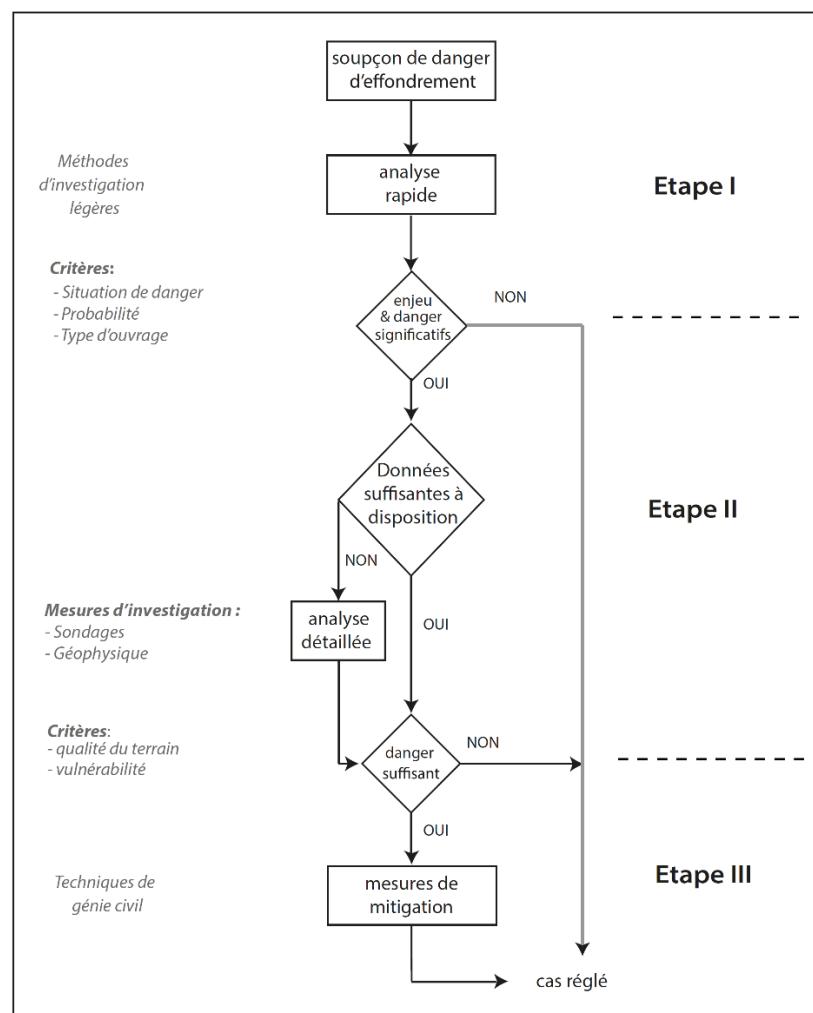


Figure 5. Schéma itératif montrant les trois niveaux d'investigation qu'il faut prendre en compte lors d'un soupçon de danger d'effondrement.

La décision de poursuivre les investigations dépend de l'ouvrage, de la dangerosité de la situation et des procédures locales décidées par les acteurs compétents.

3. Evaluation d'un site

Les analyses rapides et de détail se basent sur un modèle de probabilité d'effondrement du terrain sur lequel il est envisagé de placer une construction ou un aménagement. Si la situation de danger (selon la Figure 1) est claire car le problème est visible en surface, il est envisageable de passer directement à l'évaluation des mesures de remédiation (chapitre 4, Partie 1). Cependant, il est souvent utile ou nécessaire d'obtenir des informations plus ciblées pour décider et dimensionner ces dispositions.

L'évaluation se fait au niveau de la parcelle. L'évaluation proposée ici n'est pas une méthode de cartographie du danger, mais d'évaluation pour un site donné. Elle se base sur 4 facteurs de « dangerosité » :

- la probabilité de vide,
- la couverture meuble,
- l'eau naturelle,
- les facteurs aggravants liés aux activités anthropiques.

La Figure 6 montre la méthode itérative d'évaluation préventive d'un site selon le type d'instabilité et sa probabilité.

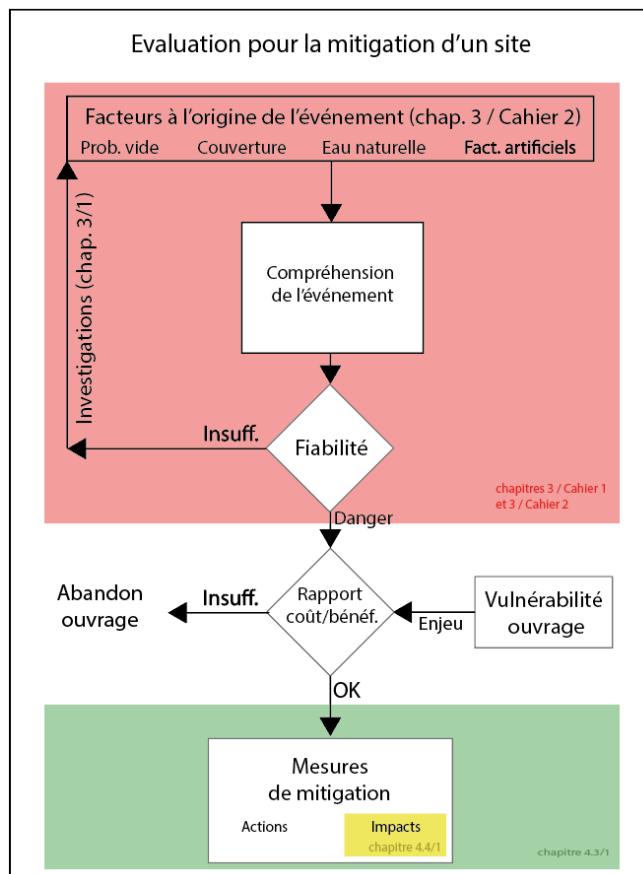


Figure 6. L'évaluation préventive d'un site passe par un modèle du type d'instabilité et de sa probabilité. Les investigations sont menées de manière itérative jusqu'à un niveau estimé suffisant par rapport à la vulnérabilité de l'ouvrage. Les mesures préventives à mettre en œuvre doivent toujours être proportionnées à la vulnérabilité de l'ouvrage concerné.

La combinaison de ces 4 facteurs permet d'arriver à identifier le type probable d'effondrement et la probabilité qu'il se produise. Cette partie du rapport explique les objectifs et la manière d'évaluer ces facteurs.

Diverses investigations peuvent être mises en œuvre pour l'évaluation. On commencera généralement par une investigation préliminaire, qui sera complétée si nécessaire en fonction de la fiabilité du résultat et de la vulnérabilité de l'ouvrage. Il est clair que l'on investira moins d'efforts d'investigation pour la construction d'un chemin rural dans une région à dolines que pour la construction d'un immeuble de 6 étages ! L'approche proposée est donc itérative.

Une consultation de la banque de données géologiques de l'Etat de Vaud (*geocad1.vd.ch*) nous semble dans tous les cas indispensables comme point de départ.

La documentation inclura généralement trois échelles de travail : typiquement une zone de quelques km² pour situer la parcelle dans son contexte géologique et karstique (échelle 1:25'000), une cartographie des environs de la parcelle (env. 1 km²) à l'échelle du 1:5000, enfin une cartographie de la parcelle elle-même à l'échelle du 1:1000 ou 1:2000.

L'analyse initiale sera modeste et permettra de décider si d'autres analyses sont nécessaires et de les chiffrer. Nous conseillons notamment de consulter dans cette phase :

- le site de la Banque de données géologiques de l'Etat de Vaud : *geocad1.vd.ch*¹;
- le site *map.geo.admin.ch* : Géologie > Atlas géologique AG25 ; Épaisseur des terrains meubles / Altimétrie > swissALTI3D estompage du relief.

Pour chacun des 4 facteurs de dangerosité, différentes classes sont attribuées (Figure 7). La combinaison et l'interprétation de la combinaison de ces classes doit aboutir à un résultat d'évaluation de la dangerosité (chapitre 3.5). L'élément le plus important est la probabilité d'effondrement ou de subsidence. D'autres informations peuvent potentiellement aussi être obtenues : diamètre, profondeur et géométrie.

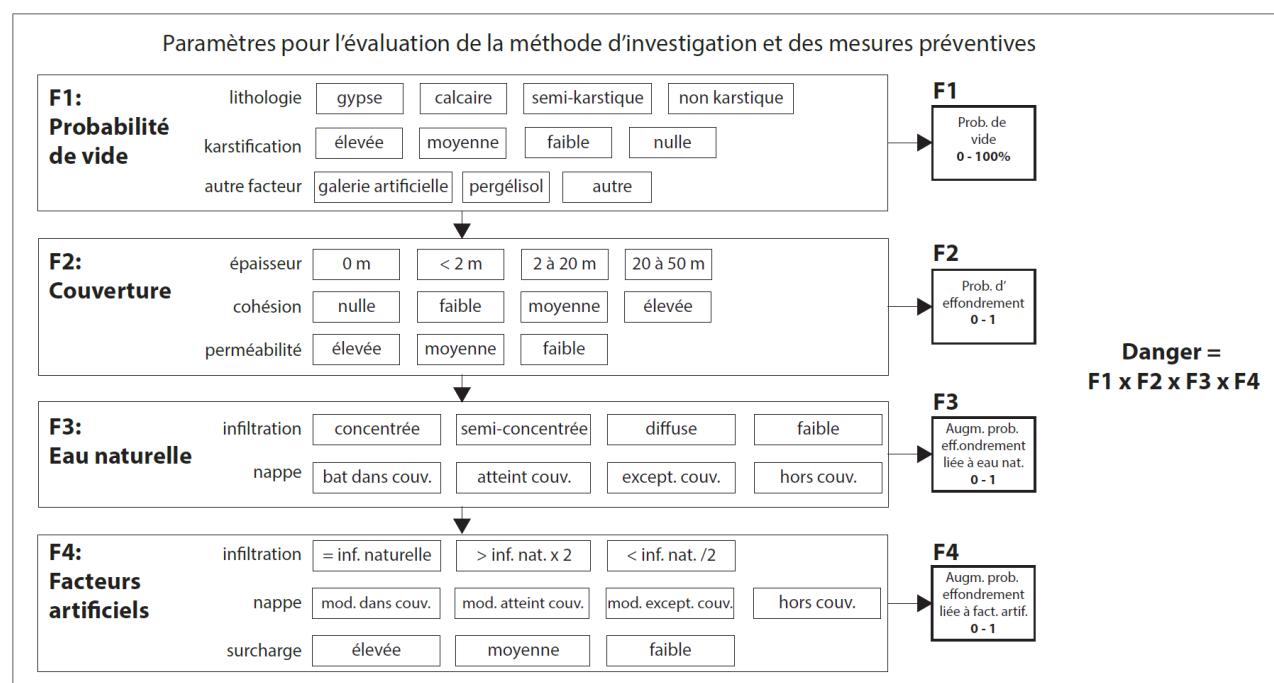


Figure 7 Facteurs, sous-facteurs et classes pris en compte pour l'évaluation du danger d'effondrement (dangerosité) et les classes à identifier pour chacun d'eux (bat. = battement de la nappe ; couv. = couverture ; except. = la nappe atteint exceptionnellement la couverture ; mod. = la nappe est modifiée par les facteurs artificiels...).

Des informations complémentaires sur ces facteurs de danger sont disponibles à l'Annexe A.

¹ <https://www.vd.ch/themes/environnement/geologie/cadastre-geologique/consultation-et-commande-des-donnees-du-cadastre-geologique>

3.1. Facteur F1 : Dangereuxité de vide

La dangereuxité est estimée par une valeur comprise entre 1 et 100% (Tableau 2). La valeur 100 indique la présence certaine d'un vide métrique directement au toit de la roche en place. La valeur 1 indique une probabilité résiduelle (admise à 1%).

Ce facteur s'estime à partir de trois sous-facteurs : la lithologie, le degré de karstification estimé, et d'autres sous-facteurs, tels que la présence de galeries artificielles.

L'annexe A1 donne également quelques compléments.

Lithologie (ligne 1) : Quatre lithologies principales sont prises en compte (Tableau 1). Le sel, trop peu répandu dans le canton de Vaud, n'est pas inclus.

Pour le gypse, la valeur minimale (résiduelle) est de 30. Elle est de 10 pour les calcaires, de 6 pour les formations semi-karstiques et de 1 pour les non-karstiques. Ces valeurs minimales sont augmentées en les multipliant par l'estimation du degré de karstification.

Le tableau tiré de Filippini *et al.* 2012 en Annexe A du Cahier 1 : *Tableau indicatif des principales lithologies karstifiables rencontrées en Suisse* permet d'évaluer différents types de roches.

Degré de karstification (ligne 2) : Il est évalué à partir des données locales ou régionales (carte du karst, carte des dolines, autres documents). Par défaut (pas de données), on pourra admettre une valeur de 5. Des indices clairs devraient permettre d'abaisser ou d'augmenter cette valeur (p.ex. présence de grottes, de lapiés, alignement de dolines, ou à l'inverse, indices explicites d'une faible karstification en raison d'une exposition très récente des calcaires ou une forte abrasion glaciaire...). Des valeurs indicatives sont données dans le tableau 2, mais finalement, c'est le géologue qui doit estimer quel est le niveau de probabilité de présence d'un vide par rapport au niveau minimum.

Autres facteurs (ligne 3) : Ce critère est indépendant de la lithologie et peut suffire à lui seul à mettre une probabilité de vide comprise entre 1 et 100.

Pour l'évaluation, on combinera donc les éléments lithologie et karstification en les multipliant. Toute valeur supérieure à 100 sera considérée comme valant 100. On évaluera ensuite l'élément « autres facteurs » et on choisira la valeur la plus élevée entre la combinaison lithologie-karstification et « autres facteurs ».

Toutes les données disponibles sur les conditions locales : géologie (affleurements, forages), hydrologie (pertes, sources, essais de traçage, piézométrie) et spéléologie (inventaire de cavités) devront être prises en compte.

NB : Si une cavité est découverte au cours des investigations, il importe de la documenter en observant sa géométrie, les caractéristiques de ses parois (en particulier de son plafond), les remplissages et les indices de circulation d'eau. Toute autre particularité (p.ex. courant d'air) peut s'avérer importante.

	Gypse	Calcaire	Semi-karstique	Non-karstique
Description de la dangerosité	Inclut gypse, anhydrite et sel, éventuellement cornieules. Dissolution rapide possible, donc création de vides en quelques années ou décennies. Gonflement possible de l'anhydrite.	Présence de cavités résultant de la dissolution lente des calcaires. La plupart des effondrements résultent de la subrosion de la couverture meuble située au-dessus des cavités de la roche. Rôle essentiel de l'eau qui diminue la cohésion de la couverture.	Les calcaires marneux, marnes, cornieules et parfois molasse ou flyschs peuvent posséder quelques bancs avec les caractéristiques des calcaires ou même du gypse. Or la résistance mécanique globale étant faible, les effondrements de la roche dans les cavités des étages karstifiés est possible.	Les roches considérées comme insolubles (silicatées) ne présente en général pas de risques d'effondrements. Deux exceptions: 1) cavités artificielles sous-jacentes 2) fonte du pergélisol
Elément clé pour le danger	Présence même de la roche	Présence d'une couverture meuble sur un vide karstique	Bancs karstifiés dans une roche mécaniquement faible et souvent couverte de sols épais (résidus insolubles)	Présence de cavités artificielles sous-jacentes, fonte récente du pergélisol

Tableau 1. Description sommaire des causes d'instabilités dans les lithologies karstiques. Un texte plus détaillé est donné à l'Annexe A1.

Dangerosité de vide				
Lithologie	Gypse	Calcaire	Semi-karstique	Non-karstique
	30	10	6	1
Karstification	Karstif élevée	Karstif moy.	Karstif faible	Karstif nulle
	10	5	1	1
Autre facteur	Gal. Artif	Pergélisol	Autre	
	100	50	1.5	

**Facteur F1
1 à 100**

Tableau 2. Tableau indicatif de dangerosité de vides par combinaison des trois éléments que sont la lithologie, la karstification et les autres facteurs. La combinaison de lithologie et karstification donne un indice de probabilité de vide compris entre 1 et 100 (les valeurs sont plafonnées à 100).

3.2. Facteur F2 : Couverture meuble

Excepté pour le gypse où le risque d'effondrement de la roche sous la couverture est élevé, c'est généralement la couverture qui s'effondre dans un vide préexistant. Les caractéristiques de la couverture sont donc déterminantes.

Le facteur couverture est constitué de 3 sous-facteurs : épaisseur, compacité et perméabilité. Le Tableau 3 et le Tableau 4 donnent les indications nécessaires pour déterminer ces facteurs. L'annexe A2 donne également quelques compléments.

Le facteur couverture vient multiplier le facteur de probabilité de vide. Une couverture instable avec une très forte probabilité de s'effondrer sur un vide sous-jacent aura donc une valeur 1. Une couverture avec une compacité très faible, quasi nulle, a une forte probabilité d'être déjà effondrée ou affaissée, c'est pourquoi la valeur diminue entre une compacité faible et une compacité nulle. Un sol considéré comme très stable a une valeur 0.1. Pour obtenir une estimation, il faut multiplier les valeurs estimées pour chacun des trois sous-facteurs (épaisseur, compacité et perméabilité). La multiplication de valeurs faibles aboutissant à des nombres très petits, une valeur globale minimum de 0.1 est proposée.

Si la couverture est consolidée au point de ne présenter que très peu de probabilité d'effondrement, une valeur inférieure est toutefois envisageable. Attention, il importe d'estimer si le résultat de la combinaison des trois éléments reflète la probabilité d'effondrement de manière crédible (faible si <0.1, modérée entre 0.1 et 0.5, élevée au-dessus de 0.5).

	Perméabilité	Compacité	Epaisseur
Description de la dangerosité	La couverture est drainée concentriquement vers les points d'absorption du substratum. Les couvertures meubles à perméabilité moyenne sont les plus vulnérables car l'eau peut y circuler et entraîner les éléments vers les cavités sous-jacentes (subrosion). Les couvertures très perméables sont généralement formées de gros galets ou blocs qui se coincent dans la cavités et restent assez stables.	Pour recouvrir un vide, la couverture doit être suffisamment compacte pour "coller" les éléments et éviter qu'ils tombent dans la cavité. La compacité diminue lorsque l'hydratation augmente. La teneur en argiles est probablement la plus déterminante: la compacité est nulle avec moins de 2%, modérée entre 2 et 10%, moyenne à élevée au-delà. Un ciment calcaire peut aussi rendre le sédiment plus "cohésif" (dans le sens plus compact).	Si la couverture est mince (<2m) elle ne tient que sur de petites cavités et celles-ci sont assez faciles à identifier. Si la couverture est très épaisse, il est probable qu'elle résiste mécaniquement sur le moyen-long terme. Les épaisseurs critiques se trouvent entre 2 et 20 mètres.
Elément clé pour le danger	Assez perméable pour entraîner la couverture dans un vide sous-jacent, mais particules pas trop grandes pour être facilement entraînées.	Passage de "un peu cohésif" à "non cohésif" en présence d'eau	Couverture de 2 à 20 m d'épaisseur

Tableau 3. Description sommaire des causes de danger d'instabilité liées à la couverture meuble. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A2.

Couverture	0 m	<2 m	2 à 20 m	20 à 50
Epaisseur	0,1	0,7	1	0,8
Compacité	nulle	faible	moyenne	élevée
Perméabilité	>10E-04	10E-04 à 10E-07	<10E-7	
	0,3	1	0,5	

**Facteur F2
0,1 à 1**

Tableau 4. Tableau indicatif de probabilité d'effondrement de la couverture meuble située au-dessus d'un vide métrique. Une couverture instable s'effondrera presque certainement (valeur ~1), une couverture consolidée aura une probabilité plus faible de s'effondrer (<<1). La valeur minimum est arbitrairement fixée à 0.1.

Epaisseur des terrains meubles : ce chiffre peut être approché par le thème épaisseur des terrains meubles présent sur le site internet map.geo.admin.ch.

Accès : map.geo.admin.ch
 > Géocatalogue
 > Nature et environnement
 > Géologie
 > Épaisseur des terrains meubles

Les conductivités hydrauliques supérieures à 1E-04 m/s correspondent à des graviers relativement propres ou à des éléments plus gros. Le danger d'entraînement dans le karst, donc d'effondrement est limité. Les conductivités hydrauliques inférieures à 1E-07 m/s correspondent à des sédiments comprenant passablement d'argiles cohésives. Le flux d'eau est alors forcément limité dès que la couche dépasse 2 m d'épaisseur. Le danger d'entraînement dans le karst par l'eau d'infiltration est faible, donc le danger d'effondrement assez faible. Attention toutefois si l'eau provient depuis du soubassement rocheux (sous-pression).

Attention également à la possible perte de cohésion des argiles aux alentours des régions où du sel est présent, éventuellement en lien avec le salage des routes (situation analogue au phénomène de « quick clay² »).

La présence de couches plus cohésives peut bloquer la remontée de cavités à travers la couverture meuble pendant des mois, voire des années. Il faut donc être attentif aux couches ou lentilles plus argileuses dans la couverture.

² Quick clay : Certaines argiles, en particulier les smectites, peuvent perdre leur cohésion de manière quasi instantanée lorsqu'elles sont exposées à une eau peu minéralisée (p.ex. eau de pluie, après avoir été imbibées d'eau riche en ion sodium).

Un autre cas est celui de blocs de gypse de grandes dimensions, pris dans le terrain meuble (cône de déjection, moraine). C'est par exemple le cas dans la moraine entre les lieux-dits « Le Glarey » et « Grand Moulin » sur la commune de Bex.

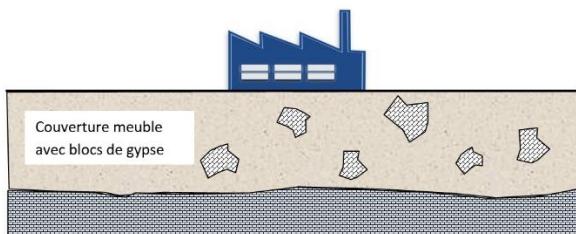


Figure 8 *Blocs de gypse de grande taille pris dans le terrain meuble.*

3.3. Facteur F3 : Eaux souterraines naturelles

Il s'agit d'une part des eaux souterraines contenues dans la nappe d'eau souterraine, d'autre part, de l'eau d'infiltration provenant de la surface mais non influencée par les interventions humaines.

L'eau dans un sédiment meuble est presque toujours un facteur diminuant sa cohésion, donc sa stabilité (Tableau 5). Il peut cependant y avoir des exceptions. Ainsi le facteur eau naturelle multiplie en principe le facteur couverture par une valeur supérieure à 1 (Tableau 6). Les valeurs de pondération sont cependant faibles (typiquement 1.3) car on peut de manière générale admettre qu'une couverture est stabilisée par rapport aux conditions naturelles (« ce qui devait tomber est déjà tombé »).

Dans le gypse, l'eau est de toute façon un facteur nettement aggravant. On ne considérera alors pas seulement l'eau dans la couverture, mais aussi dans la formation gypseuse (ou d'anhydrite).

L'annexe A3 donne également quelques compléments.

	Infiltration	Nappe
Description de la dangerosité	Un équilibre s'établit entre les forces d'érosion et de cohésion dans la couverture meuble, sur une cavité sous-jacente. Une intensification de l'infiltration augmente l'érosion et la couverture s'effondre dans la cavité.	La présence d'une nappe d'eau dans des matériaux meubles tend à diminuer leur cohésion, donc à augmenter la subrosion. Une modification du niveau de la nappe dans la couverture crée généralement des instabilités.
Elément clé pour le danger	Flux d'infiltration dépassant notamment la pluie efficace journalière maximale avec un temps de retour de 2 ans	Remontée ou modification de la nappe d'eau dans la couverture meuble (battements de la nappe)

Tableau 5. *Description sommaire des causes de danger d'instabilités liées aux eaux souterraines naturelles. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A3.*

Pour l'infiltration, les classes suivantes sont proposées :

1. **infiltration concentrée** : zone³ dans laquelle l'infiltration est supposée pouvoir dépasser 2 fois la précipitation brute lors d'événements pluvieux intenses.
2. **Infiltration semi-concentrée** : zone dans laquelle l'infiltration est supposée être comprise entre 1 et 2 fois la précipitation brute lors d'événements pluvieux intenses.
3. **Infiltration diffuse** : zone dans laquelle l'infiltration est supposée être du même ordre ou un peu inférieure à la précipitation brute lors d'événements pluvieux intenses.
4. **Infiltration faible** : zone dans laquelle l'infiltration est inférieure à 50% de la précipitation brute lors d'événements pluvieux intenses.

Ces classes, basées sur les conditions naturelles, représentent la référence. En effet, si les conditions « naturelles » existent depuis longtemps (>100 ans), on peut penser que le sol est équilibré donc assez stable.

On peut donc estimer l'infiltration de référence en prenant la pluie brute à temps de retour de 2 ans pour la classe 3. Il est alors facile d'estimer l'infiltration de référence des autres classes.

Eau naturelle				
Infiltration	Concentrée	Semi-conc.	Diffuse	Faible
	1.3	1.1	1	0.8
Nappe	Dans couv.	Atteint couv.	Possible couv.	Hors couv.
	1.2	1.3	1.1	1

Facteur F3

0.8 à 1.69

Tableau 6. Tableau indicatif de l'augmentation de probabilité d'effondrement d'une couverture meuble à cause de l'eau. Généralement l'eau augmente la probabilité d'effondrement (>1). S'il n'y a pas de nappe, on prendra la valeur 1 « hors couverture ». La valeur maximale est 1.3 « nappe atteint la couverture ».

3.4. Facteur F4 : facteurs aggravants liés aux activités anthropiques (facteurs artificiels)

Les aménagements artificiels, qu'ils soient existants ou projetés doivent être évalués. Ils concernent essentiellement trois types de sous-facteurs suivants :

- modification des infiltrations,
- modification de la nappe d'eau souterraine,
- modification de la surcharge.

En effet, toute modification des conditions d'infiltration des eaux, de variation du niveau de la nappe d'eau souterraine par injection ou pompage, ou encore de surcharge sur un terrain instable peut entraîner un effondrement, éventuellement un abaissement. Ainsi, les facteurs artificiels augmentent généralement le danger d'effondrement par rapport à l'état naturel. On multiplie donc la valeur de danger par un facteur plus grand ou égal à un. La valeur 1 traduit un changement nul ou très modéré par rapport à la situation naturelle.

Les infiltrations dont le débit par unité de surface dépasse localement 2 fois celui de l'infiltration naturelle selon les classes définies au point précédent sont susceptibles de produire un effondrement.

Concernant la nappe, ce sont avant tout les modifications du niveau de la nappe par rapport à l'état naturel qui doivent être évaluées ici. La probabilité de noyer ou dénoyer des couches meubles qui ne l'étaient pas en conditions naturelles doit être évaluée car c'est un important moteur d'instabilités.

³ Le mot « zone » considéré ici correspond à une surface de l'ordre de quelques mètres carrés.

La surcharge liée à la construction d'un ouvrage peut induire un effondrement si elle s'applique au-dessus d'un vide dans la roche encaissante. On veillera à respecter la règle des 1.5 (rayon d'influence de la surcharge = 1.5x la hauteur de la couverture meuble (voir annexe A4).

De même, la « distance tampon » des effets de facteurs artificiels dépendra de l'ampleur du projet, mais sera généralement de l'ordre de 10 à 50 m pour un projet standard, voir plus de 100 m pour un projet d'envergure.

S'il le justifie, le géologue peut décider d'utiliser des valeurs plus élevées que celles de la table indicative.

	Infiltration	Nappe	Surcharge
Description de la dangerosité	Au-dessus d'une cavité sous-jacente, un équilibre s'établit entre les forces d'érosion et de cohésion dans la couverture meuble. Une intensification de l'infiltration augmente l'érosion et la couverture s'effondre dans la cavité.	La présence d'une nappe d'eau dans des matériaux meubles tend à diminuer leur cohésion, donc à augmenter la subrosion. Une modification du niveau de la nappe dans la couverture crée généralement des instabilités.	Une augmentation de la charge mécanique au-dessus d'une cavité couverte par des matériaux meubles ou même parfois de la roche peut induire l'effondrement de la voûte au-dessus de la cavité, donc un effondrement. Doubler la charge naturelle (poids de la colonne entre le vide et la surface) est certainement une limite à ne pas dépasser.
Elément clé pour le danger	Toute infiltration artificielle significative dans la couverture meuble.	Infiltration d'eau de la nappe touchant la couverture meuble.	Eviter une surcharge dépassant le doublement de la charge naturelle.

Tableau 7. Description sommaire des causes de danger d'instabilités liées aux activités anthropiques en région karstique. Des informations détaillées sont fournies en Annexe A4.

Fact. Artificiels				
Infiltration	= inf nat	> inf nat. X 2	< inf nat / 2	
	1	4	0.8	
Nappe	Dans couv.	Atteint couv.	Possible couv.	Hors couv.
	4	2	1.5	1
Surcharge	Elevée	Moyenne	Faible	
	2	1.5	1	

**Facteur F4
0.8 à 32**

Tableau 8. Tableau indicatif de l'augmentation de probabilité d'effondrement d'une couverture meuble à cause d'aménagements artificiels. L'augmentation est estimée en multipliant les trois éléments du tableau. Elle peut donc être très importante (jusqu'à 32 fois).

3.5. Combinaison des facteurs et évaluation de la dangerosité

Dans l'application pratique de la méthode, les tableaux présentés ci-dessus pour chacun des facteurs de dangerosité sont indicatifs. Le géologue peut décider de mettre d'autres valeurs, intermédiaires à celles proposées, s'il a des arguments pour le justifier.

Pour chaque facteur, le nombre obtenu doit tomber dans la fourchette des valeurs comprises entre le minimum et le maximum envisagés pour le facteur (Tableau 9), et il doit refléter le sentiment du géologue en fonction des données à sa disposition.

Dangerosité (lithologie + autre facteur)			
	Min (résiduel)	"normal"	Max
Gypse	30	65	100
Calcaire	10	50	100
Semi-karstique	6	30	100
Non-karstique	1	1,5	100

Couverture (Epaisseur + Cohésion + Perméabilité)			
	Min	"normal"	Max
Eau naturelle	0.1	0.35	1
Facteurs artificiels (Infiltration, nappe, surcharge)			
	Min	"normal"	Max
	0.8	9	32

Tableau 9. Gammes de valeurs possibles pour chacun des 4 facteurs d'évaluation de la dangerosité d'effondrement. Les valeurs min. et max. bornent l'intervalle possible pour chaque paramètre. Les valeurs « normales » sont indicatives d'une situation assez usuelle et sont données à titre d'exemple. Ainsi un calcaire couvert avec des infiltrations artificielles sans surcharge aura une valeur de $50 \times 0.35 \times 1 \times (4 \times 1.5 \times 1) = 105$.

La combinaison des facteurs aboutira à une valeur totale comprise entre 0.8 et 5408 points (Tableau 10). Relevons qu'il existe des cas où les effondrements sont remontés en surface à travers plusieurs dizaines de mètres de terrains meubles en quelques heures !

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élévé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

F1 x F2 x F3 x F4

Tableau 10. Classes de dangerosité d'effondrement en fonction du nombre de points obtenus par la combinaison des 4 facteurs de danger.

Treize exemples chiffrés d'application de cette évaluation sont présentés à l'annexe B.

Ils présentent des cas fictifs et réels situés dans le canton de Vaud. Neufs cas ont été décrits par l'ISSKA, suivis de quatre cas présentés par l'UDN.

L'annexe est complétée à la fin par un tableau d'exemples simplifiés du canton de Vaud (14 exemples) et ailleurs en Suisse (9 exemples).

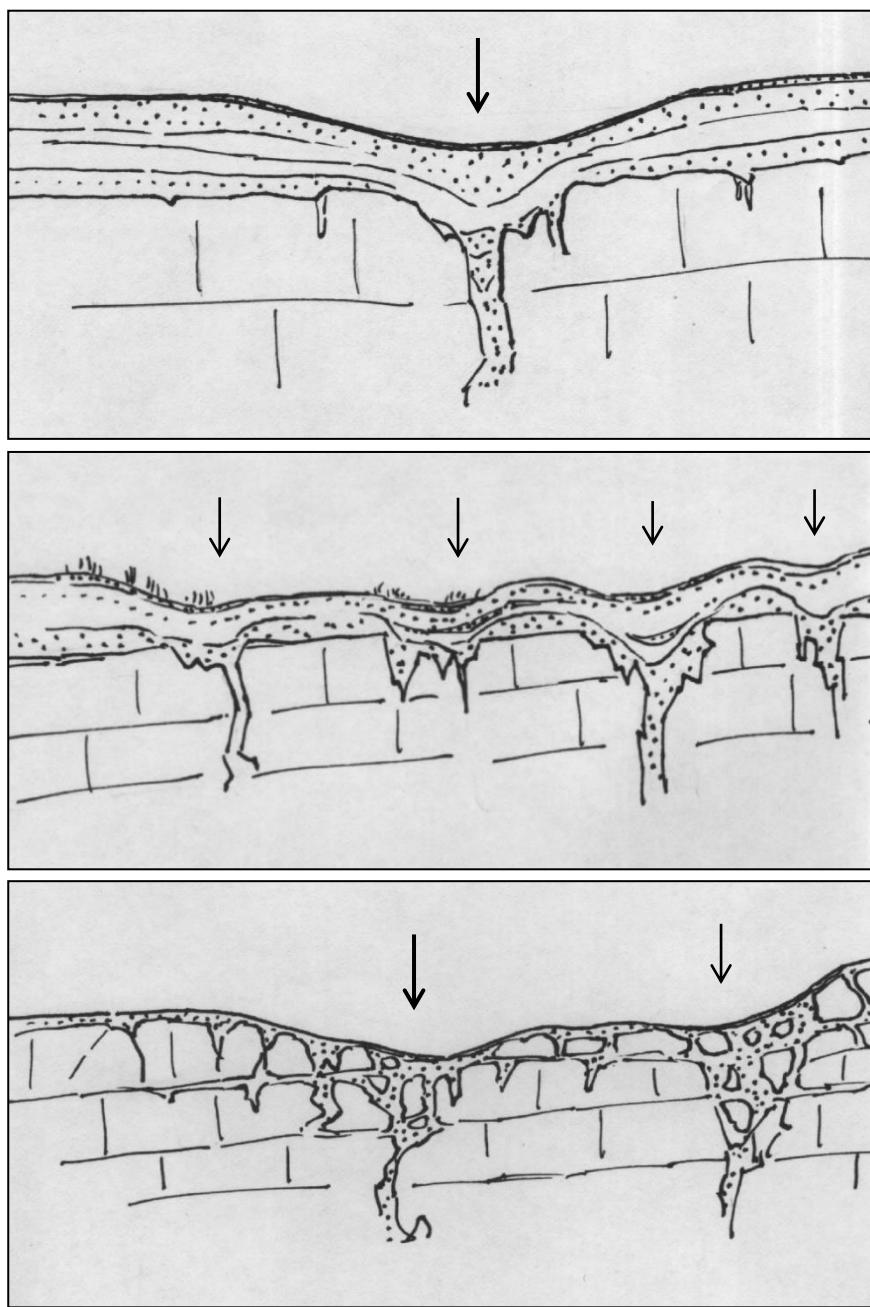
3.6. Estimation de la taille des effondrements

Empiriquement, le diamètre approximatif des effondrements observés en Suisse est généralement compris entre 1 et 10 m de diamètre pour une profondeur souvent du même ordre, parfois plutôt plus élevée (des cas dépassant 30 m ont été décrits). Les cas inférieurs à 1 m ne sont quant-à-eux probablement pas recensés. La taille augmente avec le volume de la cavité située au sommet de la roche en place et avec l'épaisseur de la couverture meuble. Les tailles les plus importantes sont à craindre dans des couvertures assez épaisses (de l'ordre de 20 à 30 m), renfermant des couches ou lentilles relativement cohésives, et situées sur des roches très karstifiées (ou des cavités artificielles volumineuses).

3.7. Estimation des dangers d'abaissement

La méthodologie présentée ci-dessus s'applique avant tout à la question des effondrements. Les abaissements concernent plutôt des zones où une dépression est déjà visible. Il est alors important

de caractériser l'activité plus que la dangerosité de l'aléa. On peut postuler que trois situations type conduisent plutôt à des abaissements qu'à des effondrements (Figure 9).



1. Couverture peu cohésive et homogène où le soutirage dans le karst « aspire » le sédiment selon un cône dont la pente est très faible en raison de la faible cohésion de la couverture.

2. Couverture peu cohésive et homogène affectée par un soutirage dans le karst sous-jacent relativement diffus spatialement (p.ex. s'il y a une multitude de petites cavités, typiquement un épikarst couvert de sol, ou le fond des dolines).

3. Roche très soluble et/ou tendre avec effondrement progressif du substratum par érosion et/ou dissolution ; c'est un risque important dans le gypse et éventuellement dans les marno-calcaires.

Figure 9. Trois situations typiques pour lesquelles des abaissements sont observés plutôt que des effondrements.

Ces cas s'apparentent aux trois situations décrites à la figure 5 du Cahier 1. Il arrive parfois que la suffusion conduise d'abord à un abaissement, puis à un effondrement (cf. figure 4 du Cahier 1). L'estimation du degré d'activité de la doline (§2.4.1, Cahier 1) est alors un élément-clé de l'évaluation.

Pour estimer le danger d'abaissement d'une zone sans dépression visible, par exemple suite à un changement de conditions hydrologiques dans une parcelle donnée, on estimera la probabilité qu'une des trois situations décrites ci-dessus existe. On s'inspirera des méthodes et critères esquissés pour l'évaluation du danger d'effondrement.

3.8. Investigations complémentaires

Après chaque analyse ou série d'analyses il est important d'évaluer la nécessité de poursuivre ou non les investigations.

Le Tableau 11 ci-dessous peut servir d'exemple pour déterminer s'il convient de se tourner vers une Etape II d'analyse de détail (Figure 5) et/ou une Etape III de mesures de remédiation, avec un niveau de dangerosité calculé selon les facteurs de dangerosité et selon le type de construction.

Le chapitre 3, Cahier 1 et ses annexes décrivent la manière de conduire les investigations dans le cas où des analyses de détail sont jugées nécessaires. Le travail est mené au niveau de la parcelle, mais certaines informations sont à rechercher dans un périmètre plus large.

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)	Champs, parcs jardins, serres plastic,)	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible	A priori pas d'investigation nécessaire				
modéré					
moyen					
élevé				Investigations conseillées	
très élevé					
« effondrement très probable »					

Tableau 11 Tableau de croisement type d'objet / niveau de danger permettant de savoir s'il faut envisager une investigation ou non. Attention, ce tableau simplifié est une aide à la décision et ne contient pas tous les cas de figure. Légende : Oui / Non / A voir au cas par cas

4. Conclusion

Ce Cahier 2 décrit une approche concrète pour évaluer les instabilités liées aux phénomènes karstiques et proposer des mesures constructives adaptées et proportionnées pour les traiter (prévention et remédiation). Il s'adresse en priorité aux géologues chargés de conduire une évaluation locale de site.

L'approche présentée ici distingue plus explicitement les situations liées à la présence de gypse et/ou d'anhydrite dans le substratum rocheux qui est alors susceptible d'évoluer et de devenir instable en l'espace de quelques mois ou années, de celles des calcaires où le substratum peut généralement être considéré comme stable. Dans les deux cas, la présence de cavités et fissures ouvertes induit des problèmes de soutirage de la couverture meuble.

Par rapport au document du GEOLEP (Parriaux et al. 2003), la méthode d'évaluation a été ajustée et précisée. La méthode proposée à l'époque reste globalement pertinente et le document peut dans certaines situations apporter des informations utiles. Le géologue peut toujours s'y référer. C'est surtout au niveau des mesures constructives que le présent document apporte un complément.

L'approche proposée a été validée sur un nombre restreint de cas pour la plupart fictifs et pour d'autres peu documentés. Elle permet cependant d'analyser le cas, de proposer des méthodes pour l'évaluer, ainsi qu'une mesure constructive adaptée. S'agissant de cas fictifs, il est difficile d'avoir un regard critique sur l'adéquation et la durabilité des mesures proposées.

5. 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 2.7.2024



Pierre-Yves Jeannin
Hydrogéologue, Dr.



Denis Blant
Hydrogéologue, Msc

Liste des annexes

Annexe A. Compléments sur l'évaluation des 4 facteurs de danger

- A1. *Evaluation de la lithologie*
- A2. *Couverture*
- A3. *Eau naturelle*
- A4. *Facteurs artificiels*

Annexe B. Exemples d'application de l'évaluation

Annexe C. Dispositions constructives de prévention et de remédiation (mesures de mitigation)

Annexe D. Grands tableaux : Mesures de mitigation

Annexe A : Compléments sur l'évaluation des 4 facteurs de danger

A1 Facteur F1 : Evaluation de la lithologie

Introduction

La lithologie du substratum détermine le type, l'activité et la position des instabilités. Or la couverture, lorsqu'elle est présente, cache le substratum et ne protège généralement pas contre les effondrements. Il faut donc essayer de connaître la géologie sous la couverture.

Souvent consulter la carte géologique et sa notice est suffisant pour se faire une idée et répondre à la question posée. Cependant, dans des formations complexes, la précision peut s'avérer insuffisante tant au niveau de la description lithologique que du positionnement des couches par rapport à la parcelle (attention en particulier au calage spatial de cartes anciennes, où des écarts de plusieurs dizaines de mètres sont assez habituels). Sachant qu'une couche fine de gypse ou de calcaire au milieu d'autres lithologies peut être suffisante pour générer des instabilités, il faut parfois rechercher une précision métrique sur le positionnement. La précision recherchée dépendra donc de l'enjeu et de la lithologie.

Si une précision élevée est recherchée, il faudra améliorer par des levés et même d'éventuels forages la description lithologique locale existante, et améliorer le positionnement respectif des lithologies décrites (cartographie géologique, forage, sondages...). Dans certains cas la géophysique peut être utile (p.ex. pour identifier une couche calcaire au milieu de marnes). Une analyse morphologique fine peut aussi être appliquée (DTM avec une résolution de l'ordre du mètre).

Catégorie « Gypse »

Gypse, anhydrite ou sel sont des formations très à risque car leur dissolution peut être rapide. Des cavités peuvent être générées dans la roche en quelques années/décennies, et générer des effondrements/abaissements. Il est impératif d'identifier ces lithologies, même si leur extension est faible. Il faut savoir si elles constituent le soubassement sur la parcelle considérée. Dans le cas de l'anhydrite, le gonflement lié à l'hydratation en gypse peut occasionner un gonflement et donc une surrection. C'est un danger à prendre en compte en cas d'excavation assez profonde. À proximité de la surface, la transformation d'anhydrite en gypse a généralement déjà eu lieu et se poursuit à un rythme faible.

Investigations

Analyse de documents (notices, monographies, travaux de thèses et diplômes, rapports d'études, etc.), analyse d'affleurements (attention les couches très solubles tendent à avoir disparu près de la surface), analyse morphologique (DTM), cadastre des phénomènes et événements. La géophysique peut éventuellement permettre d'identifier une lentille gypseuse au milieu d'autres roches. En cas de doutes, des sondages (tarière ou pelle mécanique) ou des forages seront effectués.

Catégorie « Calcaire »

Les calcaires, s'ils sont compacts ($RMR > 40$), contiennent des cavités, mais sont peu solubles. Sauf conditions exceptionnelles, de nouvelles cavités n'y sont pas formées à l'échelle de décennies ou même de siècles. Les effondrements sur calcaires sont produits surtout par

l'effondrement de la couverture meuble qui surmonte les calcaires et recouvre des cavités. Le plus souvent, les effondrements sont formés par la subrosion¹ de la couverture. Dans ce cas, la taille potentielle dépend avant tout de l'épaisseur de la couverture (plus elle est épaisse, plus la taille augmente). Sur une surface calcaire normale, on peut s'attendre à trouver des points d'absorption d'eau, susceptibles de produire de la subrosion, toutes les quelques dizaines de mètres. Leur position est déterminée par la lithologie et la fracturation.

Le danger d'effondrement par subrosion est donc présent partout dans une région calcaire recouverte d'un sol. Il augmente le long des affleurements de surfaces d'inception. La carte de dangers indique ces surfaces.

A l'échelle de la parcelle il est important de voir si une surface d'inception est explicitement affleurante ou si elle est suffisamment distante. La carte indicative aura tenu compte des structures d'inception régionales. L'analyse locale devra déterminer si ces structures d'inception sont effectivement probables et si d'autres, plus locales pourraient exister. Même si ce n'est pas le cas, un danger résiduel subsiste (subrosion), qui dépend surtout de la couverture.

L'analyse recherchera donc particulièrement les structures d'inception stratigraphiques (couches particulièrement karstifiées) et tectoniques (fractures particulièrement karstifiées).

Investigations

Identification et positionnement d'horizons d'inceptions à partir de données d'affleurement, de morphologie de surface et de grottes. Des données de forages peuvent aussi apporter des informations. L'étude devra impérativement considérer non seulement des données locales, mais aussi régionales. Le géoradar peut s'avérer efficace pour identifier une cavité sous couverture pour autant que cette dernière ne soit pas trop épaisse. Dans certains cas, le décapage de la surface est la méthode la plus efficace.

NB : Si la couverture est nulle, tout est visible, la situation est simple. Si la couverture est faible, que le calcaire est compact, le danger est limité et il est facile d'aller poser une construction directement sur la roche saine. Les investigations seront donc surtout nécessaires si la couverture est significative. En cas de couverture de faible épaisseur, un décapage complet pour les investigations peut s'avérer une méthode efficace.

Catégorie « Semi-karstique »

Cette lithologie correspond en premier lieu aux marnes, mais peut aussi s'appliquer à certains calcaires marneux, cornieules, molasses, ou flyschs. Ces roches possèdent des caractéristiques des catégories « gypse » et « calcaire ». La différence principale avec le gypse est qu'en principe la dissolution y est lente, similaire à celle des calcaires ; il s'agit en général de roches qui contiennent de la calcite, soit sous forme de bancs calcaires, soit comme ciment (grès à ciment calcaire). La différence avec les calcaires, est leur résistance mécanique qui est bien plus faible, généralement en raison d'une composante argileuse. L'évolution mécanique des cavités dans la roche peut y être rapide.

Cette lithologie est la plus difficile à appréhender. D'une part il faut évaluer si elle doit être considérée comme semi-karstique, d'autre part, la présence significative d'argiles induit généralement d'abondants résidus insolubles, donc une couverture significative. En outre, les roches de cette catégorie « semi-karstiques » sont très différentes les unes des autres.

Pour savoir si une roche est semi-karstique, le tableau de l'annexe A du Cahier 1 donne des indications de base. Dans le contexte géologique et climatique du canton de Vaud, les roches qui ne sont pas clairement des calcaires compacts, mais dans lesquelles la calcite ou la dolomite garantissent la compacité ("cohésion") de la roche, même localement, sont susceptibles d'être semi-karstiques. Une délimitation claire pour les différents types de molasses n'est pas disponible à ce jour.

¹ Lessivage et transport souterrains de sédiments meubles emportés par un flux d'eau souterraine s'infiltrant dans le soubassement rocheux.

Les lithologies semi-karstiques peuvent créer des effondrements car des cavités peuvent se former par dissolution dans les niveaux mécaniquement stables. A partir d'une certaine taille, ces cavités atteignent des niveaux plus argileux, instables qui s'effondrent. Dans certains cas, l'érosion des couches tendres peut produire des vides plus rapidement que dans les calcaires. Vu le caractère peu stable de la roche, les cavités remontent facilement par fontis. Pour le diagnostic, s'ajoute le fait que ces formations sont souvent recouvertes d'une épaisse couverture meuble, qui, comme pour les calcaires, peut être soutirée vers les points d'absorption préférentiels, donc qui est soumise à la subrosion. Après les zones de gypse les formations semi-calcaires sont les plus critiques d'un point de vue des effondrements. C'est d'ailleurs au sein des marnes qu'on observe les alignements de dolines les plus visibles.

Dans ces formations, les investigations doivent prioritairement viser à identifier et caractériser les horizons calcaires, même minces, surmontés de couches argileuses. Leur combinaison avec des structures d'inception tectoniques peut accentuer le phénomène et représenter un facteur de danger supplémentaire. Dans certains cas, des bancs calcaires massifs au sein de formations marno-calcaires peuvent garantir une certaine stabilité en empêchant les vides de remonter vers la surface.

Dans le cas des cornieules, une composante gypseuse peut rendre la dissolution rapide et la stabilité de ces roches est généralement médiocre.

Les investigations viseront donc à affiner autant que possible la description lithologique, la position des bancs les plus critiques et la présence de structures tectoniques.

Investigations

Analyse morphologique (DTM + terrain), étude lithologique détaillée (littérature + affleurements), cartographie géologique locale (DTM + terrain). La géophysique peut permettre d'identifier des couches calcaires au sein d'une série. Des sondages à la tarière ou à la pelle mécanique, ainsi que des forages sont parfois nécessaires pour positionner clairement les couches les plus critiques.

Catégorie « Non karstique »

La formation d'effondrements/affaissements en région non karstique est peu probable, mais possible. Deux situations principales sont rencontrées :

1) Présence d'une cavité artificielle (mine, tunnel, galerie d'aménée d'eau, etc.) qui s'effondre ou soutire de la matière. La remontée des vides par le phénomène de fontis peut être considérable. Elle atteint fréquemment plusieurs dizaines de mètres, parfois plusieurs centaines.

2) Phénomènes liés au pergélisol, avec un tassement notable du sol, voir la formation d'un vide (ancienne poche de glace) lors de la fonte du pergélisol. Attention, le pergélisol peut exister à basse altitude (~1000 m) dans des régions très ombragées. Inversement, il peut fondre à des altitudes élevées (>2500 m) dans des régions très exposées. Ce phénomène concerne plutôt la couverture, mais peut parfois aussi concerner le substratum rocheux.

NB : Ces deux phénomènes ne sont pas exclusifs aux zones non-karstiques, ils doivent être pris en compte dans toutes les lithologies. Ils sont peu significatifs dans les calcaires qui sont mécaniquement suffisamment stables pour limiter les fontis, et trop peu poreux pour poser des problèmes liés au pergélisol.

Investigations

Documentation de cavités artificielles (archives, littérature, inventaires spéléologiques...). Indices éventuels sur le terrain. En cas de doute étayé par des données historiques (attestation d'une cavité artificielle proche), exploration directe de la cavité et positionnement précis, éventuellement géophysique. Attention, la détection de cavités souterraines par géophysique est difficile et généralement peu fiable. Elle peut s'avérer efficace pour des cavités situées à faible profondeur.

Caractérisation de la roche du point de vue pergélisol, évaluation du contexte climatique.

A2 Facteur F2 : Couverture

Introduction

Le mécanisme principal de formation d'effondrements dans la couverture est la subrosion. Elle est contrôlée par le flux d'eau au contact avec le substratum rocheux, qui dépend de la **perméabilité** de la couverture et de celle du substratum. Cette dernière est admise élevée et concentrée en certains points dans les lithologies karstiques. La susceptibilité aux effondrements dépend en outre de l'**épaisseur** et de la **compacité** de la couverture.

Processus : une couverture meuble (donc de faible compacité) épaisse est un facteur aggravant pour la question des effondrements. Plus la couverture est épaisse, plus la subrosion crée potentiellement des effondrements larges et profonds. Toutefois si la compacité est très faible, aucune cavité ne peut se former dans la couverture et la subrosion produira un abaissement subcirulaire autour du point d'absorption au sommet du toit rocheux. Si la couverture est cohésive (compacité élevée), la matière soutirée au niveau du toit du rocher crée une cavité dans la couverture, qui remonte progressivement vers la surface (analogie aux fontis). La situation la plus critique est le cas d'une couverture épaisse un peu cohésive dans toute sa partie inférieure et durcie près de la surface. La subrosion crée un vide sur toute la partie peu cohésive, qui se rompt brutalement lorsqu'elle atteint une taille suffisante pour rompre la partie durcie. Cette situation est analogue au cas des zones goudronnées posées sur des couvertures meubles un peu cohésives (p.ex. remblai).

Perméabilité

Une perméabilité élevée de la couverture permet à l'eau de converger facilement et potentiellement de soutirer passablement de matière. Cependant, une perméabilité élevée est associée à des matériaux grossiers formant un sédiment peu consolidé. La probabilité de former une cavité y est faible.

A l'inverse, une perméabilité faible est généralement associée à la présence d'argiles qui procurent une certaine cohésion aux matériaux meubles. Une faible perméabilité limite fortement les flux convergeant vers les fissures du substratum, donc la possibilité de former des cavités.

Ce sont donc les perméabilités intermédiaires, qui présentent les conditions les plus favorables à la formation de cavités et d'effondrements. Il convient probablement de distinguer les formations homogènes de perméabilité moyenne et les alternances de couches perméables et peu cohésives et de couches peu perméables et cohésives.

Compacité

Ce terme est utilisé ici pour décrire la « cohésion du sol » au sens commun et non géotechnique (dans ce deuxième cas, la cohésion est mesure de la force de liaison chimique entre particules d'un matériau). Une compacité élevée confère généralement une plus grande résistance mécanique au sol, ce qui le rend plus apte à supporter des charges et à résister à des contraintes cisaillantes et érosives.

Les sédiments meubles à grains fins peuvent généralement être considérés comme ayant une compacité élevée. Celle-ci peut toutefois notablement diminuer avec une forte saturation en eau. A l'autre extrême, les sols sans liant (argile ou ciment) doivent être considérés avec une compacité faible.

Ces définitions nous ont été fournies par Mme Erika Prina-Howald, Professeure HES à l'HEIG-VD d'Yverdon-les-Bains, que nous remercions vivement.

Epaisseur

Une couverture mince (<2 m) est relativement facile à investiguer et présente une probabilité limitée de développer des cavités de grandes dimensions.

La situation la plus problématique correspond aux couvertures de 2 à 20 m d'épaisseur. Au-delà, les infiltrations seront souvent limitées réduisant le phénomène de subrosion. La situation doit cependant être évaluée au cas par cas. Si la nappe karstique remonte dans la couverture, toute modification des écoulements souterrains aura une forte probabilité d'induire des effondrements.

Une couverture épaisse et peu cohésive mais de matériaux peu grossiers (sables), peut conduire à un abaissement plutôt qu'un effondrement, si l'angle de talus des sédiments est faible.

Investigations

Pour couvertures avérées minces (<2 m) le décapage complet sera souvent la meilleure solution. Il ne sera alors pas nécessaire de caractériser précisément la couverture.

Pour déterminer l'épaisseur de la couverture dans la gamme de 1 à 5-8 m, des tranchées de sondage à la pelle mécanique sont envisageables. Sinon, le géoradar est la méthode la plus efficace pour une première image. On complètera l'investigation par quelques sondages (Rammsondierung, tarière ou carottage). Un minimum de 5 sondages est nécessaire.

Pour des épaisseurs élevées de couverture (> 5 m), des méthodes géophysiques doivent être mises en œuvre et complétées par des mesures géotechniques (Rammsondierung, tarière ou carottage) assez détaillées.

En cas d'enjeux importants, des forages carottés avec essais géotechniques et modélisation hydromécanique de la couverture sont conseillés, en tenant compte de la connexion avec le substratum rocheux. En zone non-saturée les points d'infiltration dans le substratum auront un potentiel imposé nul. Si la nappe d'eau souterraine touche la couverture, il faudra intégrer le substratum et la couverture dans le modèle. Dans ce cas, une caractérisation assez détaillée de la couverture sera nécessaire.

A3 Facteur F3 : Eau naturelle

Le phénomène de subrosion de la couverture meuble est induit par les flux d'eau qui se concentrent autour des points d'infiltration dans le substratum rocheux à la base de la couverture. Des cavités se forment dans la couverture autour de ces points, remontent vers la surface et s'effondrent lorsque leur taille est telle que la compacité (faible) de la couverture meuble ne suffit plus à tenir la cavité ouverte. Or la compacité d'un sédiment meuble varie notablement selon qu'il soit saturé ou non en eau (phénomène du château de sable et du gonflement des argiles).

Infiltration

L'érosion dépend du flux d'eau autour du point d'infiltration dans le substratum rocheux. En particulier, pour un flux d'infiltration donné dans le sol, un équilibre métastable s'installe entre les forces de cohésion et les forces d'érosion, équilibre qui peut permettre à une cavité de rester stable assez longtemps. Cependant une augmentation du flux d'infiltration va déplacer cet équilibre, ce qui va agrandir la cavité et peut conduire à la rupture de la voûte. Pour des conditions données, on peut penser que l'équilibre est atteint en quelques mois à quelques années. En conditions d'infiltration « stables », le nombre d'effondrements nouveaux est faible, car le système est à l'équilibre et les effondrements qui devaient intervenir se sont produits depuis longtemps. Si les conditions changent, par exemple en raison d'une intensification des précipitations maximales (changement climatique, remodelage ou aménagement) ou de la fonte du pergélisol, l'équilibre est rompu et les effondrements apparaissent.

Dans les conditions naturelles, si le flux d'infiltration dépasse notablement la pluie efficace journalière maximale avec un temps de retour de 2 ans, le risque d'effondrement s'accroît.

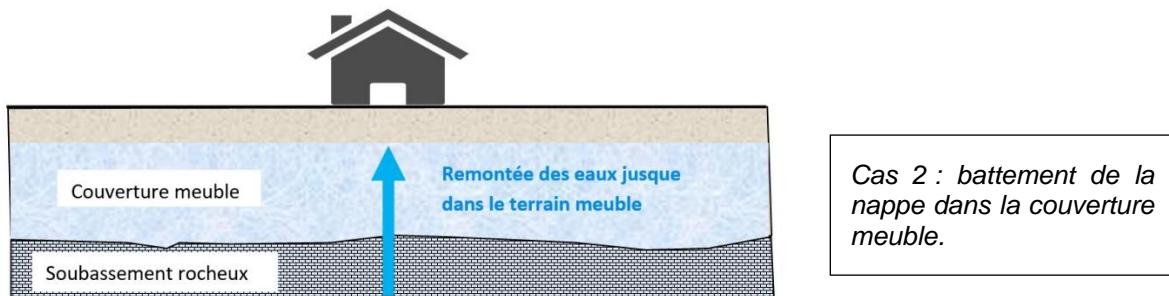
Investigations

Elles viseront à évaluer si les conditions d'infiltration des eaux naturelles ont changé au cours des dernières décennies. On conseille de procéder à des analyses de données météorologiques régionales sur le long terme, analyse de la topographie, des aménagements, des archives, etc.

Nappe

La situation est particulièrement critique si une nappe d'eau souterraine atteint l'interface entre le sédiment meuble et le substratum. On distingue 3 cas principaux :

- 1) Formation d'une nappe temporaire dans la couverture à l'interface avec le substratum.
Cette situation signifie cependant que ce dernier est relativement peu perméable, donc que sa capacité d'évacuation de matériaux, donc de subrosion, est assez limitée.
- 2) Battement de la nappe d'eau souterraine dans la couverture meuble. Cette situation est critique car les flux d'eau échangés peuvent être considérables et la compacité de la couverture très réduite. Cependant, en conditions stables (plage de battement stable d'une année à l'autre), les zones instables se sont déjà effondrées et peu de cas nouveaux sont à attendre. Par contre, toute situation exceptionnelle, qui conduirait à un niveau de la nappe extrêmement élevé ou bas peut induire des tassements ou des effondrements.



- 3) Nappe d'eau souterraine légèrement sous la limite de la couverture meuble. Dans ce cas, le danger est important si la nappe atteint la couverture lors d'une crue exceptionnelle. Il peut suffire de quelques jours, voire quelques heures, pour créer une cavité dans la couverture meuble, dont l'effondrement interviendra (ou pas) dans les mois ou années qui suivent. Les fluctuations météorologiques naturelles peuvent suffire à générer des effondrements pendant les mois ou années qui suivent des événements de crue assez rare (temps de retour de 5 à 10 ans). Le phénomène sera évidemment accentué si la fréquence et l'intensité des crues exceptionnelles augmente.

Attention : dans le karst, il se forme fréquemment une nappe d'eau temporaire dans l'épikarst. Elle est perchée par rapport à la nappe principale. Elle peut dans certains cas atteindre la couverture meuble qui surmonte l'épikarst et donc créer des effondrements.

Investigations

Il s'agit d'évaluer la position de la nappe d'eau souterraine en tenant compte de la nappe karstique régionale et de l'épikarst. Selon le cas, des forages, avec d'éventuelles séparations (packers) seront nécessaires. Un monitoring sera installé pour identifier les variations de niveau. Des observations en grotte peuvent aussi parfois apporter des indications utiles.

Des mesures géophysiques (géoradar, topographie géoélectrique, VLF) peuvent dans certaines conditions permettre d'identifier la surface de la nappe d'eau souterraine. Des mesures géophysiques répétées, en conditions de basses, moyennes et hautes eaux et/ou des injections d'eau salée peuvent aussi permettre d'identifier la position des nappes.

Remarque sur les moraines du pied du Jura

Le long du pied du Jura, les calcaires jurassiques et crétacés sont couverts d'une couche assez conséquente de moraine, parfois d'alluvions. Une partie de cette couverture est aquifère. Cette situation est donc à priori assez défavorable. Le nombre d'événements est cependant limité. La raison peut être que les nappes aquifères des moraines sont pérennes et stabilisées depuis longtemps. De plus, les calcaires sous-jacents sont relativement peu karstifiés en surface, car ils ont été recouverts et érodés par les glaciers, puis directement recouverts de moraines. Les cavités pré-existantes dans les calcaires ont été pour la plupart comblées de sédiments par les glaciers, sauf quelques sources où l'eau a depuis longtemps trouvé son chemin et formé des vallons. Les Bons de Bière s'apparentent clairement à des effondrements liés à cette situation.

A4 Facteur F4 : Facteurs artificiels

Infiltration

Toute infiltration artificielle dans la couverture meuble, s'ajoutant aux infiltrations naturelles, est susceptible de créer des instabilités (voir le point « Eau naturelle, infiltration »). Un doublement du taux d'infiltration maximal par rapport aux conditions naturelles représente probablement un facteur aggravant significatif. Une augmentation du taux d'infiltration naturel d'un facteur 10 produira très vraisemblablement des effondrements dans un rayon de 50 mètres autour du point d'infiltration dans les mois qui suivent sa mise en service. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de valeur de pondération pour le facteur artificiel infiltration.

Facteurs artificiels			
Type d'objet	Surface étanchée	Surface concernée par l'infiltration	Valeur
Chalet	Toit avec évacuation plus loin (> 30 m)	Vaste parcelle autour du chalet	1*
Chalet	Toit avec récupération d'eau (citerne)	Débordement éventuel de la citerne...	0.8
Chalet	Toit sans récupération d'eau	Autour du chalet	2
Maison avec places de parc et jardin	Toit, places de parc et route d'accès	Jardin	2
Usine avec parking pour employés	Usine et parking	Pourtour : jardin, plates-bandes	3
Supermarché avec grand parking	Supermarché et parking	Pourtour ou infiltration ponctuelle	4
Route asphaltée	Surface de la route	Infiltration sur bas côté	2 à 4
Eolienne	Surface du socle (assise)	Infiltration autour du socle	2
Eolienne	Surface du socle (assise)	Infiltration plus loin > 50 à 100 m	1*
Terrain de sport avec infiltration diffuse	Presque aucune	Tout le terrain	1
Terrain étanche (p. ex. stade avec gazon artificiel)	Surface du terrain (importante dans le cas d'un stade)	Autour du stade	4++

*valeur de 4 dans la zone d'infiltration

Tableau présentant des valeurs pour le facteur artificiel infiltration ($\text{inf. naturelle} = 1$, $>\text{inf. nat.} \times 2 = 4$, $<\text{inf. nat.} / 2 = 0.8$).

L'infiltration d'eau en région karstique est cependant envisageable, moyennant d'infiltérer directement dans le rocher et d'assurer que la charge hydraulique (niveau d'eau) au point d'infiltration dans le substratum ne remonte jamais dans la couverture meuble. Si nécessaire, la

filtration des eaux avant infiltration à travers une couche de sol doit se faire dans un système séparé, avec récupération des eaux filtrées qui seront infiltrées directement dans le substratum rocheux.

Dans le cas d'une infiltration artificielle existante, il faut en évaluer la fréquence d'activité et le débit infiltré, la position par rapport au substratum, à la couverture et aux infrastructures voisines.

Certaines zones d'infiltrations artificielles ne sont pas vraiment explicites : bords de routes secondaires, eaux de toits, périphérie de surface étanches (parkings)... Elles sont souvent proches d'infrastructures qu'elles menacent donc assez directement.

Nappe

Les conditions décrites sous « Eau naturelle, nappe » fixent le contexte et les mécanismes à prendre en compte. Cependant les activités humaines, principalement des pompes, mais parfois des infiltrations ou étanchéifications peuvent modifier le niveau d'eau et les flux dans la nappe aquifère. La subrosion de la couverture meuble ou des roches semi-karstiques peut alors être notablement accélérée et provoquer des effondrements. L'abaissement de la nappe dans un milieu non ou peu consolidé peut aussi provoquer des tassements.

En plus des investigations décrites sous « Eau naturelle, nappe » il convient de caractériser précisément les flux extraits/injectés et leur effet sur la nappe souterraine. Chaque modification du régime est susceptible d'entraîner des effondrements. Les exploitants ne sont souvent pas conscients de ces effets.

Surcharge

La stabilité d'une cavité souterraine résulte d'un équilibre entre la gravité qui tend à faire tomber la voûte au fond de la cavité et la résistance mécanique de la roche. Dans un set de conditions données, une cavité en roche semi-consolidée peut rester ouverte de manière quasi stable moyennant trois conditions :

- 1) aucun processus (p.ex. subrosion) n'agrandit le vide ;
- 2) aucun processus ne diminue la résistance de la couverture (p.ex. percement ou saturation en eau) ;
- 3) aucun phénomène n'augmente la charge mécanique sur la voûte. Une surcharge peut être temporaire (p.ex. passage d'un véhicule) ou permanente (p.ex. construction d'une maison).

La charge naturelle s'estime en multipliant l'épaisseur de la couverture par la masse volumique que l'on admettra par défaut équivalente à 2.5 t/m³.

De manière générale, on évitera d'augmenter la charge au-delà du doublement de la charge naturelle, mais cette règle approximative peut être adaptée en fonction de la connaissance plus ou moins précise des paramètres géotechniques de la couverture.

Les investigations viseront donc essentiellement à savoir si la surface du sol a été modifiée par des remblais ou déblais, quand et dans quelle proportion. Elles évalueront aussi le danger représenté par le passage d'un véhicule (p.ex. d'un tracteur ou d'une vache), qui peut parfaitement déclencher un effondrement (il existe plusieurs cas documentés). Dans le cadre d'un projet de construction, elles prendront en compte les activités liées au chantier ainsi que la surcharge induite par la construction elle-même.

Pour évaluer la situation existante, des sondages, forages et éventuellement de la géophysique peuvent être utiles. Des recherches dans les archives peuvent judicieusement compléter l'analyse. Pour les surcharges futures (temporaires ou permanentes), il s'agira d'établir un catalogue indiquant les charges et fréquences envisageables sur le site.

De manière générale, chaque site présentant un danger d'effondrement pourrait être investigué avec des moyens très importants. De même, les mesures préventives peuvent s'avérer très coûteuses. Il subsistera très souvent un danger résiduel. Un principe de proportionnalité doit être

appliqué et peut être discuté avec les instances cantonales. Ceci est important car on recommandera plus ou moins d'investigations et de mesures selon où l'on place le curseur...

Influence de la surcharge sur les alentours :

L'influence de la surcharge sur les alentours se fait sentir dans un rayon considéré généralement à $1.5 \times h$ la hauteur de la couverture meuble ou 30° de pente depuis les bords de la surcharge. Cette règle aura de l'importance en cas de construction d'un quartier d'immeubles par exemple, afin de laisser suffisamment d'espace entre chacun d'eux.

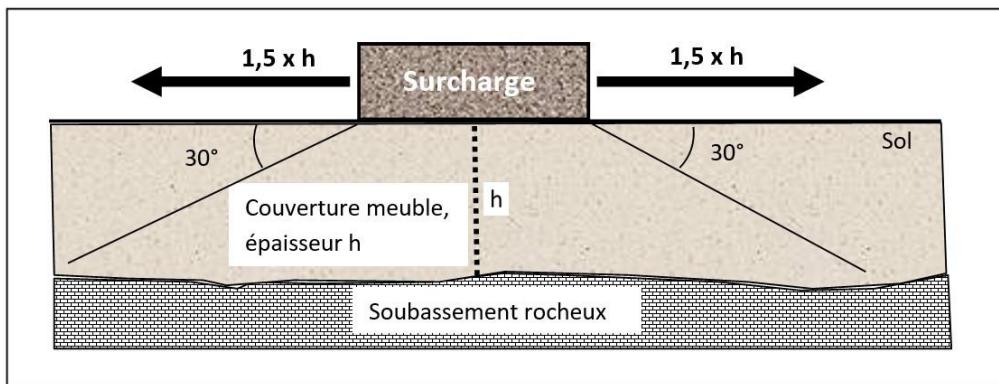


Schéma de la règle des $1.5 \times h$ la hauteur h du terrain meuble ou 30° de pente comme rayon d'influence de la surcharge.

Exemples d'application de l'évaluation

Treize exemples d'application sont présentés ci-après (9 exemples "ISSKA" et 4 exemples "UDN"), ainsi que 23 exemples simplifiées en fin d'annexe. Ces exemples se basent sur les principes des figures 5, 6 et 7 du Cahier 2 et les calculs tels que présentés dans les tableaux 1 à 11. La figure B1 donne un aperçu général de l'approche.

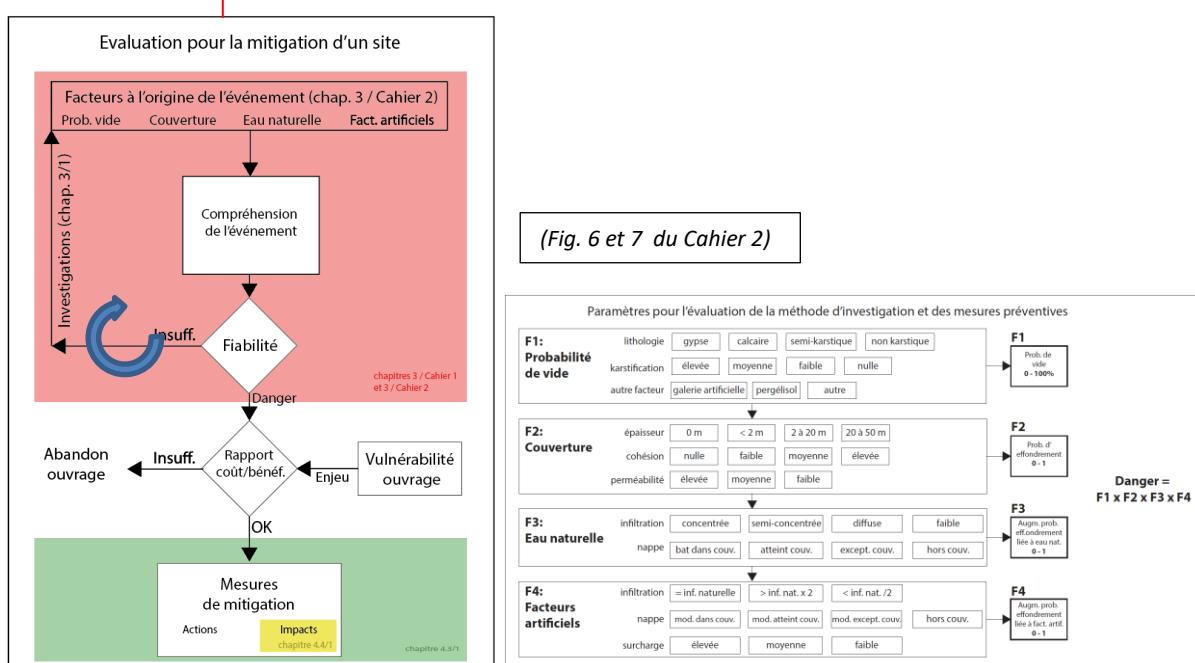
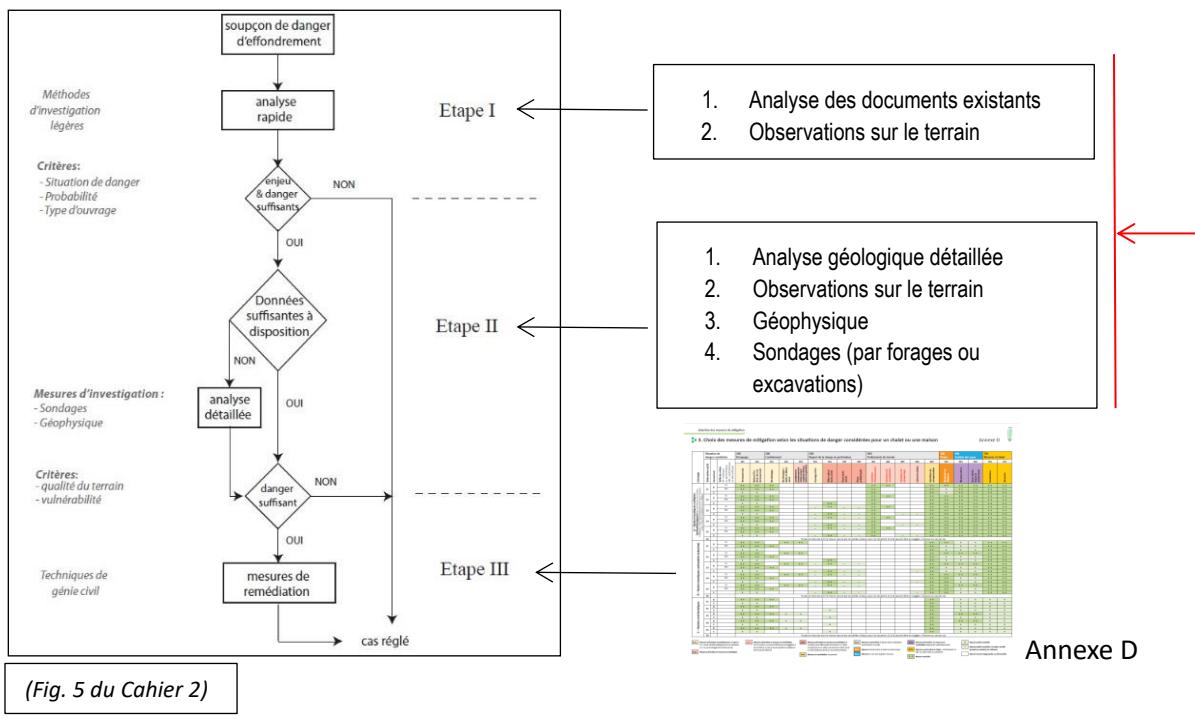


Schéma général de l'approche de l'évaluation préventive d'un site karstique.

Les exemples d'application présentés

No	Type d'objet	Contexte géologique	Lieu	Remarque	Nombre de points	Dangerosité
ISSKA1	Chalet	Champ de dolines dans le gypse	Région de Chesières	Exemple fictif	231	élevée
ISSKA2	Terrain de sport	Sur des couches de gypse	Région de Bex	Exemple fictif	115	élevée
ISSKA3	Eoliennes	Calcaire du Malm	Crête du Jura	Exemple fictif	26	modérée
ISSKA4	Chalet d'alpage	Calcaires crétacés	Région Marchairuz	Inspiré d'un cas réel	82	moyenne
ISSKA5	Secteur qui s'affaisse avec dégâts	Terrains meubles épais sur du calcaire	La Côte	Exemple fictif	125	élevée
ISSKA6	Route qui s'affaisse avec dégâts	Sur du gypse	Huémoz (Ollon)	Cas réel	660	très élevée
ISSKA7	Grotte qui s'affaisse avec déchets dangereux	Dans le gypse	Ollon	Cas fictif sur objet réel	39	modérée
ISSKA8	Route qui s'affaisse en milieu urbain	Marne (semi-karstique)	Saint-Cergue	Cas réel	880	très élevée
ISSKA9	Effondrement dans un pâturage	Calcaires	Mollendruz	Cas réel	20 à 68	modérée à moyenne
UDN 1	Villa avec véranda	Marno-calcaire	Sainte-Croix	Inspiré d'un cas réel	858	très élevée
UDN 2	Construction d'une centrale hydro-électrique	Gypse, anhydrites et quaternaire	Bex	Inspiré d'un cas réel	96	moyenne
UDN 3	Projet de villa de 2 étages et sous-sol	Corniéules, dolomies et brèches calcaires	Villeneuve	Exemple fictif	47	modérée
UDN 4	Projet d'un chalet de 3 étages et sous-sol	Calcaires, gypses et anhydrites	Gryon	Exemple fictif	176	élevée

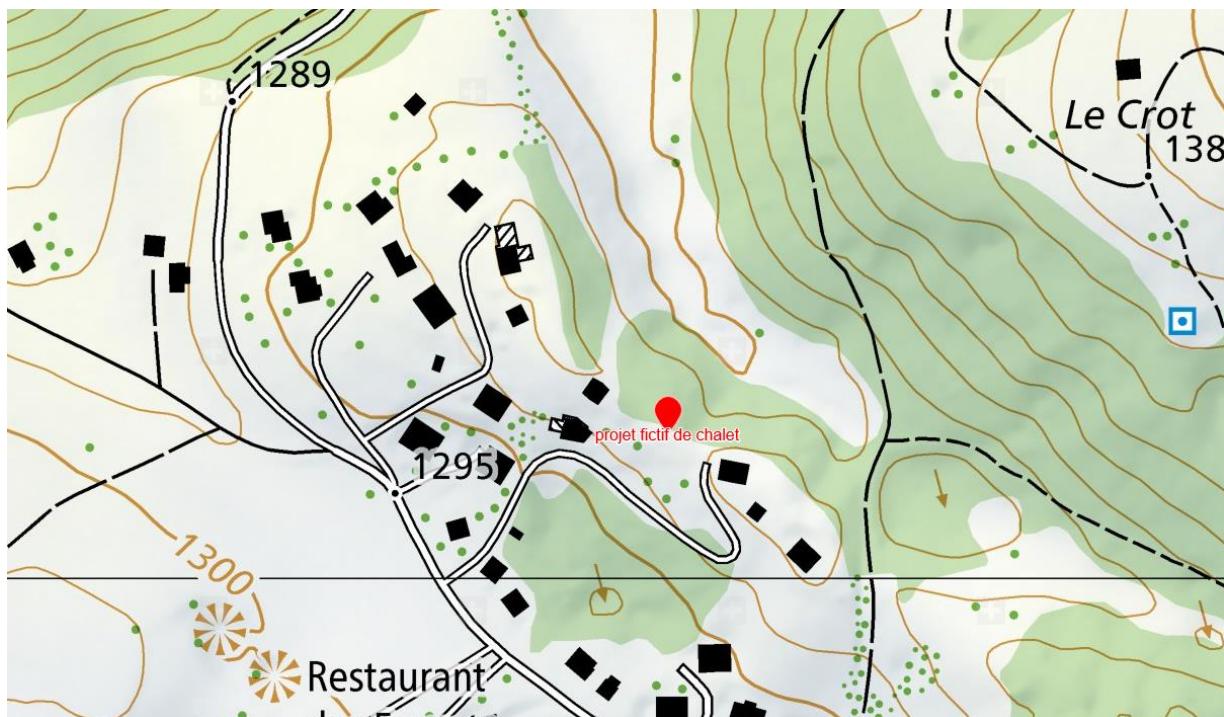
Présentation des neuf exemples d'application "ISSKA"

Exemple d'application ISSKA 1 : construction de chalet sur du gypse

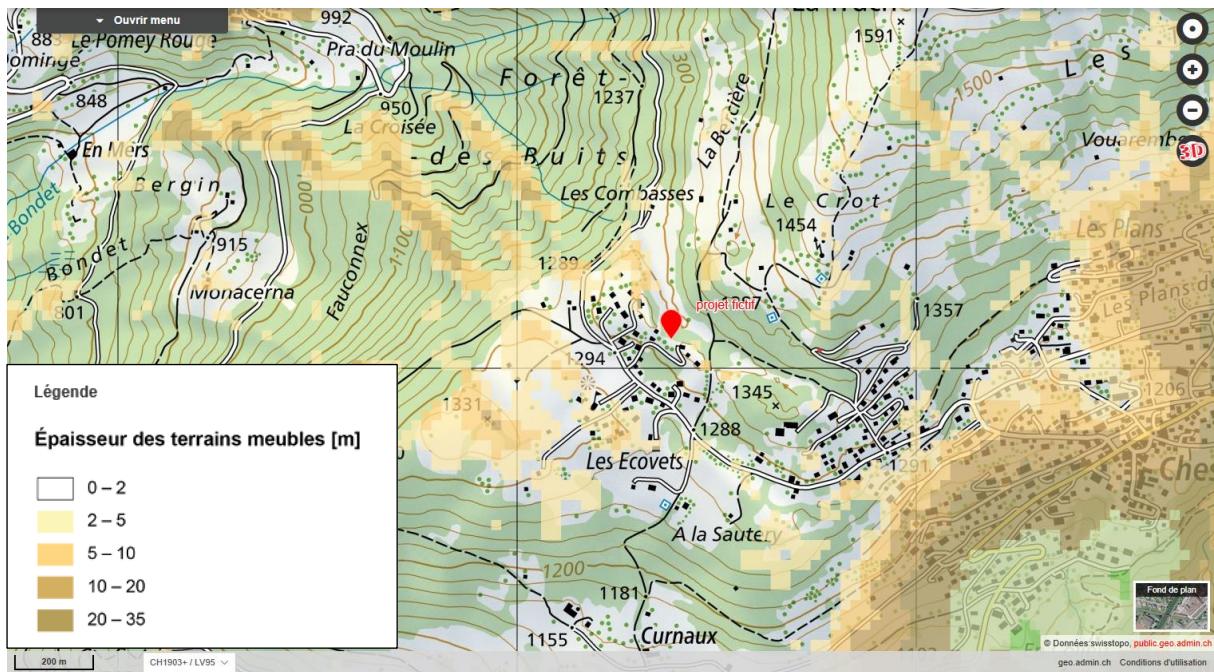
Région de Chesières, au-dessus d'Ollon

On imagine la construction d'un chalet de taille standard dans un quartier où des chalets sont déjà présents. Le projet se trouve sur une zone gypseuse, mais pas sur un alignement de dolines.

Etape I. Analyse rapide

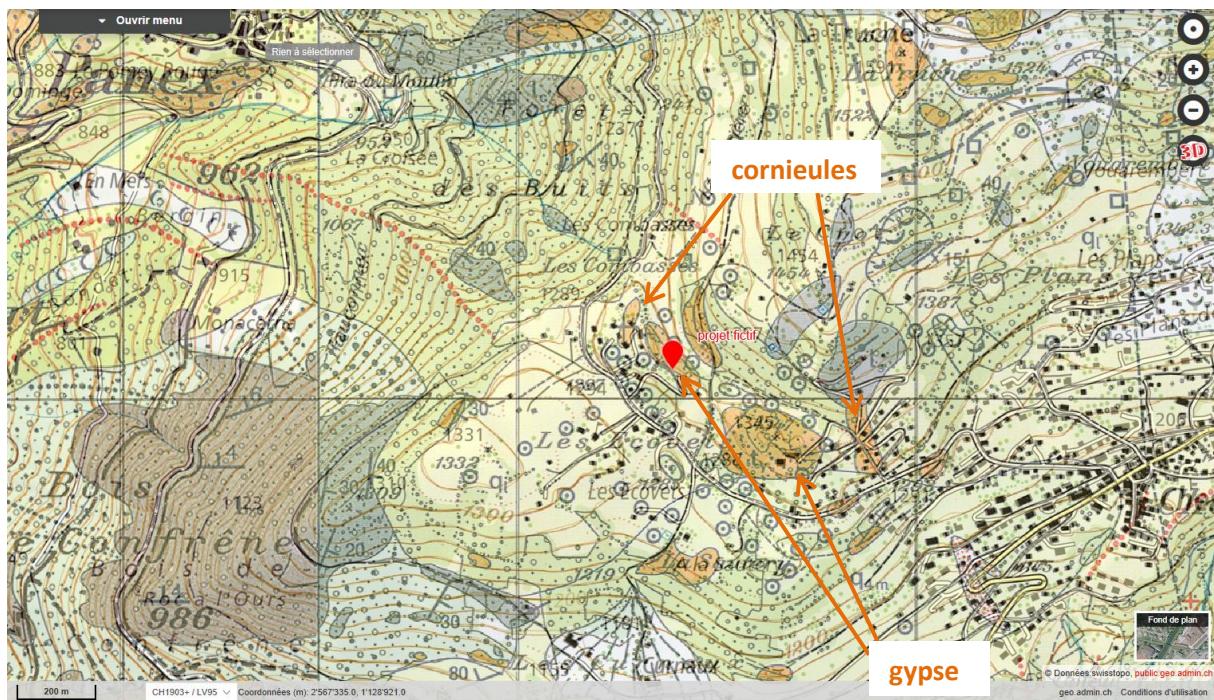


Projet fictif de chalet dans un quartier déjà construit.

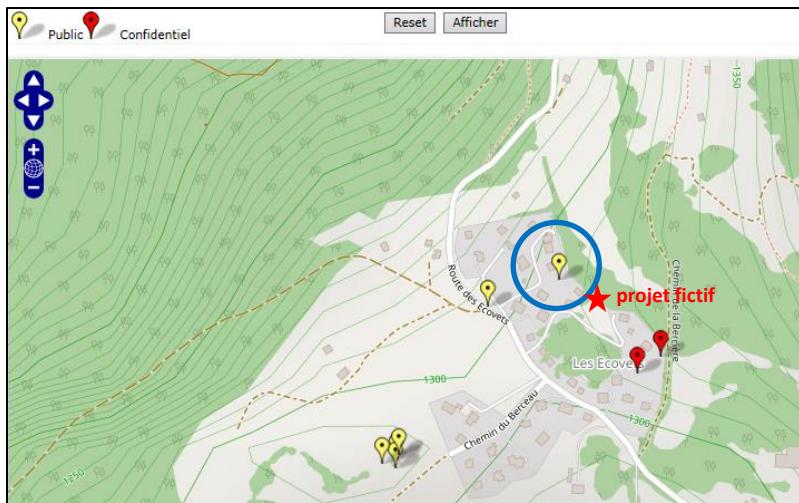


La couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meubles > 2 m (en chamoisé). Carte reprise de www.map.geo.admin.ch.

Les affleurements de gypse correspondent aux zones où l'épaisseur des terrains meubles est inférieure à 2 m.



Extrait de la carte géologique, reprise de www.map.geo.admin.ch.



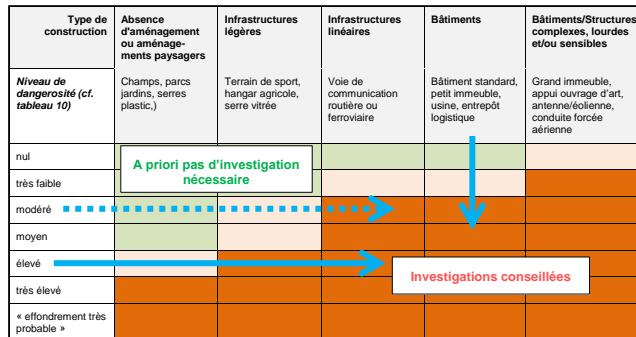
Extrait du site www.geocad1.vd.ch.

Le site [geocad1.vd.ch](http://www.geocad1.vd.ch) indique quatre forages à proximité. Deux sont confidentiels et deux publics. Le forage entouré d'un cercle bleu contient des cornieules et dolomies dès 1.2 m de profondeur, et des sables limoneux de 0 à 0.8 m suivi de gravier sablo-limoneux de 0.8 à 1.2 m.

F1, probabilité de vide : (cf. Tableaux 2 et 3)	lithologie : gypse (nappe de Bex) 30 pts karstification : moyenne 5 pts autre facteur : non total F1 : $30 \times 5 = 150$ (limité à : 100 pts)
F2, couverture : (cf. Tableaux 4 et 5)	< 2 m (cf. map. geo.admin.ch : " <i>Epaisseur des terrains meubles</i> ") 0.7 pts compacité : moyenne 0.5 pt perméabilité : moyenne 1 pt total F2 : $0.7 \times 0.5 \times 1 =$ 0.35 pt
F3, eau naturelle : (cf. Tableaux 6 et 7)	infiltration : semi-concentrée 1.1 pt nappe : hors couverture 1 pt total F3 : $1.1 \times 1 =$ 1.1 pt
F4, facteurs artificiels : (cf. Tableaux 8 et 9)	infiltration = inf. naturelle x 2 4 pts (<i>eau du toit, on postule qu'elle ne peut pas être évacuée plus loin</i>) nappe : hors couv. 1 pt surcharge : moyenne 1.5 pt (<i>on postule que le chalet fait moins de deux étages</i>) total F4 : $4 \times 1 \times 1.5 =$ 6 pts
Total général : F1 x F2 x F3 x F4	100 x 0.35 x 1.1 x 6 = 231 pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	→ élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *Tableau 10* du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité élevée** ».



Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Variante (pointillé bleu) : si l'on postule que l'eau du toit est évacuée à bonne distance du chalet (infiltration diffuse = 1 pt ; infiltration = inf. naturelle /2 = 0.8 pt), l'on obtient un total de $100 \times 0.35 \times 1 \times 1.2 = 42$ pts, soit une « **dangerosité modérée** ».

Ce cas fictif de construction d'un chalet de taille standard sur du gypse, avec ses deux variantes pour l'évacuation de l'eau du toit, montre que dans les deux cas, une investigation plus poussée doit être menée.

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3 du Cahier 1.

Les méthodes d'investigation vont être du même type pour les deux variantes, avec une investigation peut-être plus légère pour la variante avec évacuation de l'eau. Ces méthodes seront proposées par un bureau spécialisé (ingénieurs, géologues...).

Nous préconisons ici de faire des **fouilles** à la pelle rétro pour autant que les terrains meubles ne fassent pas plus de 3 m d'épais (plus profondément, les fouilles deviennent difficiles à réaliser). Elles permettent de faire des observations directes de la couverture et du toit du rocher. Selon les cas

(p.ex. si la couverture est plus épaisse que 3 mètres) et selon l'importance de l'objet à construire, une méthode géophysique et/ou des forages peuvent être préconisés.

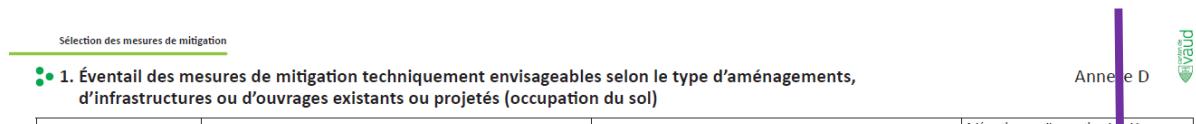
Imaginons que l'analyse détaillée indique la présence d'un surcreusement plurimétrique de type doline sous un sol d'une épaisseur de couverture inférieure à 2 m, située dans l'emprise du projet de chalet.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple du chalet dans le gypse

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol.

Avec le chalet dans le gypse, nous sommes dans la situation d'infrastructure D, « Bâtiments ». Nous entrons verticalement dans la colonne D (flèche).



Sélection des mesures de mitigation

• 1. Éventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol *				
			A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâtiments	E Spéciales
100 Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête					
	102 Relèvement d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre					
200 Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé)	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	202 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au fond du sous-sol karstique	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités recoupées par les ouvertures					
	203 Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravette), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre intérieure d'injections d'épanchement ou de consolidation (voir ci-dessus) est envisageable					
300 Report de la charge en profondeur – sur le sous-sol rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	302 Micropièces forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas visible en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités recoupées par les micropièces					
	303 Pleins forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas visible en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités recoupées par les pleins					
	304 Pleins préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tube	Attention – en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un bâton). Attention également au risque de flambage en fonction du rapport entre le diamètre des pieux et la hauteur des cavités recoupées par les pieux					
400 Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + fibres) ou de coulis minéraux (ciment, micracement + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'épanchement (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de la porosité – vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limoneuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					
	402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains) ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration))	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limoneuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					
	403 Injections de compactage verticales ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts					
	404 Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (sableuse à argileuse)					
	405 Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâtiment existant suivi à des tassements différenciels d'amplitude limitée (exemple société Uretel)					
500 Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du sous-sol rocheux (gypse, anhydrite, cornéite)	501 Si risque de dégradation de la stabilité du sous-sol rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation jusqu'au démontage si possible et trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur	Mise en œuvre de raccordements souples et visibles aux interfaces terrain/bâti					
	600 Gestion des eaux	601 Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Collecte des eaux météoriques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque				
602 Gestion des eaux météoriques et souterraines		Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté					
700 Mesures à l'objet	701 Fondations du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					
	702 Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					

*** Adéquation avec l'occupation du sol**

Type d'aménagements, d'infrastructures et d'ouvrages	Occupation du sol	Exemples	Appréciations
A sans	Absence d'aménagement ou aménagements payagers	Champs, parcs, jardins, serres plastiques	Meilleure appropriée
B légères	Infrastructures légères	Terrains de sport, hangars agricoles, zones vitrées	Meilleure appropriée si elle perturbe et de faible ampleur
C linéaires	Infrastructures linéaires	Voies de communication routières ou ferroviaires	Meilleure appropriée si elle perturbe et de faible ampleur et/ou la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance
D bâtiments	Bâtiments standards	Offices, villes, petits immeubles, usines, entrepôts logistiques	Meilleure inappropriée
E spéciales	Infrastructures spéciales (complexes, lourdes, de grande hauteur et/ou sensibles)	Dimensions immobilières, appuis d'ouvrage d'art, antennes, éoliennes, conduites fortes et serrées	Sécurisation du pérимètre dangereux et abandon de l'ouvrage existant ou de l'objet projeté à envisager

Annotations:

- Num. Mesures préventives essentiellement (mitigation d'un risque identifié préalablement à la réalisation d'un nouveau aménagement/infrastructure)
- Num. Mesures préventives et mesures de remédiation
- Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont la mise en œuvre est difficilement envisageable si elles ne peuvent pas être mises en œuvre en termes de permis ou de coûts
- Num. Mesures préventives et mesures de remédiation (à condition que le bâti existant soit fondé sur un rocher monolithique et en creant une centrale en béton armé si le bâti existant est fondé sur des pierres flottantes)

Annotations:

- ① Report. Coût des mesures / valeur du bien à protéger ou à construire disproportionné
- ② Report. Coût des mesures / valeur du bien à protéger ou à construire disproportionné
- ③ Peu d'intérêt à faire en fonction de la valeur du bien à protéger
- ④ Cas peu probable car ces infrastructures spéciales sont généralement toutes en préfabriqué / Déplacement de l'ouvrage éventuellement à envisager

Dans le cas précis, s'agissant d'un chalet, les mesures 101 et 102, 203, 601 et 602, 701 et 702, mais aussi 302, 303, 304, éventuellement 401 à 404 peuvent être envisageables. La mesure 201 est inappropriée, s'agissant de gypse.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A Roches karstiques sulfatées

- dans la situation de danger S3
- dans le cas de couverture R (CM)

Sélection des mesures de mitigation

3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Annexe D 

Littérature	Situation de danger considérée	100 Décapage		200 Comblement		300 Report de la charge en profondeur				400 Traitements de terrain				500 Projet		600 Gestion des eaux		700 Mesures à l'objet	
		Tableau de 100 (D)		Tableau de 200		Tableau de 300		Tableau de 400		Tableau de 500		Tableau de 600		Tableau de 700		Tableau de 700			
		Couverture	Taille des roches	Réaménagement	Recouvrement	Hauteur et épaisseur du remblai en béton armé	Conduite d'émissaire	Épaisseur avec émissaire (épaisseur égale ou gravière)	Charge d'art	Micro-pile	Micro-fissure	Haute teneur en eaux souterraines	Filtre préfiltration	Injections de compensation	Meilleure ou meilleure alternative	Radier ou structure	Évacuation et collecte	Haute sécurité et souterraines	Radier ou structure
A - Butées karstiques calcaires (calcaires)	S1	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S2	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S3	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S4	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S5	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S6	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
		Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S6 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																	
B - Butées karstiques carbonatées (calcaires)	S1	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S2	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S3	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S4	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S5	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S6	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
		Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S6 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																	
C - Butées semi-karstiques	S1	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S2	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S3	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S4	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S5	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
	S6	R M CM	++ ++ +	++ ++ +	++ ++ +					++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++	++ ++ ++		
		Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S6 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																	
		<small>Num. Mesures préventives essentiellement (réception d'un risque identifié précisément à la réalisation d'un projet et/ou réglementaire) et/ou mesures préventives et/ou mesures de remédiation</small>	<small>Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont la mise en œuvre est difficilement envisageable si la situation de danger n'est pas rencontrée ou si les conditions de réalisation ne sont pas rencontrées en termes de perméabilité</small>	<small>Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont la mise en œuvre est tout à fait envisageable si la situation de danger n'est pas rencontrée ou si les conditions de réalisation ne sont pas rencontrées en termes de perméabilité</small>	<small>Num. Mesures constructives à réaliser avant la réalisation (construction) du projet</small>	<small>Num. Mesures préventives ou mesures de remédiation à appliquer systématiquement</small>	<small>Num. Mesures à prendre dans le cadre du lancement du projet</small>	<small>Num. Mesures constructives à réaliser – renforcement du sol</small>	<small>Num. Mesures en lien avec la gestion des eaux</small>	<small>Num. Mesure à priori inappropriée ou déconseillée</small>	<small>+</small>	<small>=</small>	<small>+</small>	<small>+</small>	<small>+</small>	<small>+</small>	<small>+</small>	<small>+</small>	

Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

Nous partons du principe dans cet exemple que l'implantation du chalet ne peut pas être modifiée. La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 101 et 102 : décapage pour reconnaissance
- 201 : remblayage avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé)
- 401 : injections d'étanchement (si envisageables vis-à-vis de la protection des eaux souterraines)
- 405 : Injections de compensation (méthode réservée à des objets existants; non pertinent dans le cas présent)
- 500 : renoncer à la réalisation ou déplacer
- 601 et 602 gestion des eaux : raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque
- 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé

Ces méthodes peuvent se compléter l'une l'autre mais aussi s'exclure (cf. mesure 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle !

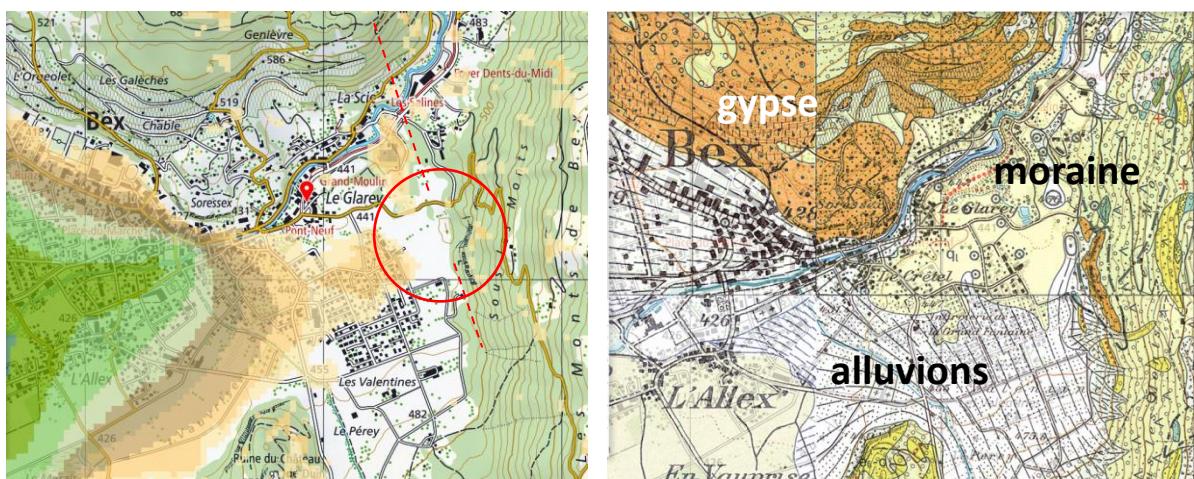
Exemple d'application ISSKA 2 : terrain de sport sur du gypse

Région du Glarey (Bex)

Ce site de Glarey est analysé dans Parriaux *et al.* 2003 (GEOLEP) qui concluait à une : « prédisposition forte » aux effondrements et affaissements.

Cas fictif : On imagine ici à l'est de Bex un projet de type terrain de sport sur des surfaces non construites avec un affaissement de dolines nord-sud apparent (cartes ci-dessous)

Etape I. Analyse rapide



Site de Glarey (région à l'est de Bex). A gauche : topo, et épaisseur terrains meubles. Rond rouge : situation du projet, en traitillé : alignement de dolines. A droite, la carte géologique. Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch.

Le site geocad1.vd.ch donne quatre forages de 8 à 20 mètres plus à l'ouest du site qui nous intéresse. Aucun ne recoupe du gypse.

Nous allons faire un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport. Ce calcul peut être fait soit par un(e) géologue, soit par une personne ayant de bonnes connaissances de base de géologie ou de géographie physique (scientifique, ingénieur, responsable en génie civil, autodidacte éclairé...).

Reprendons selon le principe de la fig. 5 le tableau de la fig. 6 pour arriver à un « premier » résultat qui donnera le niveau de danger (nul à très élevé) selon le Tableau 11 du rapport.

F1, probabilité de vide :	lithologie : gypse	30 pts
(cf. Tableaux 2 et 3)	karstification : moyenne	5 pts
	autre facteur : non	
	total F1 : $30 \times 5 = 150$	(max. =) 100 pts

F2, couverture :
(cf. Tableaux 4 et 5)

< 2 m (cf. map. geo.admin.ch : "Epaisseur des terrains meubles")	0.7 pts
compacité : faible	1 pt
perméabilité : moyenne	1 pt
total F2 : $0.7 \times 1 \times 1 =$	0.7 pt

F3, eau naturelle :
(cf. Tableaux 6 et 7)

infiltration : semi-concentrée	1.1 pt
nappe : hors couverture	1 pt
total F3 : $1.1 \times 1 =$	1.1 pt

F4, facteurs artificiels :
(cf. Tableaux 8 et 9)

dans le cas présent, ce sont des facteurs artificiels futurs liés au projet, pas de facteurs artificiels déjà présents, le terrain est vierge et non bâti.

infiltration : = inf. naturelle	1 pt
(si arrosage artificiel : augmenter ce coefficient)	
nappe : atteint la couverture de manière exceptionnelle	
(après modif. atteint except. couv.)	1.5 pt
surcharge : faible	1 pt
total F4 : $1 \times 1.5 \times 1 =$	1.5 pt

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 = 100 \times 0.7 \times 1.1 \times 1.5 = \underline{\underline{115 \text{ pts}}}$

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	→ élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le Tableau 10 du rapport (ci-dessus) → « dangerosité élevée ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
<i>Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)</i>	Champs, parcs jardins, serres plastique	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé					
très élevé					
« effondrement très probable »				Investigations conseillées	

Ensuite, le Tableau 11 du rapport (ci-dessus) détermine qu'une investigation plus poussée est fortement recommandée (voire imposée par le canton). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3 du Cahier 1.

Les méthodes d'investigation vont être du même type pour les deux variantes, avec une investigation peut-être plus légère pour la variante avec évacuation de l'eau. Ces méthodes seront proposées par un bureau spécialisé (ingénieurs, géologues...).

Nous préconisons ici des méthodes telles que **sondages à la tarière** pour approcher l'épaisseur du terrain meuble. Il sera cependant souvent plus efficace de faire des **fouilles à la pelle rétro** pour autant que les terrains meubles ne fassent pas plus de 3 m d'épais (plus profondément, les fouilles deviennent difficiles à réaliser). L'avantage est que les observations sont moins locales, plus directes et concernent souvent aussi le toit du rocher. Si la surface concernée est grande, des mesures géophysiques peuvent compléter voire remplacer les fouilles.

Imaginons que l'évaluation préventive 2 indique la présence d'un alignement de dolines plurimétriques sous un sol d'une épaisseur inférieure à 2 m dans l'emprise du projet.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple du terrain de sport sur du gypse

La sélection des **dispositions constructives** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Dans le cas précis, s'agissant d'un terrain de sport (1^{er} tableau, Méthodes et mesures de mitigation : Infrastructures légères -> colonne B), les mesures 100, 300, 400, 700 sont jugées inadéquates, tandis que les 201, 202, 500, 601 et 602 peuvent être retenues.

Nous entrons ensuite horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A Roches karstiques sulfatées
- dans la situation de danger S5
- dans le cas de couverture C

La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 101 et 102 : décapage des terrains de couverture et relevé d'indices
- 201 : remblayage dépression selon principe du filtre inversé
- 202 : dans une certaine mesure si la valeur du terrain de sport justifie la mise en œuvre d'une dalle en béton armé en fond de filtre
- 500 : renoncer à la réalisation, car pas de garantie à long terme
- 601 : uniquement en présence de réseaux d'alimentation existants et 602 si le projet de terrain de sport comprend la réalisation de bâtiments (vestiaires, etc.)
- 602 : gestion des eaux de surface, toutes les autres mesures apparaissent comme inadaptées dans le cadre de la réalisation d'un terrain de sport de grande surface

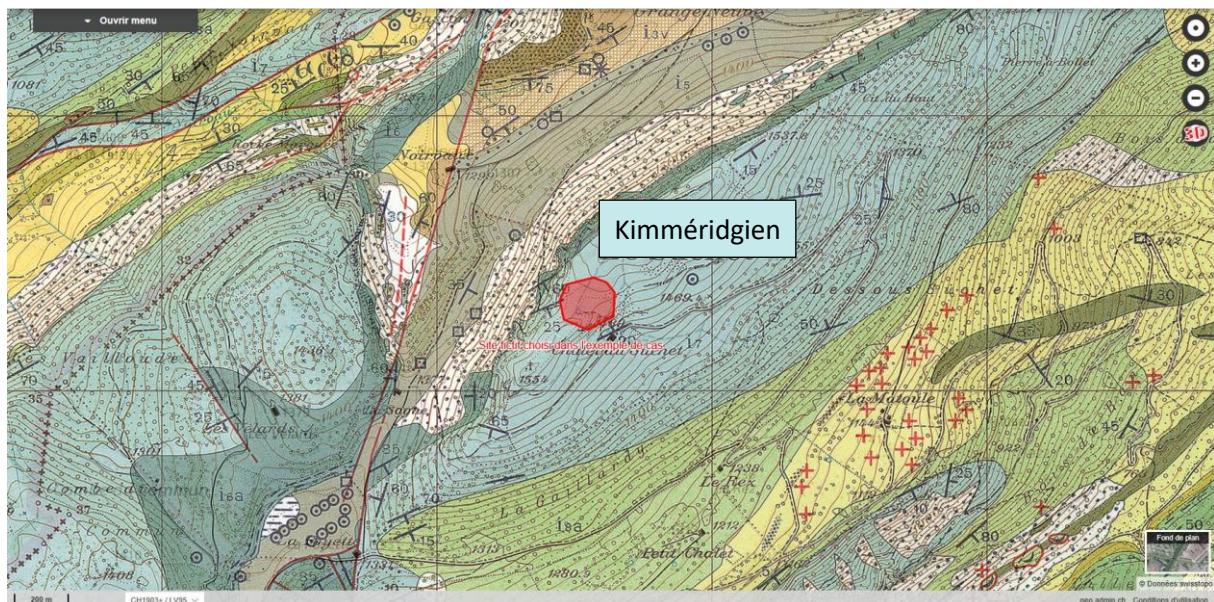
Ces méthodes peuvent se compléter l'une l'autre mais aussi s'exclure (cf. mesures 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle !

Exemple d'application ISSKA 3 : éolienne sur du calcaire

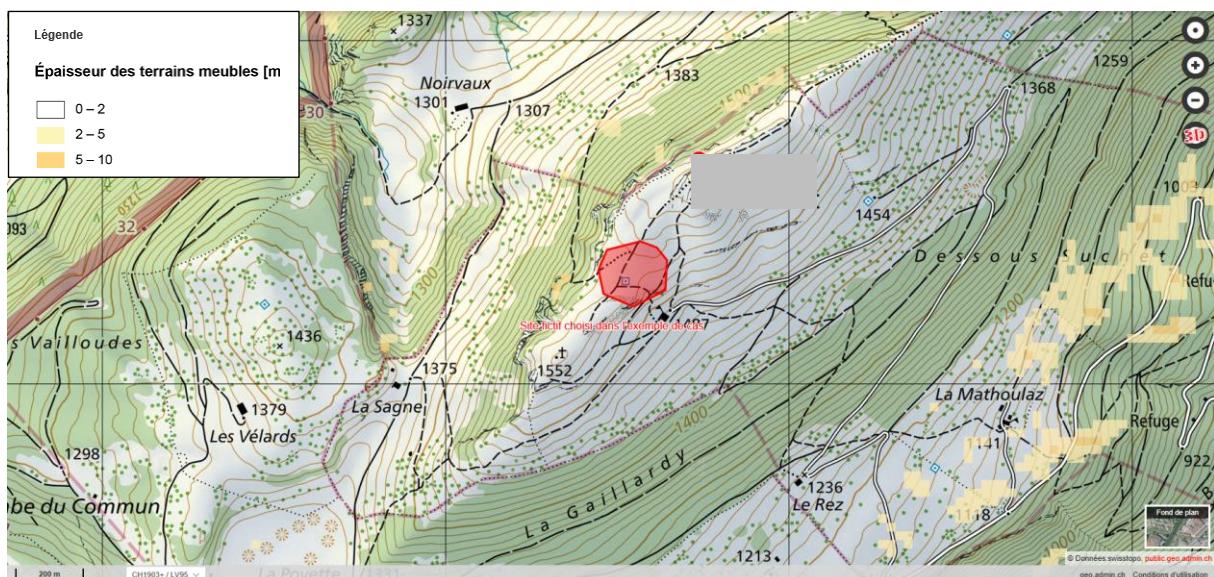
Jura vaudois

Cas fictif pris sur la crête du Jura vaudois : On imagine la construction d'une éolienne de taille standard (200 m de hauteur) sur une crête du Jura vaudois. Le site illustré dans cet exemple n'est situé ni dans un projet existant de parc éolien ni dans un Parc naturel.

Etape I. Analyse rapide



Site sur une crête du Jura vaudois, avec la carte géologique. L'ovale rouge représente l'emplacement supposé de l'éolienne. Carte reprise de www.map.geo.admin.ch.



La couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meuble > 2 m (en chamoisé). Carte reprise de www.map.geo.admin.ch.

Nous faisons un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport (calcul fait par un(e) géologue ou une personne extérieure à la profession et ayant de bonnes connaissances de base).

Le site geocad1.vd.ch ne contient aucune indication pour tout le secteur de crête qui nous préoccupe.

F1, probabilité de vide :	lithologie : calcaire kimméridgien 10 pts karstification : assez élevée 8 pts autre facteur : non total F1 : $10 \times 8 =$	80 pts
F2, couverture :	La couverture sera complètement décapée à l'emplacement du socle de l'éolienne. L'épaisseur de sol est donc égale à zéro épaisseur = 0 m 0.1 pt compacité ----- perméabilité ----- total F2 : =	0.1 pt
F3, eau naturelle :	infiltration : diffuse 1 pt nappe : hors couverture 1 pt total F3 : $1 \times 1 =$	1 pt
F4, facteurs artificiels :	La présence du socle de l'éolienne va modifier localement l'infiltration : < inf. naturelle / 2 0.8 pt nappe : hors couverture 1 pt surcharge : très élevée (on décide ici de doubler la valeur de 2 pts) 4 pts (au lieu de 2) total F4 : $0.8 \times 1 \times 4 =$	3.2 pts

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 =$ **80 x 0.1 x 1 x 4 = 25.6 pts**

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	>99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	>99%
100 à 500	élévé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	<2%

Selon le tableau 10 du rapport → « dangerosité modérée ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)	Champs, parcs jardins, serres plastique	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élévé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, une investigation plus poussée est fortement recommandée.
→ Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant de réaliser l'Etape II.

Ce cas fictif montre que dans le cas de la construction d'une éolienne standard sur des calcaires, une investigation plus poussée doit être menée.

Le danger principal est ici la présence d'une roche instable, soit très altérée, soit contenant une cavité à faible profondeur sous la surface. De plus, dans le cas d'une éolienne, le socle de fondation doit non seulement reprendre des efforts verticaux mais également des efforts horizontaux (renversement) qui peuvent être prépondérants).

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3 du Cahier 1.

La méthode la plus fiable pour s'assurer de l'absence de cavité cachée serait d'effectuer une série de forages de 7 à 10 m de profond. Les forages peuvent être carottés ou investigués au televueur. La densité de forages devrait être de l'ordre de 1 forage tous les 3 à 5 m. Si cette investigation est trop coûteuse, il est possible de la combiner avec de la géophysique (géoradar). Le nombre de forages peut être réduit, mais les profils géoradar doivent être suffisamment nombreux et opéré dans deux directions perpendiculaires. Le but est d'obtenir une image 3D des 8 premiers mètres sous la surface dans le périmètre du socle de l'éolienne. L'investigation de la couverture n'a pas d'intérêt puisqu'elle sera en principe entièrement retirée.

Imaginons que l'analyse détaillée indique la présence d'une doline plurimétrique cachée sous la couverture du côté est de l'emprise et d'une cavité significative du côté ouest.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de l'éolienne sur du calcaire

La sélection des **dispositions constructives** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Dans le cas précis, s'agissant d'une infrastructure complexe (1^{er} tableau, Méthodes et mesures de mitigation : Infrastructures spéciales -> colonne E), la mesure 202 est jugée inadéquate, tandis que les autres sont à discuter en rapport avec la complexité de l'ouvrage (poids et hauteur importants).

Nous entrons ensuite horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie B Roches karstiques calcaires
- dans la situation de danger S3
- dans le cas de couverture R (M)

La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 101, 102 : décapage du sol (terre végétale) pour dégager le toit du rocher
- 203 : comblement des cavités sous-jacentes avec un matériaux filtrant
- 303 et 304 : pieux forés ou préfabriqués (= mesures géotechniques lourdes)

- 500 : Renoncer à l'ouvrage ou le déplacer.
- 601 et 602 gestion des eaux : Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque
- 701 et 702 : radier monolithique et structures porteuses en béton armé (dans le cas d'un projet d'éolienne, plutôt sous la forme d'un massif en béton armé plutôt que d'un simple radier)

Ces méthodes peuvent se compléter l'une l'autre mais aussi s'exclure (cf. mesure 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle !

Dans le cas précis, la méthode la plus pragmatique serait de déplacer l'ouvrage de quelques dizaines de mètres (mesure 500) pour trouver un endroit stable. Les mesures 303 ou 304 associées à la mesure N° 203 peuvent permettre d'assurer la stabilité mais dans certaines limites en fonction des efforts verticaux et horizontaux à reprendre. Dans tous les cas, les mesures 601 et 602 devront être prises en compte. Quant à la mise en œuvre des mesures 701 et 702 sous la forme d'un massif de fondation en béton armé est implicite dans le cas d'un projet d'éolienne.

Exemple d'application ISSKA 4 : chalet d'alpage sur du calcaire

Région du Marchairuz (Jura vaudois)

Cas fictif (inspiré d'un cas réel) : On évalue le danger potentiel d'effondrement d'un chalet d'alpage situé sur un alignement de potentielles dolines dans la combe du Pré de Denens (ou toute autre combe similaire à celle-ci). L'on imagine de faire une évaluation préventive pour le chalet.

Etape I. Analyse rapide



Site du Pré de Denens (Marchairuz), avec à gauche, la couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meubles > 2 m (en chamoisé). A droite, la carte géologique. La flèche représente l'emplacement du chalet supposé. Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch.

Nous faisons à nouveau un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport (calcul fait par un(e) géologue ou une personne extérieure à la profession et ayant de bonnes connaissances de base).

Le site geocad1.vd.ch ne contient aucune indication sur toute la chaîne du Marchairuz.

F1, probabilité de vide :	lithologie : calcaire hauterivien	10 pts
	karstification : moyenne	5 pts
	autre facteur : non	
	total F1 : $10 \times 5 =$	50 pts

F2, couverture :	< 2 m (cf. map. geo.admin.ch, « Epaisseur des terrains meubles »)	0.7 pts
	compacité : inconnue, par défaut =	1 pt
	perméabilité : probabl.> $1E-3$	0.3 pt
	total F2 : $0.7 \times 1 \times 0.3 =$	0.21 pt

F3, eau naturelle :	infiltration : concentrée (dolines) 1.3 pts
	nappe : hors couverture 1 pt
	total F3 : $1.3 \times 1 =$ 1.3 pts

F4 : facteurs artificiels :	Présence d'un chalet, l'eau des chenaux s'infiltre, infiltration : > inf. naturelle x2 4 pts (si arrosage artificiel : augmenter ce coefficient)
	nappe : hors couv. 1 pt
	surcharge : moyenne 1.5 pts
	total F4 : $4 \times 1 \times 1.5 =$ 6 pts

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 =$ **50 x 0.21 x 1.3 x 6 =** **82 pts**

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	→ moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *Tableau 10* du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité moyenne** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
<i>Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)</i>					
nul					
très faible		A priori pas d'investigation nécessaire			
modéré					
moyen	→				
élevé					
très élevé				Investigations conseillées	
« effondrement très probable »					

Ensuite, le *Tableau 11* du rapport (ci-dessus) détermine qu'une investigation plus poussée est fortement recommandée. Nous pouvons placer ledit chalet dans la colonne 2 dans le cas d'une construction rustique assimilable à un hangar (p. ex. chalet type bergerie, non habité à l'année, 1-3 pers.) ou dans la colonne 4 s'il s'agit d'un chalet à plus d'un étage, avec des enfants ou des locataires ou qu'il s'agit d'une auberge...

Dans ce dernier cas : → Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.

Le danger principal est ici surtout lié à l'eau qui dans le paramètre F3 et surtout F4 et qui pourrait soutirer la couverture au cas où la construction est faite par-dessus.

Etape II. Analyse détaillée

Une brève analyse de terrain, qui permettra d'évaluer la géomorphologie et éventuellement de faire quelques sondages à la tarière pour s'assurer que la couverture n'est pas trop épaisse, devrait permettre de valider le résultat de l'évaluation préliminaire.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple du chalet d'alpage sur du calcaire

La sélection des **mesures de mitigation** se fait directement à l'aide du second tableau de l'**annexe D**.

En admettant de construire le chalet sur la couverture, nous entrons horizontalement dans ce tableau :

- dans la lithologie B Roches karstiques calcaires
- dans la situation de danger S2
- dans le cas de couverture C

Dans ce cas, la mesure 101 (décapage complet de la couverture) peut être recommandée si elle fait moins de 2 m. Une fois réalisée, si elle indique qu'il n'y a pas de doline, mais que des fissures centimétriques, alors dans l'évaluation de la dangerosité, le facteur F2 vaut 0.1, le facteur F3 vaut 1, voire 0.8, et le facteur F4 vaut 1, voire 0.8, puisqu'il n'y a pas de couverture. La dangerosité est alors très faible. La dangerosité résiduelle serait alors la présence d'une cavité invisible à faible profondeur sous le toit du rocher. S'agissant d'une structure relativement légère, on peut estimer de ne pas investiguer cet aspect. Une évaluation rapide de la probabilité qu'aucune structure d'inception ne soit présente à proximité peut être judicieuse.

Par précaution, on prendra en compte les mesures 601 et 602.

Dans le cas d'un ouvrage préexistant, si la construction présente des dommages manifestement liés à un tassement ponctuel et à la condition minimale qu'il soit fondé sur des semelles filantes, on pourrait également envisager de relever ponctuellement le bâtiment au moyen d'injections de compensation.

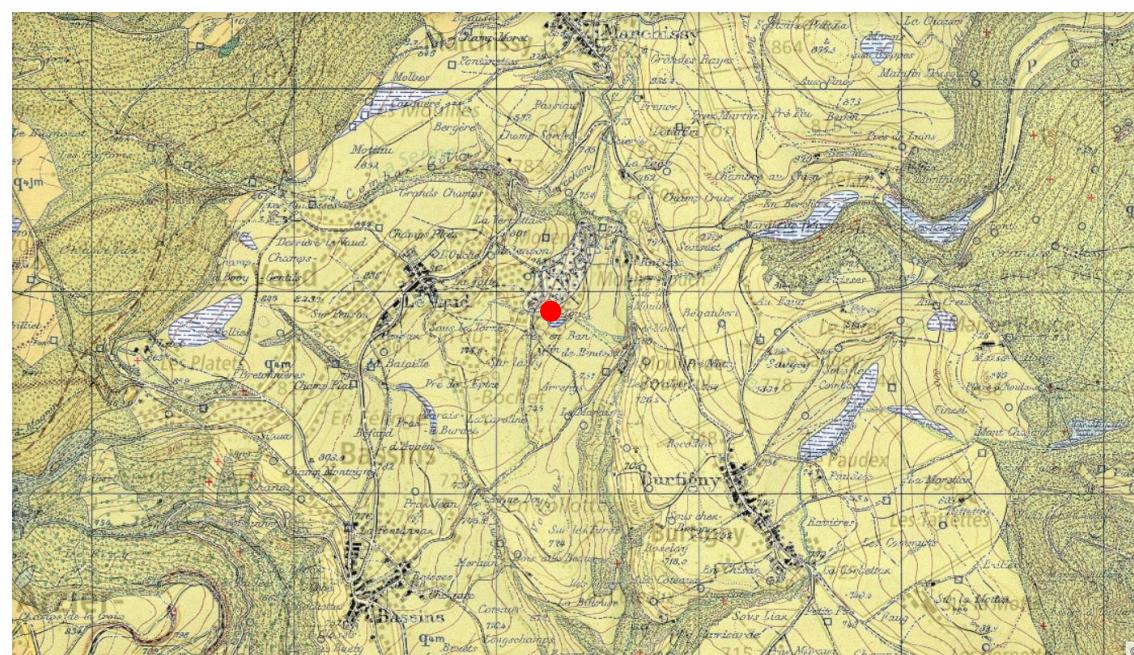
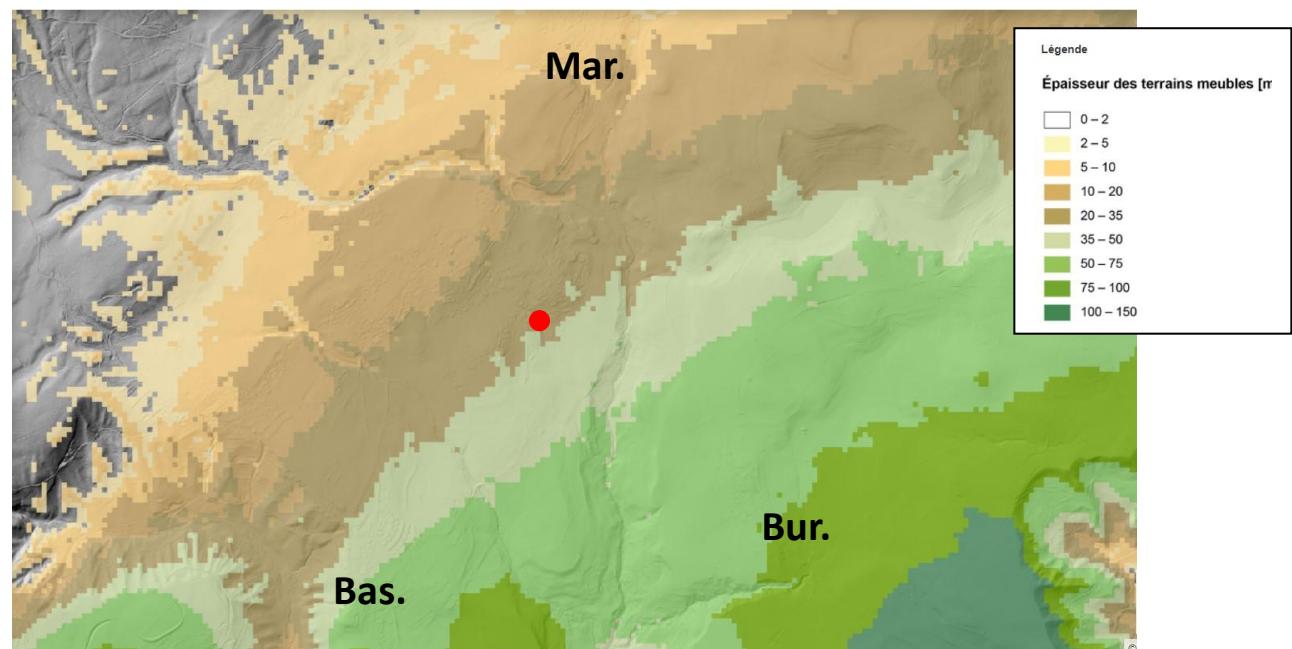
Au final, les investigations pour un tel cas seront très limitées, de même que les mesures de mitigation. On constate ici qu'il est important de bien comprendre chaque étape de l'approche et d'ajuster les évaluations, investigations et mesures de mitigation afin de rester aussi pragmatique que possible.

Exemple d'application ISSKA 5 : affaissement dans la région de Marchissy – Le Vaud

Région du Jura vaudois caractérisée par des terrains meubles épais

Cas fictif : Un affaissement de terrain de plusieurs dizaines de mètres d'extension provoque des dégâts dans la région (routes, immeubles). On essaie d'en connaître la cause et de trouver un moyen pour stopper l'évolution de cet affaissement.

Etape I. Analyse rapide

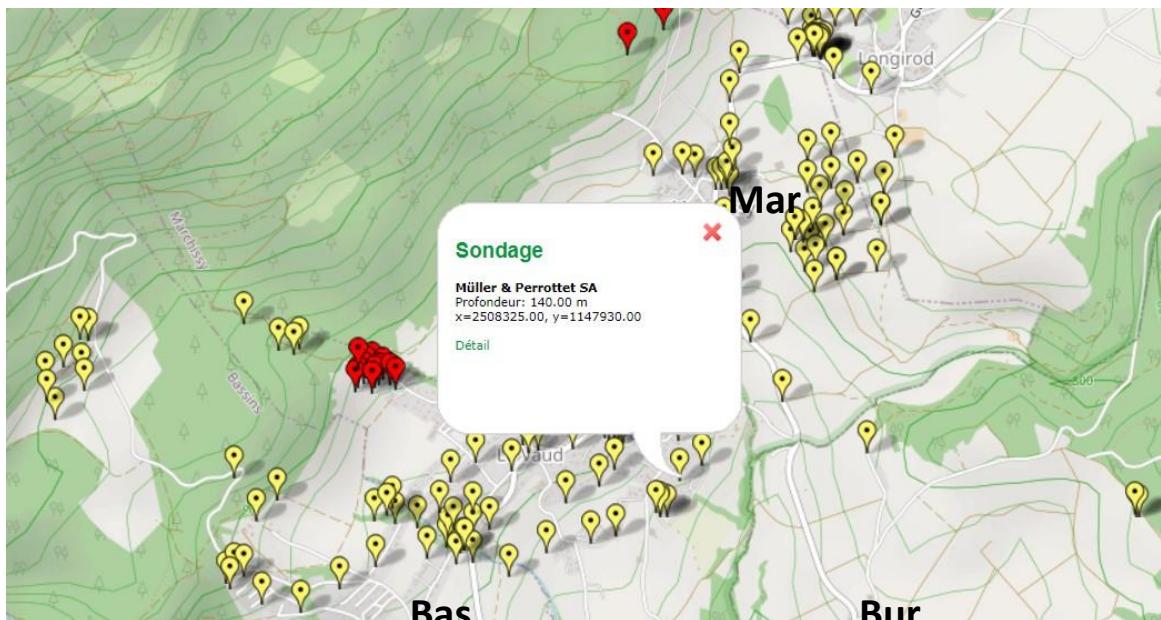


Page précédente : Région de Marchissy, avec en haut, la couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meubles > 2 m (qui peuvent faire jusqu'à 150 m d'épaisseur). En bas, la carte géologique. Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch. Point rouge : forage pris comme référence.

Nous faisons à nouveau un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport (calcul fait par un(e) géologue ou une personne extérieure à la profession et ayant de bonnes connaissances de base).

Le site geocad1.vd.ch contient beaucoup de données dans la région. Y figurent de nombreux forages courts faits à la tarière par l'EPFL, mais aussi des forages profonds comme celui marqué dans l'extrait geocad ci-dessous, qui traverse 140 m de moraine et fluvio-glaciaire. Le prochain sondage à l'est en traverse plus de 60 m.

Il semble donc que les terrains meubles soient plus épais qu'annoncé dans la carte map.geo.admin. Il est possible que ce soit de manière locale avec la présence d'un sillon ou paléochenal. Afin de mieux comprendre la distribution des épaisseurs de terrain meuble sur le calcaire, il serait utile de trouver une coupe géologique de la région dans la littérature spécialisée.



Extrait du site www.geocad1.vd.ch.

F1, probabilité de vide :	lithologie du substratum : calcaires	10 pts
	karstification : moyenne ¹	5 pt
	autre facteur : non	
	total F1 : 10 x 1 =	50 pts

¹ Commentaire sur la probabilité de vide : en l'absence d'indice de non karstification la valeur de 5 (par défaut) est admise. Si des indices explicites de non karstification des calcaires sous la couverture existaient une probabilité de vide plus faible aurait pu être admise.

F2, couverture :	20 à >> 50 m (cf. map. geo.admin.ch, « Epaisseur des terrains meubles ») 0.8 pt compacité : moyenne (multi-couches) 0.5 pt perméabilité : probabl. 1E-4 à 1 E -7 1 pt total F2 : $0.8 \times 0.5 \times 1 =$ 0.4 pt
F3, eau naturelle :	infiltration : faible 1.3 pt (terrains meubles épais) nappe : dans couverture 1.2 pt total F3 : $1.3 \times 1 =$ 1.56 pt
F4 : facteurs artificiels :	infiltration : = inf. naturelle 1 pt nappe : dans couv. 4 pts surcharge : faible 1 pt total F4 : $4 \times 1 \times 1.5 =$ 4 pts
Total général : F1 x F2 x F3 x F4	50 x 0.4 x 1.56 x 4 = 125 pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *tableau 10* du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité modérée** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
<i>Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)</i>					
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, le *Tableau 11* du rapport (ci-dessus) détermine qu'une investigation plus poussée est recommandée. Nous pouvons placer cet exemple d'affaissement dans les colonnes 3 et 4 dans le cas d'atteinte à une route ou un bâtiment.

Etape II. Analyse détaillée

Nous postulons ici que l'affaissement est déjà effectif ou en cours et que des dégâts sont visibles (route déformée, fissures aux bâtiments).

En première priorité, si l'affaissement est brusque et très récent, il convient de rechercher si une cause comme une fuite d'eau pourrait être à l'origine du phénomène, et de réparer au plus vite la fuite (exemple : fuite dans le réseau d'eau potable).

Il convient ensuite d'essayer de quantifier et de faire le suivi du phénomène : surface concernée et importance de l'affaissement, vitesse de progression.

Une analyse géologique globale sera entreprise, permettant de savoir si la cause de l'affaissement est bel et bien due à un entraînement de particules par l'eau dans le karst profond. Si les enjeux impliquent qu'il est important de connaître plus précisément l'épaisseur de la couverture et leurs variations spatiales, il conviendrait de mettre en place une campagne de mesures géophysiques.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de l'affaissement

Dans le cas précis, le recours au 1^{er} tableau (Méthodes et mesures de mitigation) n'est pas forcément indiqué. Selon les infrastructures en cause, nous pouvons choisir toutes les colonnes de A à E !

La sélection des **mesures de remédiation s** se fait donc à l'aide du deuxième tableau de l'**annexe D**.

En admettant que l'affaissement est de grande dimension (>>10 m) et que la couche de terrain meuble est épaisse (>> 20 m), nous entrons horizontalement dans ce tableau :

- dans la lithologie B Roches karstiques calcaires
- dans la situation de danger S4 (effondrement de grande extension)
- dans le cas de couverture C

Dans ce cas, les mesures 101 et 102 (décapage complet de la couverture) sont impossibles à mettre en œuvre et inutiles (terrains meubles trop épais).

Les mesures 301-302-303-304 (construction d'un ouvrage d'art, micropieux) peuvent selon les cas et l'épaisseur du terrain meuble être mises en œuvre. Mais elles seront très probablement difficiles voire impossibles à réaliser dans le cas de bâtiments existants car elles nécessitent des machines de chantier dont la taille est peu compatible avec un engagement dans des sous-sols ou à proximité immédiate de bâtiments.

Les mesures 601 et 602 (gestion du réseau d'eau et des eaux souterraines) sont dans ce cas vivement conseillées, ainsi que les mesures 701 et 702 (renforcement de la résistance du bâti).

La mesure 701 est tout à fait indiqué dans le cas de la construction d'un nouveau bâtiment. Elle n'est pas contre pas applicable à un bâtiment existant. La mesure 702 peut par contre être envisagée pour renforcer un bâtiment existant (renforcement des sous-sols par ajout d'un mur de refend en béton armé par exemple comme cela se fait lorsqu'il faut renforcer un bâtiment relativement à l'aléa sismique).

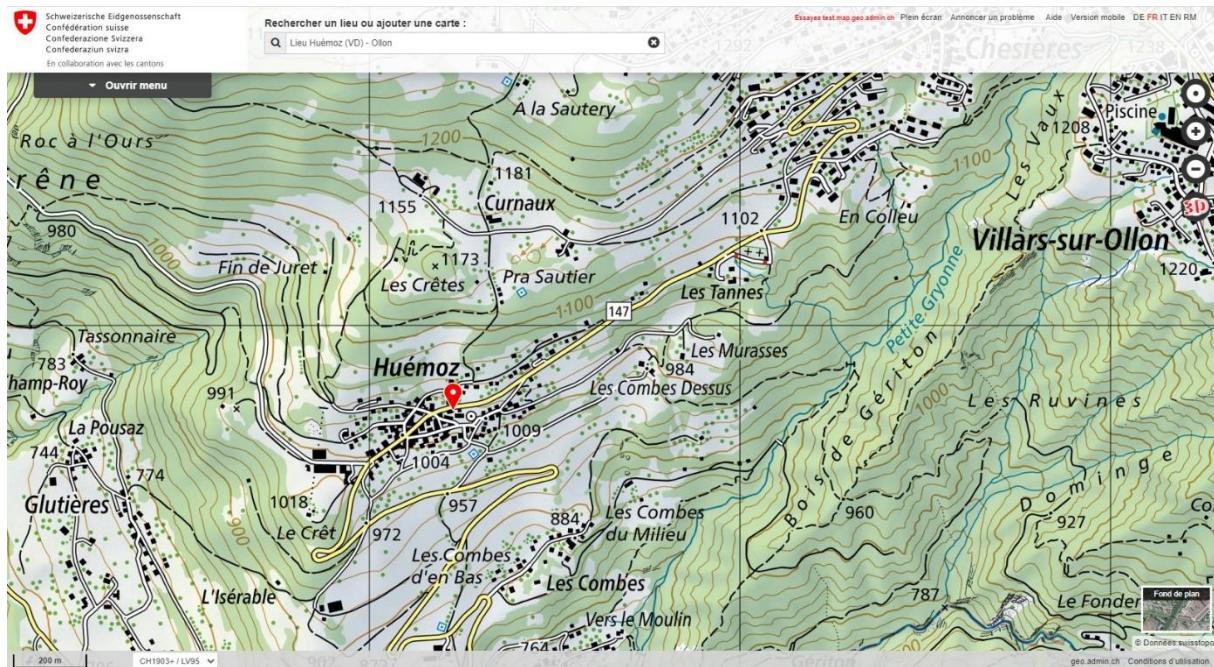
Enfin, la mise en œuvre de la mesure 405 (injection de compensation) est également envisageable s'il s'agit de relever ou de redresser un bâti existant.

Exemple d'application ISSKA 6 : affaissement d'un tronçon de route cantonale

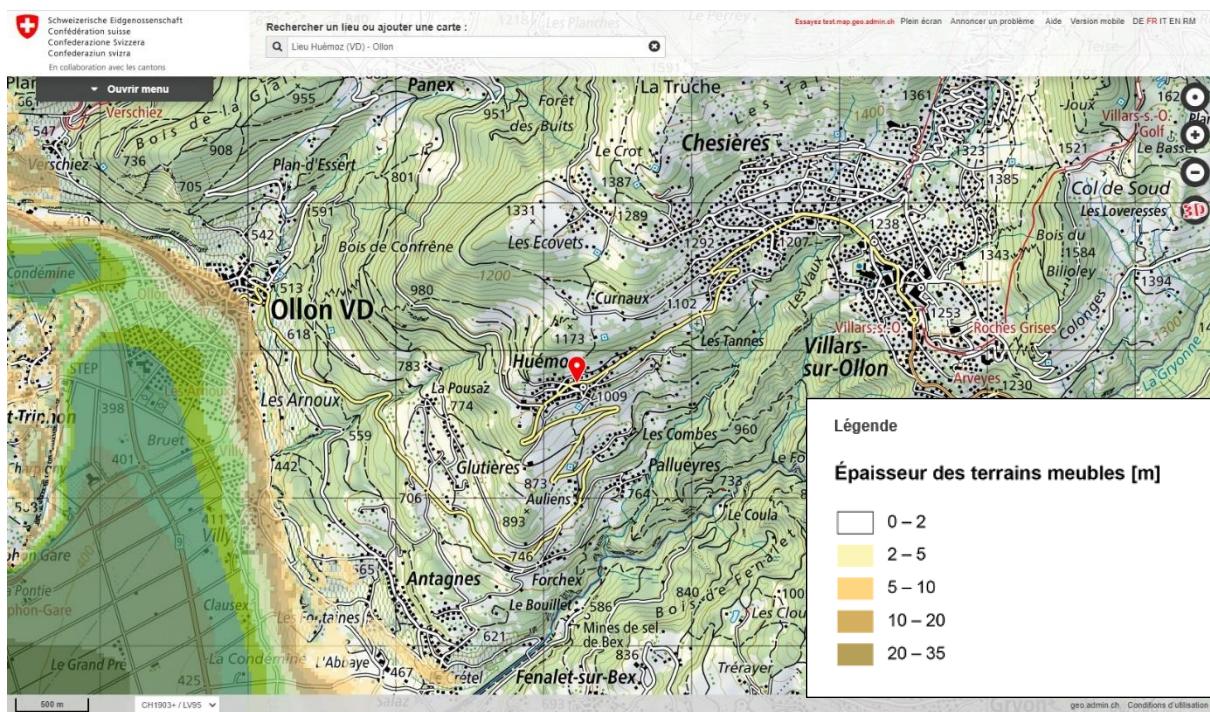
Région de Huémoz, route cantonale Ollon – Villars sur Ollon

Une portion de la route RC 719 a subi des dégâts dus à des affaissements sur plusieurs centaines de mètres entre Huémoz et Les Tannes. Ce tronçon a fait l'objet de travaux lourds de remédiation en 2015-2016.

Etape I. Analyse rapide

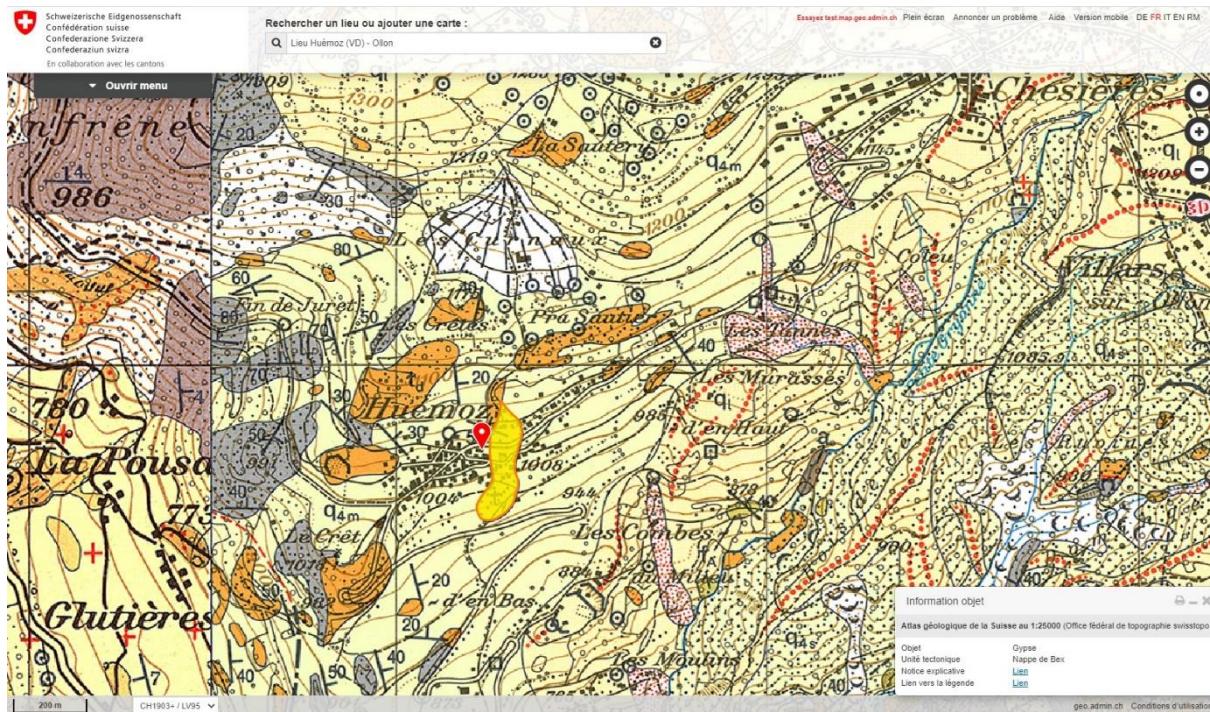


La portion de route concernée.

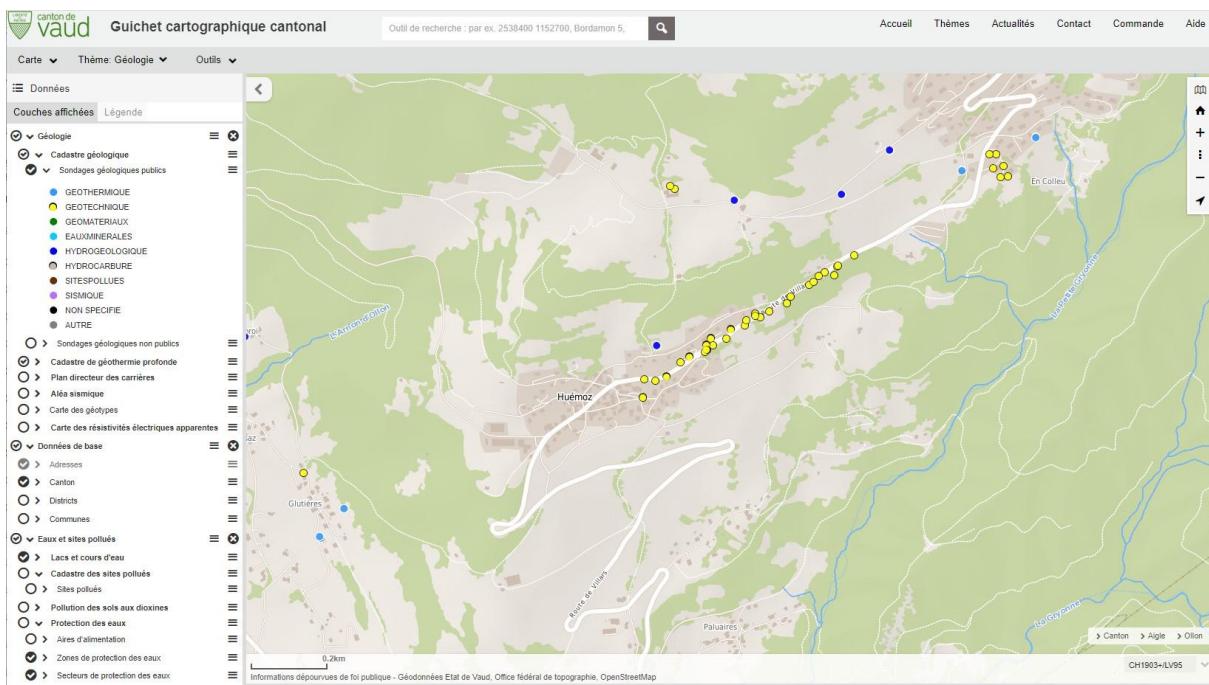


La couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meubles > 2 m (en chamoisé). Carte reprise de www.map.geo.admin.ch. Dans la zone concernée, l'épaisseur est annoncée à moins de 2 mètres.

Des affleurements de gypse sont donnés dans la carte géologique (gypse de la nappe de Bex, comme le montre la surface surlignée en jaune).



Extrait de la carte géologique, reprise de www.map.geo.admin.ch.



Extrait du site www.geocad1.vd.ch.

Le site [geocad1.vd.ch](http://www.geocad1.vd.ch) indique une trentaine de forages le long de la route cantonale, ce qui n'est pas étonnant, vu qu'il a fallu mener des travaux conséquents de consolidation. Il faut s'imaginer que si nous étions les experts de l'époque, responsables de solutionner ces affaissements de la route, l'information donnée par les forages en étape I ne serait pas encore disponible (car les forages non encore réalisés !). Il conviendrait dans ce cas d'utiliser l'information d'autres forages déjà existants dans la région (Huémoz village, Chesières...).

Calcul des facteurs de pondération pour l'estimation de la dangerosité

F1, probabilité de vide :

(cf. Tableaux 2 et 3)

lithologie : gypse (nappe de Bex)	30 pts
karstification : (moyenne à) élevée	10 pts
autre facteur : non	
total F1 : $30 \times 10 = 300$	(limité à :) 100 pts

F2, couverture :

(cf. Tableaux 4 et 5)

< 2 m selon map. geo.admin.ch : ("Epaisseur des terrains meubles"), mais 2-20 m selon les forages, qui donnent une image plus précise	1 pt
compacité : faible	1 pt
perméabilité : « faible à moyenne »	0.75 pt
total F2 : $1 \times 1 \times 0.75 =$	0.75 pt

F3, eau naturelle :

(cf. Tableaux 6 et 7)

infiltration : semi-concentrée	1.1 pt
nappe : hors couverture	1 pt
total F3 : $1.1 \times 1 =$	1.1 pt

F4, facteurs artificiels :	infiltration = inf. naturelle x 2	4 pts
(cf. Tableaux 8 et 9)	(situation avant affaissement, on postule que l'eau s'écoulait en bord de route)	
	nappe : hors couv.	1 pt
	surcharge : élevée (poids lourds !)	2 pt
	total F4 : 4 x 1 x 2 =	8 pts

Total général : F1 x F2 x F3 x F4 **100 x 0.75 x 1.1 x 8 = 660 pts**

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *Tableau 10* du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité très élevée** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)					
nul					
très faible	A priori pas d'investigation nécessaire				
modéré					
moyen					
élevé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Ce cas réel d'affaissement de route dans un contexte de roche gypseuse montre déjà dans l'analyse rapide, et de manière logique, qu'il convient de mener une investigation plus poussée.

Etape II. Analyse détaillée

Vu les enjeux et les coûts liés à la réfection voire à la reconstruction d'un long tronçon de route, il convient de s'entourer au plus vite de spécialistes : géologues et ingénieurs, afin de déterminer une stratégie permettant de réfectionner la route à long terme tout en maîtrisant le coût et la durée des travaux.

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3.

En parallèle, une campagne de forages doit être mise en place afin d'estimer l'état de l'assise rocheuse sous la route, de son degré d'altération, de la fissuration et de la karstification, de la présence d'eau, de la composition et de l'épaisseur du terrain meuble et du remblai.

Selon les cas, des forages horizontaux pourront être réalisés depuis le bord aval de la chaussée. La mise en place de méthodes géophysiques ne sera dans ce cas pas aisée, voire vouée à l'échec, du fait de la présence de nombreuses conduites et câbles électriques sous la chaussée.

L'analyse détaillée nous montrera que la couverture meuble (remblais et moraine) a une épaisseur inégale, mais d'au moins deux mètres, que la roche gypseuse est par endroit altérée, par endroit plus saine, et qu'elle est généralement fracturée et contient par endroits des remplissages karstiques. Au-dessous, nous trouvons des schistes et des dolomies diversement altérés.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de la route dans le gypse

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'annexe D.

Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol.

Avec la route cantonale sur du gypse, nous sommes dans la situation d'infrastructure C, « Linéaire ». Nous entrons verticalement dans la colonne C (flèche).

Dans le cas de la route cantonale, les mesures 101 et 102, 203, 301, 302, 303, 304, 601 et 602, 701 (radier ou longrines) et 702, éventuellement 401 à 404 peuvent être envisageables. La mesure 201 est inappropriée, s'agissant de gypse.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A Roches karstiques sulfatées
 - dans la situation de danger S6 : « situation inconnue »
 - dans le cas de couverture R (M)

Sélection des mesures de mitigation

3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Annexe D



Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

La ligne du tableau précise ceci : « Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. A évaluer au cas par cas ». Nous estimons donc dans un premier temps les mesures suivantes comme pertinentes :

- 101 et 102 : décapage pour reconnaissance
 - 202 : remblayage et dalle ou radier en béton armé (ou longrines)
 - 301 à 304 : ouvrage d'art, pieux ou micropieux
 - 405 : Injections de compensation
 - 500 : renoncer ou déplacer = **impossible dans ce cas de figure !**
 - 601 et 602, gestion des eaux : raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque
 - 701 et 702 : radier monolithique ou longrines et structures en béton armé

Cet exemple qui est un cas réel montre que dans ce genre de situation, il convient de faire très tôt appel à une équipe multidisciplinaire de spécialistes (géologues, hydrogéologues, géotechniciens, ingénieurs...), et d'être au fait que les choix opérés par le Maître d'œuvre seront liés à la sécurité et la durabilité de l'ouvrage, ainsi qu'au budget disponible. C'est un cas où il n'y a à priori pas de doline impliquée dans le processus, mais des dolines sont présentes à proximité et peuvent jouer un rôle même indirect, et il peut y avoir des paléo-dolines remplies de matériaux meubles à l'interface gypse-moraine.

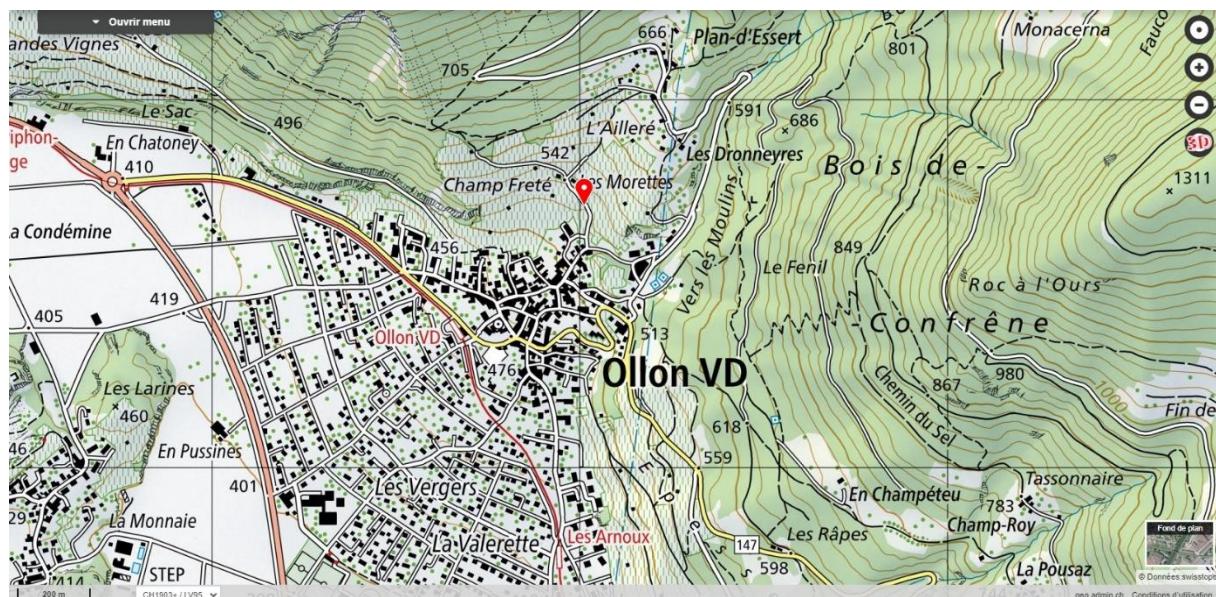
Exemple d'application ISSKA 7 : stabilisation d'une grotte dans le gypse

Grotte de Morisaz (Ollon)

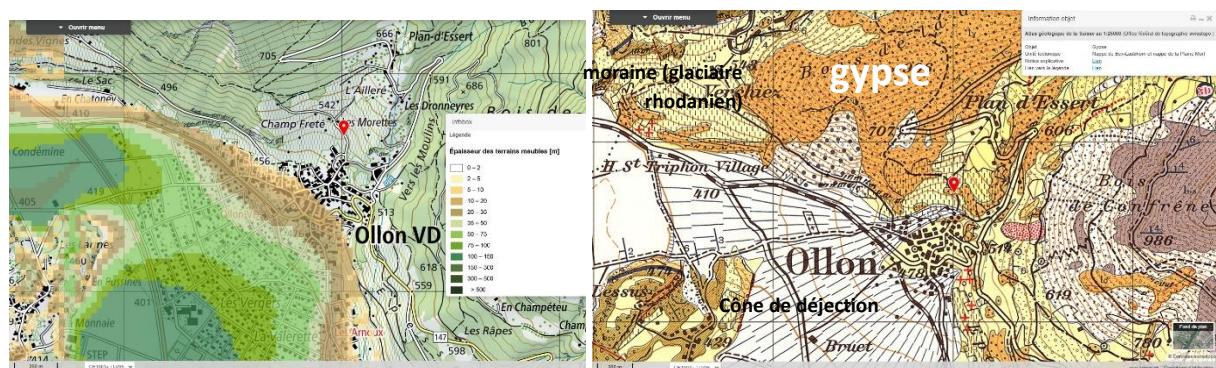
Exemple fictif sur un objet réel : La grotte de Morisaz, qui s'ouvre dans le gypse, est dangereuse et en partie déjà effondrée. On imagine qu'il faut sécuriser le site pour aller y chercher des fûts de produits chimiques qui auraient été stockés au fond (danger d'effondrement sur les fûts et les personnes intervenantes).

La dépollution de la grotte a en fait bien eu lieu, mais il s'agissait de la zone d'entrée. Il reste encore probablement des déchets un peu plus loin dans des zones considérées comme peu sûres ou désormais inaccessibles. La grotte est par ailleurs inventoriée comme géotope.

Etape I. Analyse rapide



Situation de la grotte de Morisaz (au nord d'Ollon).



Région d'Ollon et grotte de Morisaz. A gauche : épaisseur terrains meubles. A droite, la carte géologique (entrée de la grotte : entre gypse de la nappe de Bex-Laubbhorn / Plaine Morte et Glaciaire rhodanien). Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch.

Le site geocad1.vd.ch donne quelques forages géotechniques de 2 à 10 m à la base du chemin des Morettes, au bord duquel s'ouvre la grotte. Aucun ne recoupe du gypse.

Nous faisons un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport. Ce calcul peut être fait soit par un(e) géologue, soit par une personne ayant de bonnes connaissances de base de géologie ou de géographie physique (scientifique, ingénieur, responsable en génie civil, autodidacte éclairé, ...).

Reprenons selon le principe de la fig. 5 le tableau de la fig. 6 pour arriver à un « premier » résultat qui donnera le niveau de danger (nul à très élevé) selon le Tableau 11 du rapport.

Calcul des facteurs de pondération pour l'estimation de la dangerosité

F1, probabilité de vide :	lithologie : gypse	30 pts
	karstification : élevée	10 pts
	autre facteur : non	
	total F1 : $30 \times 10 = 300$ (max. =)	100 pts
F2, couverture :	< 2 m selon map.geo.admin.ch, 2-20 m	
	selon les forages les plus proches	1 pt
	compacité : inconnue, par défaut :	1 pt
	perméabilité : forte	0.3 pt
	total F2 : $1 \times 1 \times 0.3 =$	0.3 pt
F3, eau naturelle :	infiltration : concentrée	1.3 pt
	nappe : hors couverture	1 pt
	total F3 : $1.3 \times 1 =$	1.3 pt
F4, facteurs artificiels :	infiltration : inf. naturelle	1 pt
	nappe : hors couverture	1 pt
	surcharge : inexistante	1 pt
	total F4 : $1 \times 1 \times 1 =$	1 pt
Total général : F1 x F2 x F3 x F4	100 x 0.3 x 1.3 x 1 =	<u>39 pts</u>

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le Tableau 10 du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité modérée** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)	Champs, parcs jardins, serres plastique	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élévé				Investigations conseillées	
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, le *Tableau 11* du rapport (ci-dessus) détermine qu'une investigation plus poussée n'est pas forcément nécessaire. Par contre, des exigences de la SUVA relatives à la sécurité du chantier et des ouvriers sont probablement à prendre en compte.

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3 du Cahier 1. Aucune méthode d'investigation n'est à prévoir à ce stade.

Une vision des lieux nous montre que l'entrée de la cavité s'est effondrée et qu'il n'est plus possible d'y pénétrer. Nous décidons donc de procéder à une étape II complète.

A part le déblayement et une sécurisation de l'entrée, il n'y a pas lieu de procéder à des investigations d'ordre géophysique ou par des forages. Une fois la galerie souterraine accessible, il convient de juger de son état de stabilité. Nous proposons donc de s'entourer de spécialistes et de passer à l'étape III.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de la grotte instable dans le gypse

La sélection des **dispositions constructives** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Dans le cas précis, s'agissant d'une cavité naturelle (1^{er} tableau, Méthodes et mesures de mitigation), nous choisirons la colonne A : absence d'aménagements en surface). Aucune mesure ne semble adéquate. Les mesures 200 (comblement) n'entrent pas en ligne de compte dans ce cas. Les mesures 600 (gestion des eaux) pourraient éventuellement être mises en pratique par un détournement du ruisseau parcourant la grotte (ceci a du sens que si les travaux devaient durer dans le temps, sinon il faudrait les mener durant une période sèche).

Nous entrons ensuite horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A Roches karstiques sulfatées
- dans la situation de danger S4 (comparable à une grande doline) ou S6 (inconnu, à évaluer au cas par cas)

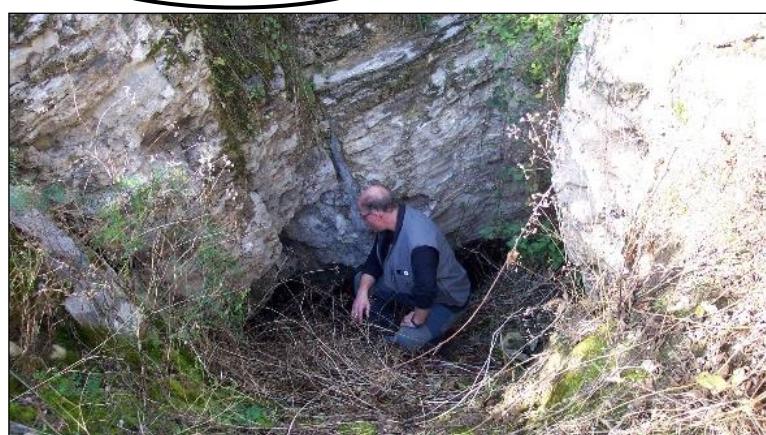
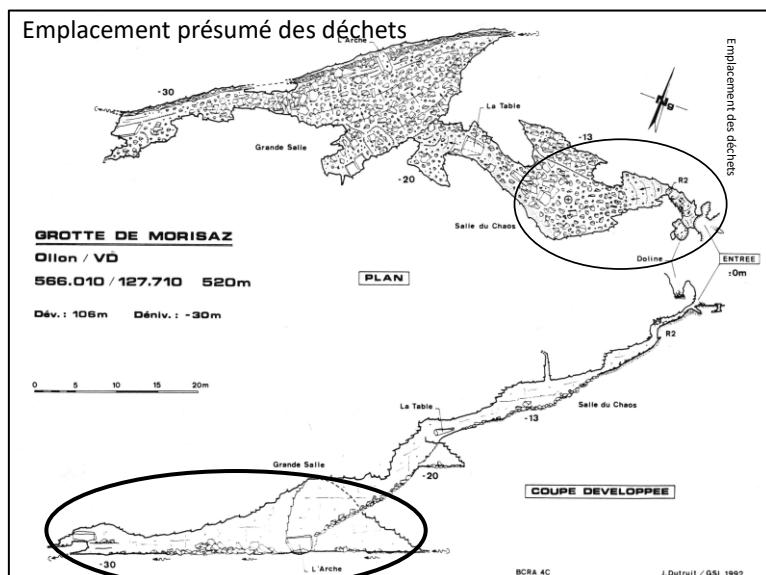
- dans le cas de couverture R(M)

La ligne du tableau préconise avec la situation S4 – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 101 et 102 (décapage), 202 et 203 (remblayages), 302 (micropieux), 405 (injections de compensation), 700 (mesures à l'objet) : **pas pertinents dans notre cas.**
- 500 : renoncer à la réalisation du projet : pertinent. Si les déchets devaient absolument être sécurisés au fond de la grotte et ramenés en surface, il conviendrait dans ce cas de réaliser une galerie renforcée (ou un puits) à travers la masse de gypse instable jusqu'à la zone convoitée.
- 601 et 602 (gestion des eaux) : devrait être étudié dans le cas de la réalisation d'une galerie d'accès.

Ces méthodes peuvent se compléter l'une l'autre mais aussi s'exclure (cf. mesures 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle !

Selon les méthodes choisies (sécurisation simple de la grotte, creusement d'une galerie renforcée pour atteindre les déchets, ...), les coûts de l'opération seront bien-entendu extrêmement différents !



Entrée effondrée (archive GPV).

Exemple d'application ISSKA 8 : effondrement d'une route en milieu urbain sur du terrain marno-calcaire

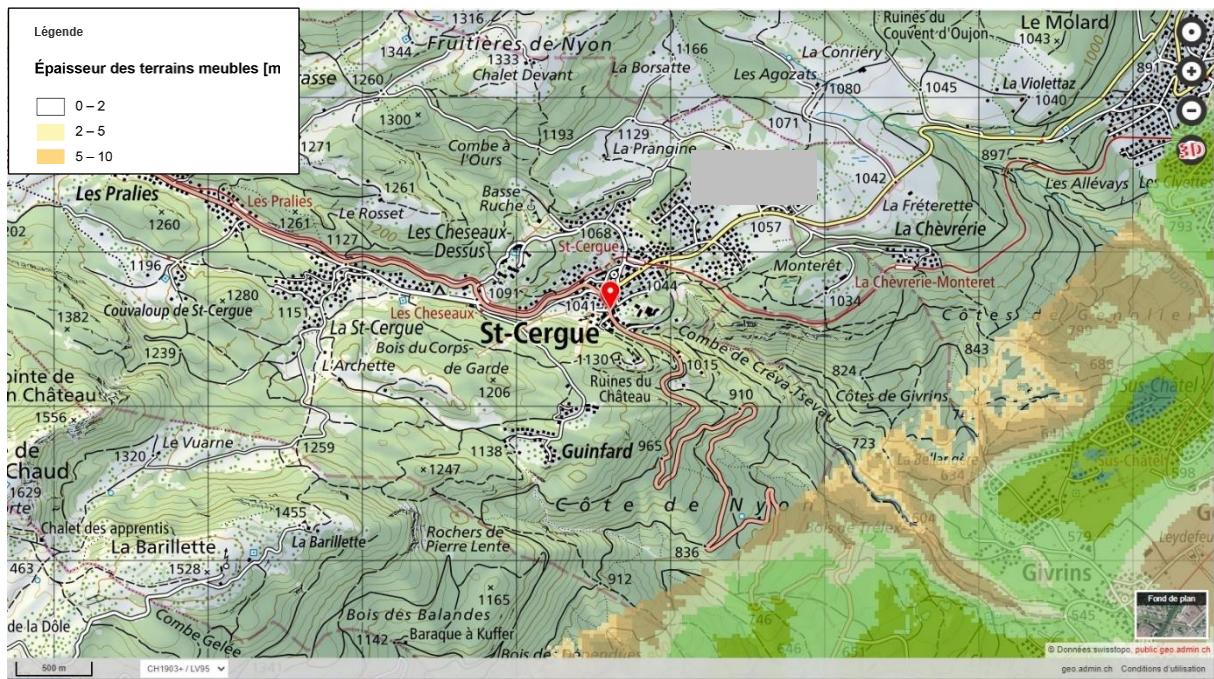
Saint-Cergue, Jura vaudois

Ce cas réel survenu en 2020 est caractérisé par la complexité du sous-sol en milieu urbain, avec des conduites, un puits perdu sous une chambre technique, une ancienne galerie, du remblai, la mise en séparatif du réseau d'évacuation et le passage de camions sur une route cantonale fréquentée.

Etape I. Analyse rapide

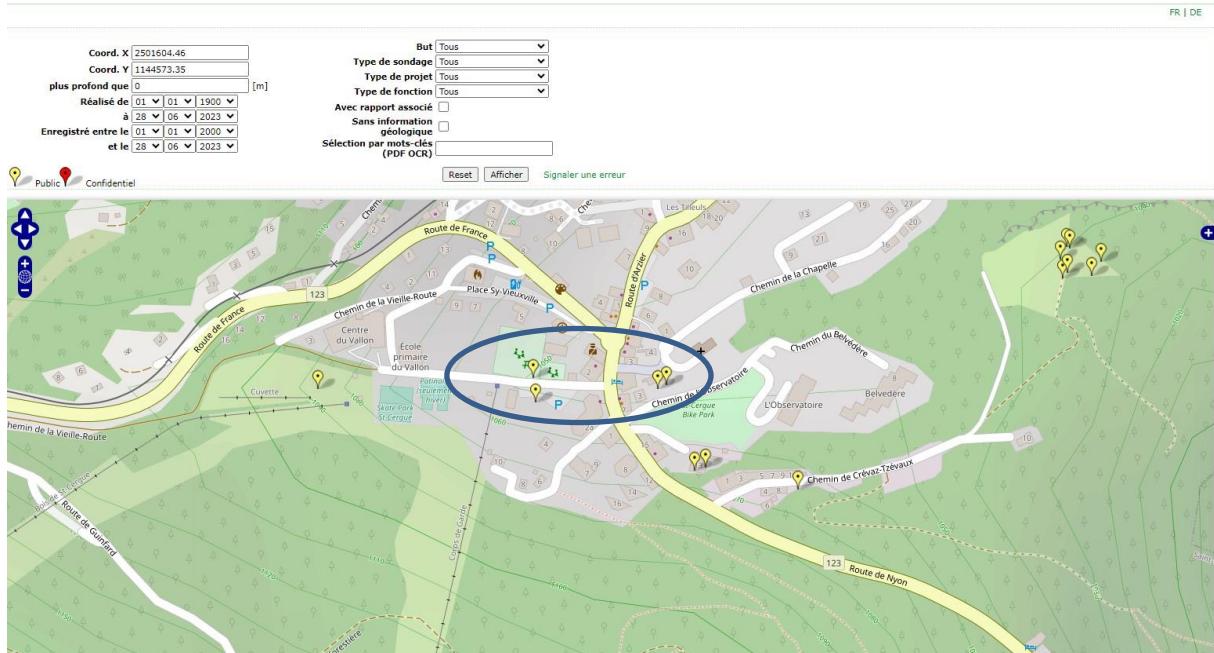


Plan de situation et extrait de la carte géologique. Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch.



La couche Swiss alti 3D et les zones de terrain meubles > 2 m (en chamoisé). Carte reprise de www.map.geo.admin.ch.

Le site geocad1.vd.ch montre des sondages à proximité. Ceux du côté ouest montrent de la moraine ou du remblai de 3 à 5 m d'épais, puis du calcaire roux (Valanginien), ceux à droite sont de petits sondages où le calcaire roux est trouvé à moins de 40 cm.



Situation des sondages à proximité selon Geocad 1.

Nous faisons un premier calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport (calcul fait par un(e) géologue ou une personne extérieure à la profession et ayant de bonnes connaissances de base).

Calcul des facteurs de pondération pour l'estimation de la dangerosité

F1, probabilité de vide :	lithologie : marnes, semi-karstique 6 pts karstification : moyenne ou inconnue 5 pts autre facteur : oui, galerie artificielle 100 pts total F1 : $6 \times 5 \times 100 = 3000$ (max. =) 100 pts
----------------------------------	--

F2, couverture :	La présence de remblai, de conduites et de la chambre technique nous incite à prendre le facteur 2 à 20 m	1 pt
	compacité : faible dans du remblai	1 pt
	perméabilité supposée : moyenne	1 pt
	total F2 : $1 \times 1 \times 1$ pt=	1 pt

F3, eau naturelle :	infiltration : diffuse	1 pt
	nappe : possible couverture	1.1 pt
	total F3 : 1 x 1.1 =	1.1 pt

F4, facteurs artificiels :	Le puits perdu sous la chambre technique indique une infiltration concentrée : > inf. naturelle x 2
	4 pts
nappe : hors couverture	1 pt
surcharge : très élevée (circulation poids lourds)	2 pts
total F4 : 4 x 1 x 2 =	8 pts

Total général : F1 x F2 x F3 x F4 **100 x 1 x 1.1 x 8 =** **880 pts**

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	→ très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élévé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le
tableau 10 du
rapport →
**« dangerosité
très élevée »**

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)	Champs, parcs jardins, serres plastique	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élévé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, une investigation plus poussée est fortement recommandée.

→ Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant de réaliser l'Etape II.

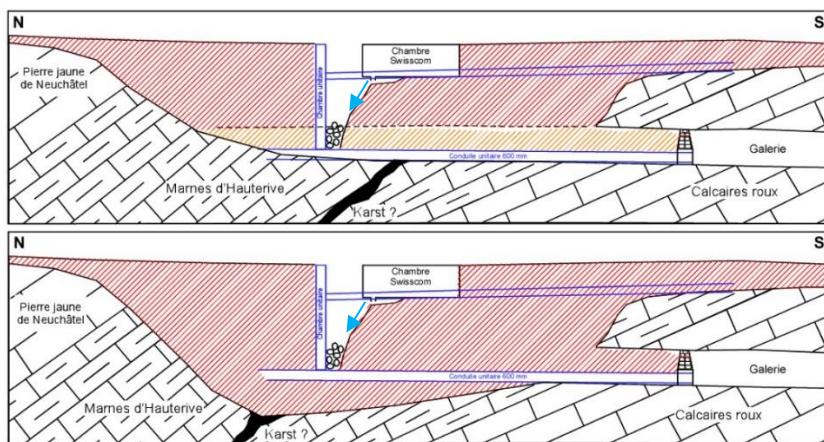
Ce cas réel montre que, s'agissant d'une route cantonale à fort trafic, des mesures doivent être prises immédiatement, ne serait-ce que pour sécuriser le trafic et les personnes. Des mesures de sécurisation (barrières) et de confortement doivent être prises le plus rapidement possible, ce qui a été fait.

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3 du Cahier 1, en l'occurrence ici un suivi minutieux du creusement autour de l'effondrement pour contenir celui-ci.

Lorsque cet effondrement s'est produit le 15 juin 2020, quelques semaines après la mise en séparatif des tuyaux d'évacuation d'eau dans le secteur, le site a été bouclé et la zone effondrée sous la route complètement excavée et les différents tuyaux sécurisés.

Ensuite, des travaux de suivi par des ingénieurs, géologues, hydrogéologues et karstologues ont mené à l'élaboration d'un rapport de synthèse sur tout le suivi et à l'élaboration de deux hypothèses concernant la survenue de cet effondrement (extrait du rapport 1731.1-RA-01 d'Impact-Concept SA du 12 août 2020).



Extrait de la figure 9 du rapport d'Impact-Concept, avec en bleu clair, la sortie du puits perdu de la chambre technique. La présence d'un karst sous la galerie artificielle est fortement suspectée, mais non prouvée.

Figure 9 : Hypothèses relatives à l'état de la galerie. En haut, la galerie a été percée dans les calcaires hauteriviens puis comblée au moyen de gravier et blocs (hachures orange). En bas, la galerie a été ouverte dans les matériaux quaternaires, les hachures rouges correspondent tantôt à une moraine graveleuse jurassienne, tantôt à un remblai graveleux faiblement compacté.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de l'effondrement de la route en milieu urbain

Remarque : dans ce cas réel, nous ne savons pas quelles mesures ont été prises pour solutionner ce problème. Le facteur temps est un élément clé dans ce genre de cas, pour permettre que la route soit fermée le moins longtemps possible.

La sélection des **dispositions constructives** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Dans le cas précis, s'agissant d'une infrastructure de transport (1^{er} tableau, Méthodes et mesures de mitigation : Infrastructures linéaires -> colonne C), les mesures 200, 300 et 400 devraient être discutées entre les ingénieurs et le propriétaire de l'ouvrage (en l'occurrence ici le Canton), pour trouver les meilleures solutions à mettre en œuvre en un temps restreint. Les mesures 601 et 602 (gestion des eaux) seront cruciales, du moment que l'eau est à la base du mécanisme de cet effondrement.

Nous entrons ensuite horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie C Roches semi-karstiques (marnes)
- dans la situation de danger S3 (extension moyenne)
- dans le cas de couverture C

La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 101, 102 : décapage du sol et relevé d'indice pour dégager le toit du rocher (ici le terrassement a été effectué en urgence, mais le toit du rocher n'a pas été atteint)
- 302 : micropieux forés armés
- 405 : injections de compensation²
- 601 et 602, gestion des eaux : sécurisation de toutes les conduites, évacuation des eaux hors du secteur à risque (ici l'eau du puits perdu a été redirigée vers le réseau des eaux claires)
- 701 et 702 : mesures à l'objet : fondations, structures. A définir par l'ingénieur selon la fenêtre de temps à disposition.

Ces méthodes peuvent se compléter l'une l'autre mais aussi s'exclure. Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle !

Comme on le voit dans cet exemple un peu atypique avec une infrastructure souterraine complexe, les cas d'instabilités en milieu urbain avec des infrastructures souterraines et remplissages artificiels peuvent vite s'avérer compliqués. D'autant plus que le facteur temps sera prépondérant, pour la sécurisation des infrastructures et la protection des personnes.

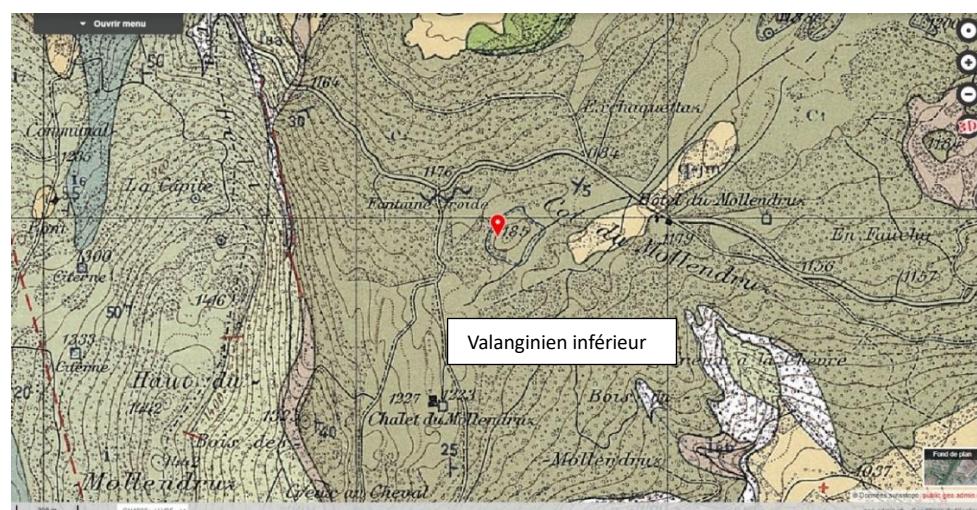
² Dans le cas présent, la méthode d'injection par résine expansive URETEK avait été proposée et non retenue, car le site est en zone de protection S3 de la source du Montant.

Exemple d'application ISSKA 9 : personne tombée dans un trou (pâturage sur du calcaire)

Région du Mollendruz (Jura vaudois)

Cas réel : Une fillette est tombée dans un effondrement du terrain au Mollendruz lors d'une promenade en raquettes en hiver. L'effondrement était caché par la couche de neige et le pont de neige a cédé. L'enfant a chuté dans la faille, heureusement sans gravité. L'on essaie de faire une évaluation préventive avec la méthode à l'endroit de l'effondrement (aujourd'hui sécurisé par des gros cailloux).

Etape I. Analyse rapide



Effondrement au Mollendruz, situation topographique et géologique (il s'ouvre dans un bassin fermé situé dans le Valanginien inférieur). Cartes reprises de www.map.geo.admin.ch. Sur toute la chaîne du Mollendruz, l'épaisseur des terrains meubles est annoncée < 2m, c'est du moins le cas au droit de l'effondrement (sur geocad, des forages plus à l'est montrent de la moraine locale jusqu'à 3 m).

Nous faisons à nouveau un calcul itératif simple selon les figures 5 et 6 du rapport (calcul fait par un(e) géologue ou une personne extérieure à la profession et ayant de bonnes connaissances de base).

F1, probabilité de vide :

lithologie : calcaire valanginien	10 pts
karstification : « moyenne à élevée »	7.5 pts
autre facteur : non	
total F1 : $10 \times 7.5 =$	75 pts

F2, couverture :

< 2 m (cf. map. geo.admin.ch, « Epaisseur des terrains meubles »)	0.7 pts
cohésion : inconnue, par défaut =	1 pt
perméabilité : inconnue, par défaut 0.3 à 1 pt	
total F2 : $0.7 \times 1 \times 0.3 \text{ à } 1 =$	0.21 à 0.7 pt

F3, eau naturelle :

infiltration : concentrée (dolines et bassin fermé)	1.3 pts
nappe : hors couverture	1 pt
total F3 : $1.3 \times 1 =$	1.3 pts

F4 : facteurs artificiels :

infiltration = inf. naturelle	1 pt
nappe : hors couv.	1 pt
surcharge : faible	1 pt
total F4 : $1 \times 1 \times 1 =$	1 pt

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4$

$75 \times 0.21 \text{ à } 0.7 \times 1.3 \times 1 =$

20 à 68 pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *Tableau 10* du rapport (ci-dessus), nous tombons de toute façon dans la catégorie « dangerosité modérée ou moyenne », selon le facteur de perméabilité choisi.

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 10)					
nul	Champs, parcs jardins, serres plast.,	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
très faible					
modéré					
moyen					
élevé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

A priori pas d'investigation nécessaire

Le *Tableau 11* du rapport (ci-contre) détermine ensuite qu'aucune investigation n'est nécessaire. Il n'y a donc pas d'étape II, ni d'étape III.

Ce résultat est somme toute logique, car dans la réalité les effondrements en pâture ou forêt en terrain karstique ne sont généralement pas prévisibles.

Présentation des quatre exemples d'application "UDN"

Exemple d'application UDN 1 : rénovation d'une villa avec construction d'une véranda

Commune de Ste-Croix, avenue E. Jaques-Dalcroze

Rénovation d'une villa existante de taille standard avec création d'une véranda dans un quartier résidentiel déjà existant. Le projet se trouve sur une zone marno-calcaire de l'Oxfordien (formation de Wildegg) sous faible couverture quaternaire au droit d'un gouffre inconnu et à plus de 500 mètres d'alignement de dolines.

Etape I : Analyse rapide

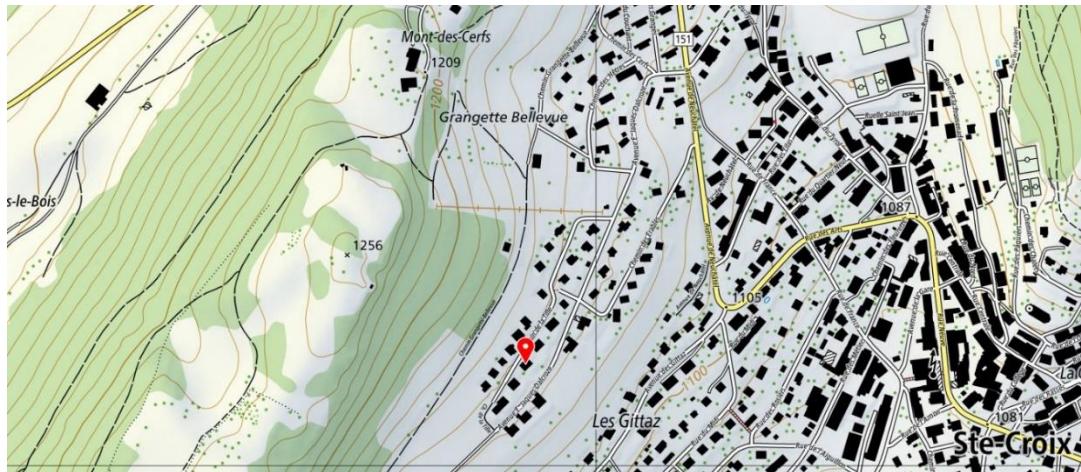


Figure 1 : Projet fictif de rénovation d'une villa existante avec création d'une véranda dans un quartier déjà construit.

Légende

Sources karstiques

Source pérennes captées

- ◆ 1 à 10 L/s
- ◆ 10-100 L/s
- ◆ 100-1000 L/s

Source pérennes non captées

- ◆ 1-10 L/s
- ◆ 10-100 L/s
- ◆ 100-1000 L/s
- ◆ >1000 L/s

Source temporaires non-captées

- ◆ 1-10 L/s
- ◆ 10-100 L/s
- ◆ 100-1000 L/s
- ◆ >1000 L/s

Dolines

Diamètre

- <20m
- 20-50m
- >50m

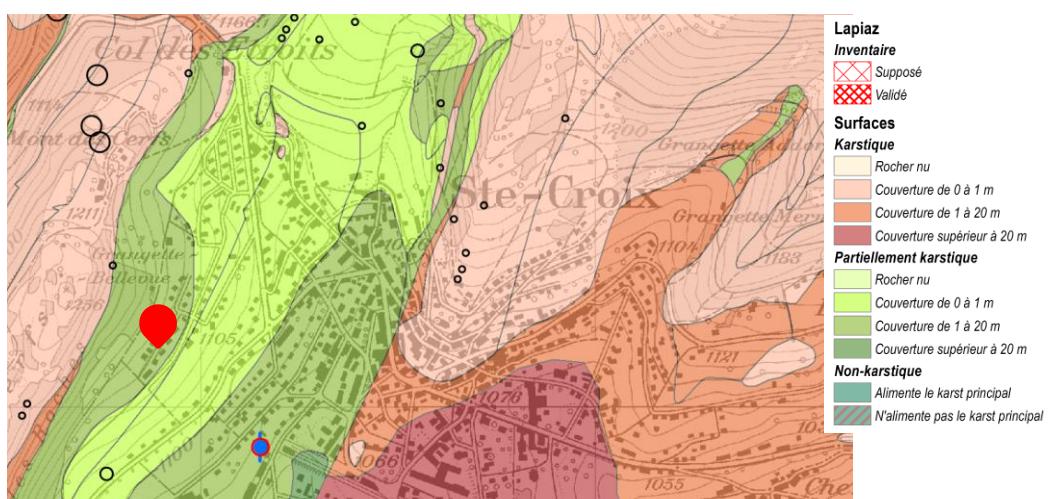


Figure 2 : Carte de l'aléa « karst » de l'ISSKA avec épaisseur des terrains meubles au-dessus du substratum rocheux (compris entre 1 et 20 mètres au droit du site d'étude), sources karstiques et position des dolines.

Le substratum rocheux au droit de la zone d'étude est composé de marno-calcaire de l'Oxfordien (formation de Wildegg) sous une faible épaisseur de terrains meubles de l'ordre de 5 à 10 mètres selon la carte du toit du rocher du canton de Vaud. La zone d'étude est située en aval direct d'une ligne de crête composée de calcaire du Malm affleurant, sur laquelle de nombreuses dolines et lapiaz sont identifiés.

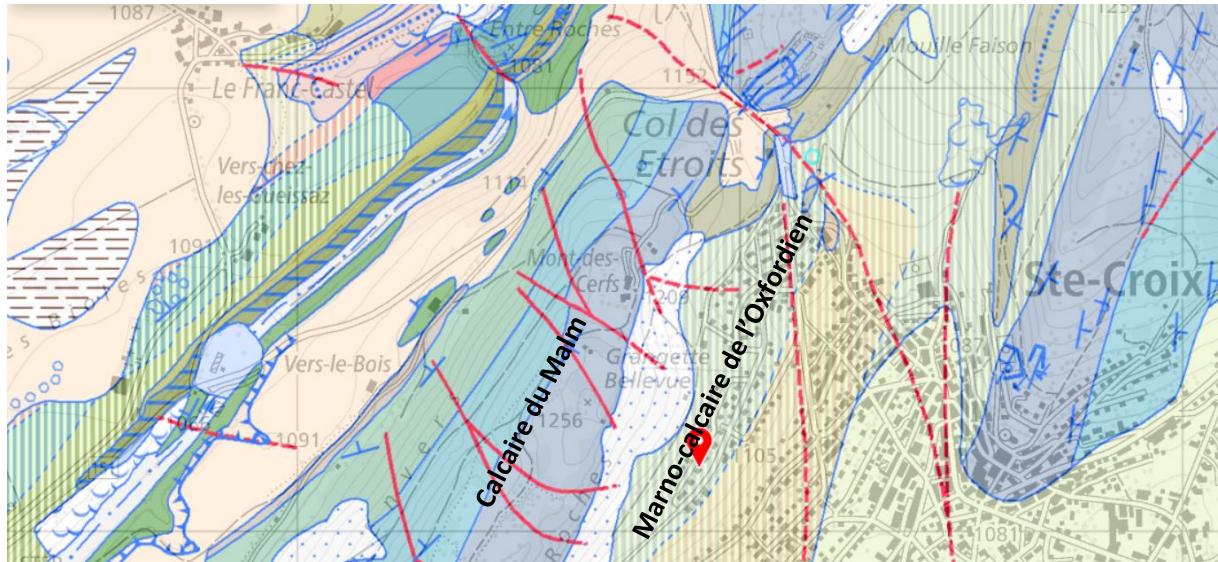


Figure 3 : Carte géologique vectorisée (source : map.geo.admin.ch).

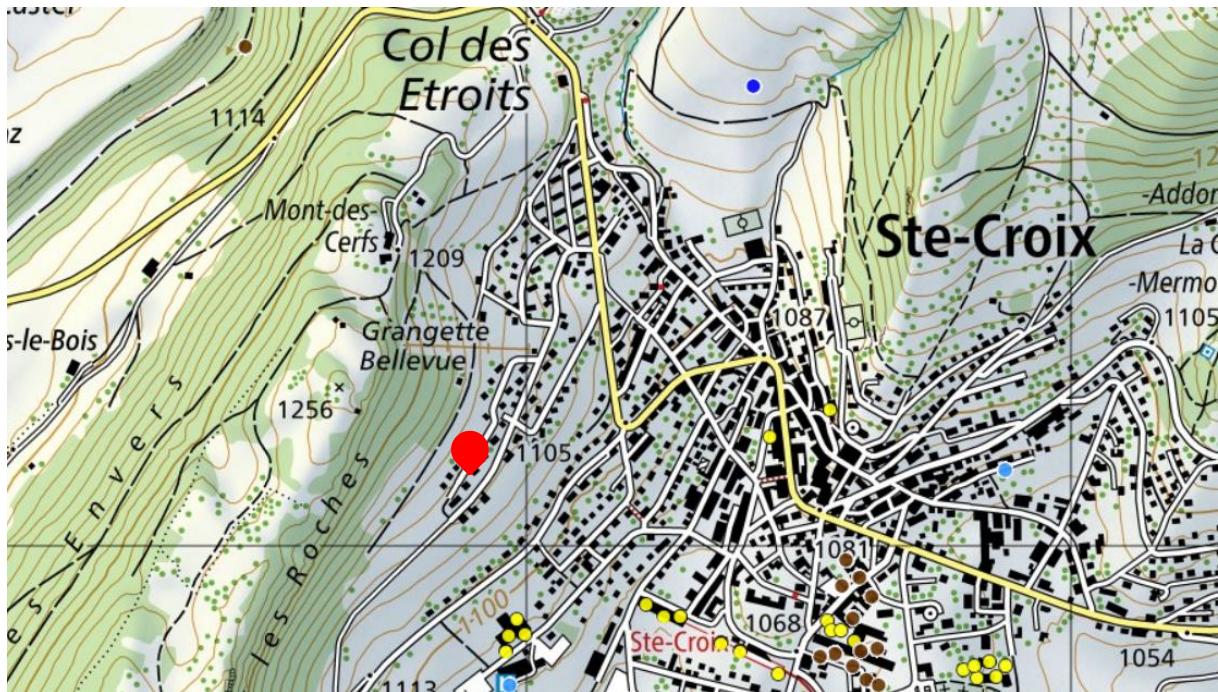


Figure 4 : Cadastre géologique du canton de Vaud (source : geo.vd.ch).

Aucun sondage géologique n'est situé à proximité directe de la zone d'étude. Hormis l'estimation de l'épaisseur des terrains meubles, aucune autre information géologique n'existe dans la zone d'étude.

F1, probabilité de vide : lithologie : marno-calcaire de l’Oxfordien → semi-karstique mais niveau d’inception régional 10 pts
 karstification : élevée en amont de la zone d’étude et faible au droit de la zone d’étude 5 pts
 autre facteur : non
 total F1 : $10 \times 5 =$ **50 pts**

F2, couverture : 2 – 10 m:
 "Epaisseur des terrains meubles" 1 pt
 Cohésion - compacité : inconnue → faible 1 pt
 Perméabilité : inconnue → moyenne 1 pt
 total F2 : $1 \times 1 \times 1 =$ **1 pt**

F3, eau naturelle : infiltration : semi-concentrée 1.1 pt
 Nappe : atteint couverture (niveau d’inception régional) 1.3 pt
 total F3 : $1.1 \times 1.3 =$ **1.43 pt**

F4, facteurs artificiels : infiltration = inf. naturelle x 2
(eau du toit et des aménagements extérieurs infiltrées ne pouvant pas être évacuée plus loin) 2 pts
 Nappe : dans couv. 4 pt
 Surcharge : moyenne 1.5 pt
(on postule que la villa fait moins de deux étages avec un niveau de sous-sol)
 total F4 : $2 \times 4 \times 1.5 =$ **12 pts**

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 = 50 \times 1 \times 1.43 \times 12 = 858$ pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élévé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le Tableau 10 du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité très élevée** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 12)	Champs, parcs jardins, serres plastique,)	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé					
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Variante (pointillé bleu) : si l'on postule que l'eau du toit est évacuée à bonne distance de la villa (infiltration diffuse = 1 pt ; infiltration = inf. naturelle /2 = 0.8 pt), l'on obtient un total de $50 \times 1 \times 1.3 \times 4.8 = 312$ pts, soit une « **dangerosité élevée** ».

Ce cas fictif d'une rénovation d'une villa de taille standard sur des marno-calcaires, avec ses deux variantes pour l'évacuation de l'eau du toit, montre que dans les deux cas, une investigation plus poussée doit être menée.

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3.

Les méthodes d'investigation vont être du même type pour les deux variantes, éventuellement avec une investigation plus légère pour la variante avec évacuation de l'eau. Ces méthodes seront proposées par un bureau spécialisé (ingénieurs, géologues...).

Etant donné l'épaisseur relativement importante de terrain meuble au-dessus du substratum marno-calcaire et le manque de connaissance de la géologie locale, nous préconisons ici de faire des sondages carottés ou des investigations géophysiques. Les sondages permettent de faire des observations directes de la couverture et du toit du rocher, alors qu'une campagne géophysique permet de définir la géométrie du rocher, de détecter d'éventuelles cavités et de définir plus ou moins précisément le type de matériaux meubles en surface.

Imaginons que l'analyse détaillée indique la présence d'un surcreusement pluri-métrique de type Doline ou la présence de cavités karstiques sous un sol d'une épaisseur de couverture comprise entre 5 et 10 mètres, située dans l'emprise du projet de rénovation de la villa.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de rénovation d'une villa dans les marno-calcaires

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol.

Avec la rénovation d'une villa dans des terrains meubles inconnus, d'épaisseur comprise entre 5 et 10 mètres surmontant un substratum marno-calcaire, nous sommes dans la situation d'infrastructure D, « Bâtiments ». Nous entrons verticalement dans la colonne D (flèche).

Sélection des mesures de mitigation

- 1. Éventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Annexe D

Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol*				
			A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâti	E Spéciales
100 Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Meilleure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête					
	102 Reléve d'indices lors du terrassement	Meilleure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre					
200 Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblaiement de la dépression en surface avec des matériaux cohérents et compactables (principe du filtre inverse)	La complexité de l'ouvrage n'est nécessaire au franchissement de l'obstacle n'eût été adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	202 Préparation et remblaiement de la dépression en surface avec des matériaux cohérents et compactables (principe du filtre inverse) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au toit du sous-sol karstifié						
	203 Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravette), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étanchéification ou de colmatage (voir ci-dessous) est envisageable					
300 Report de la charge en profondeur – sur le sous-sol rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité et l'occupation du sol nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	302 Micropièces forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas visible en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambeage selon la taille des cavités recoupées par les micropièces					
	303 Pleux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas visible en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambeage selon la taille des cavités recoupées par les pleux					
	304 Pleux préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tube	Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un béton). Attention également au risque de flambeage en fonction du rapport entre le diamètre des pleux et la hauteur des cavités recoupées par les pleux					
400 Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + filer) ou de coulis minéraux (ciment, microciment + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'enrichissement (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage des vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limono-argileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					
	402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains (résistance à la compression, module d'élasticité), cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains) ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration)						
	403 Injections de compactage verticales ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts					
	404 Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (tableau à argileuse)					
	405 Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différenciels d'ampleur limitée (exemple société Uretel)	②	③			④
500 Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du sous-sol rocheux (gypse, anhydrite, cornue)	501 Si risque de dégradation de la stabilité du sous-sol rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation (sauf si technique/financièrement envisageable de trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur)						
600 Gestion des eaux	601 Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Mise en œuvre de raccordements couplés et visibles aux interfaces terrain/bâti					
	602 Gestion des eaux météoriques et souterraines	Collecte des eaux météoriques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque					
700 Mesures à l'objet	701 Fondations du bâti	Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté					
Renforcement de la résistance du bâti aux déformations	702 Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					

Num. Mesures préventives essentiellement (mitigation d'un risque identifié précisément et la réalisation d'un nouveau aménagement/infrastructure)

Num. Mesures préventives et mesures de renforcement

Num. Mesures préventives et mesures de renforcement dont une œuvre en émission en ingénierie et/ou conditions de site ne doivent pas être mises en termes de perméabilités

Num. Mesures préventives et mesures de renforcement à condition que le bâti soit enfoncé dans un matériau qui n'est pas une œuvre en émission en ingénierie et/ou dont une œuvre en fondation des semelles flottantes

Type d'aménagements, d'infrastructures et d'ouvrages	Occupation du sol	Exemples	Adéquation avec l'occupation du sol		
			A/Sans	B/Légères	C/Linéaires
A/Sans	Absence d'aménagement ou aménagements payagés	Champs, parcs, jardins, serres, parcs aquatiques	Meilleure appropriée		
B/Légères	Infrastructures légères	Terrains de sport, hangars agricoles, serres vitrées	Meilleure appropriée si site ponctuel et de faible emprise		
C/Linéaires	Infrastructures linéaires	Voies de communication routières ou ferroviaires	Meilleure appropriée si site ponctuel et de faible emprise et/ou la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance		
D/Bâti	Bâtimens standards	Crèches, villes, petits immeubles, usines, entrepôts logistiques	Meilleure appropriée		
E/Spéciales	Infrastructures spéciales (complexes, lourdes, de grande hauteur et/ou sensibles)	Gros immeubles, aqueducs d'eau, antennes, éoliennes, conduites forcées souterraines	Securisation du périmètre dangereux et assainissement de l'ouvrage existant ou de l'ouvrage projeté à envisager		

Dans le cas précis, s'agissant d'une rénovation de villa, les mesures 203, 405, 601, 602, 701 et 702, peuvent être envisagées, alors que les autres mesures plausibles semblent inenvisageables selon le contexte géologique ou disproportionnées par rapport à un projet de rénovation d'une villa.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie C ; Roches semi-karstiques ou éventuellement dans la lithologie B ; Roches karstiques carbonatées
- dans la situation de danger S2
- dans le cas de couverture C



3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

Nous partons du principe dans cet exemple, que l'implantation de la véranda ne peut pas être modifiée. La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 203 : comblement de la cavité avec des matériaux filtrants ;
 - 405 : injections de compensation (méthode réservée à des objets existants) ;
 - 601 et 602 : gestion des eaux. Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque ;
 - 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé.

Ces méthodes peuvent se compléter les unes aux autres, mais aussi s'exclure (cf. mesure 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle dans le choix de la méthode !

Exemple d'application UDN 2 : construction d'une centrale hydro-électrique

Commune de Bex, lieu-dit « Grand Moulin »

Création d'une centrale hydro-électrique au fil de l'eau (y compris turbine) dont l'utilisation de l'ouvrage nécessite de limiter le tassement différentiel à 1/1000 (tassement d'un millimètre par mètre linéaire). Le projet se trouve au droit d'un substratum rocheux recouvert d'un imposant dépôt quaternaire constitué de remblais, puis d'alluvions récentes et de dépôts torrentiels et finalement, de dépôts morainiques. L'épaisseur des terrains meubles est supérieure à 20 mètres et localement supérieure à 37 mètres. Plus de 10 dolines sont présentes dans un rayon de 500 mètres du projet.

Etape I : Analyse rapide

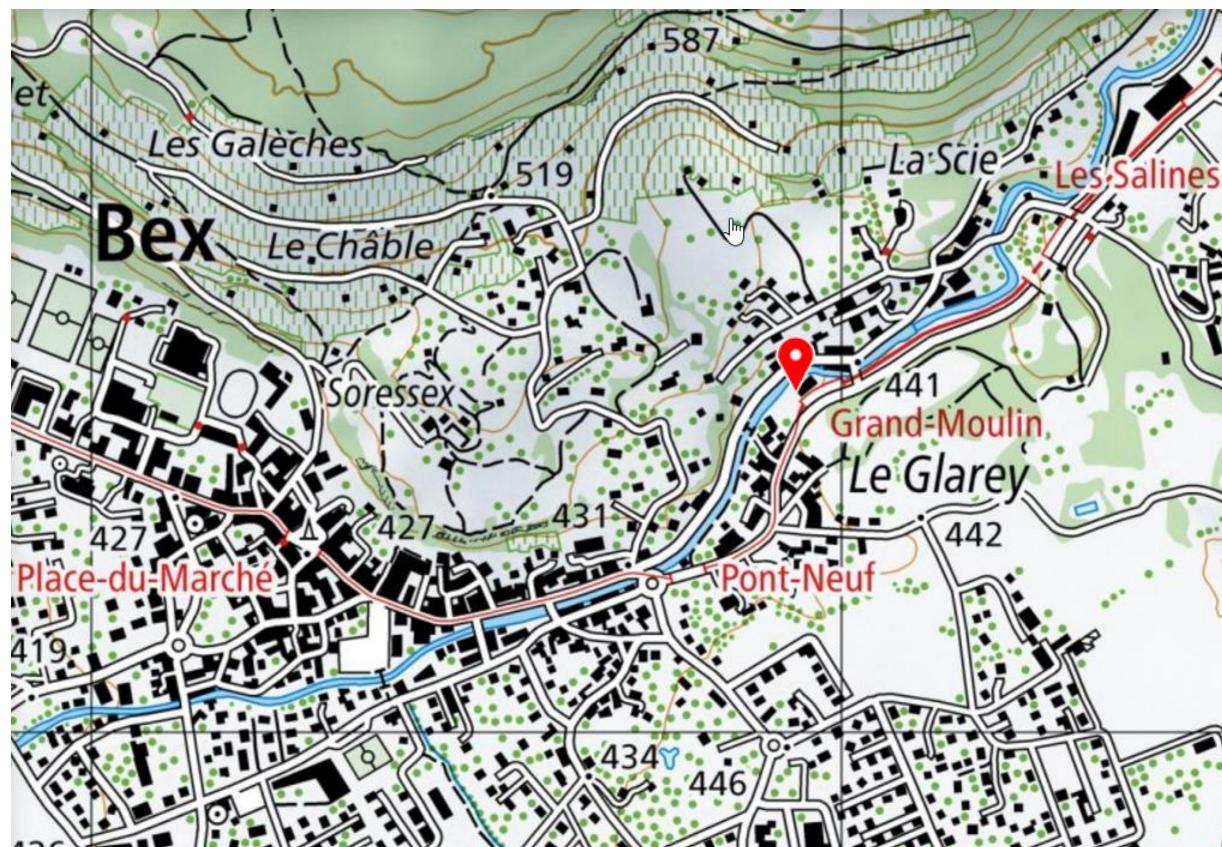


Figure 5 : Projet fictif de création d'une usine hydro-électrique au fil de l'eau dans un quartier déjà construit.

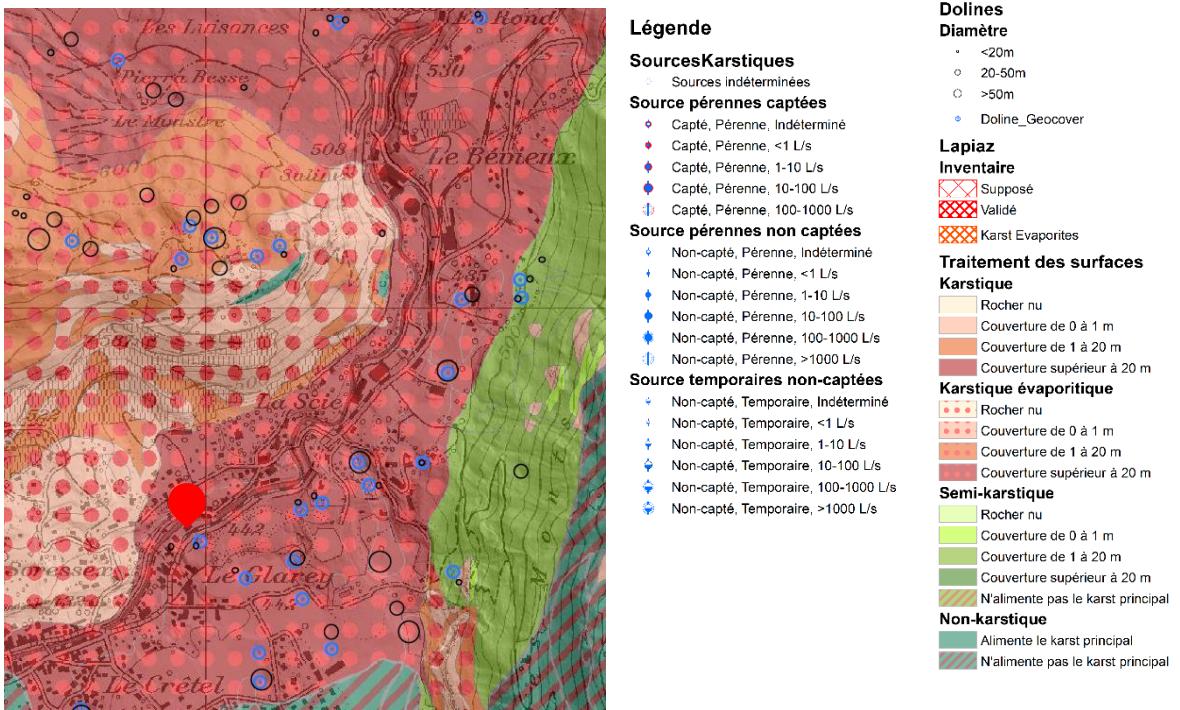


Figure 6 : Carte de l'aléa « karst » de l'ISSKA avec épaisseur des terrains meubles au-dessus du substratum gypseux (supérieure à 20 mètres au droit du site d'étude), sources karstiques et position des dolines.

Le substratum rocheux au droit de la zone d'étude est composé de gypses et d'anhydrites du Trias de la nappe de Bex. Celui-ci est recouvert par d'imposants dépôts quaternaires, respectivement depuis la surface des remblais, des alluvions récentes et des dépôts torrentiels et de la moraine indifférenciée. L'épaisseur des terrains meubles est supérieure à 20 mètres. Des sondages mettent en évidence une couverture quaternaire localement supérieure à 37 mètres. Plus de 10 dolines sont recensées dans un rayon de moins de 500 mètres du projet de la centrale hydro-électrique.

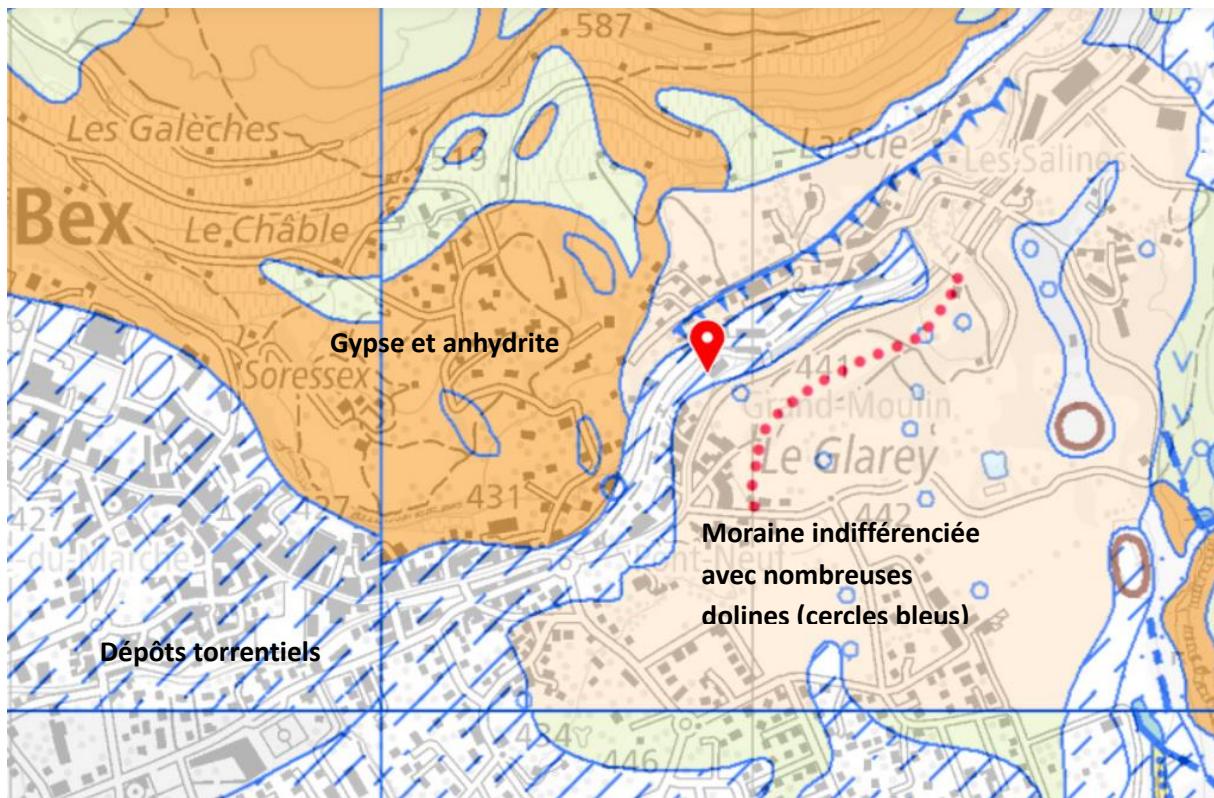


Figure 7 : Carte géologique vectorisée (source : map.geo.admin.ch).

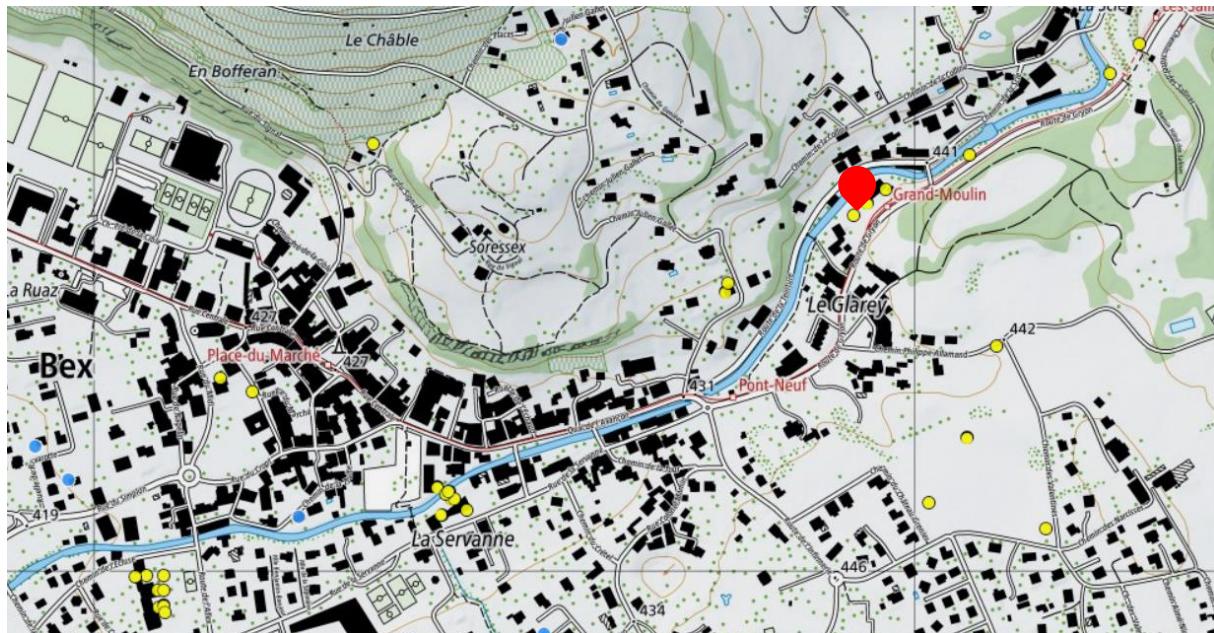


Figure 8 : Cadastre géologique du canton de Vaud (source : geo.vd.ch).

Trois sondages carottés sont situés au droit de la parcelle du projet de la centrale hydro-électrique. Leur profondeur est respectivement de 35.7 mètres, 27.8 mètres et 36 mètres. Ces forages mettent en évidence les terrains suivants :

a) Remblais

Ces dépôts artificiels ont été observés à l'emplacement de tous les forages jusqu'à une profondeur de 3.0 à 8.2 mètres. Ils sont composés de blocs et pierres (environ 50%) avec des graviers grossiers bien gradués dans une matrice de sable avec parfois un peu de limon. Ils sont jugés moyennement à très compacts. La perméabilité de cette formation est estimée entre 5×10^{-5} et 5×10^{-3} m/s.

b) Alluvions

Ces dépôts ont été observés jusqu'à une profondeur comprise entre 13.0 et 16.5 mètres. Ils sont composés de pierres à graviers grossiers dans une matrice de sable fin avec un peu de limon et de sable-limoneux. Ces alluvions sont compactes à très compactes avec des passes localement moyennement compactes. La perméabilité de cette formation est estimée entre 5×10^{-6} et 5×10^{-3} m/s.

c) Moraine

Ces dépôts sont observés jusqu'à une profondeur comprise entre 23 et plus de 36 mètres. Il s'agit d'alternances métriques de graviers grossiers avec des sables fins limoneux, des sables fins limoneux avec peu de graviers fins et des limons sableux avec peu de graviers grossiers et de pierres. Quelques blocs calcaires et de gypse altérés sont présents dans cette moraine. La compacité des passes grossières est jugée moyennement compacte à compacte, alors que les passes fines sont caractérisées par une consistance ferme à très ferme. La perméabilité de cette formation est estimée entre 5×10^{-8} et 5×10^{-6} m/s.

d) Anhydrite bréchique

Le rocher composé d'anhydrite bréchique a été rencontré dans 2 forages à une profondeur située entre 23 et 26 mètres. A noter que le sondage exécuté jusqu'à une profondeur de 36 mètres n'a jamais atteint le substratum rocheux. Ce rocher est composé de conglomérats à éléments arrondis et anguleux millimétriques à centimétriques, d'anhydrite gris foncé dans une matrice de gypse et d'anhydrite gris clair à blanc. La dureté de ce rocher est jugée modérément élevée. La densité de fracturation du substratum rocheux est très faible. Les rares fissures sont rugueuses, peu ouvertes et sans remplissage.

Ces sondages mettent en évidence la présence de nombreux morceaux de gypse altéré dans la moraine. Un vide (cavité ?) de 1.2 mètres de hauteur et de largeur inconnue est observé dans l'un des sondages entre 28.3 et 29.5 mètres de profondeur. Une ancienne cavité comblée avec du matériel glaciaire altéré est également observée dans l'un des sondages entre 31.3 et 32.2 mètres. De plus, une érosion par dissolution karstique des fissures, localement colmatées par du gypse altéré et de la calcite, est observée dans l'un des forages entre 29 et 30 mètres de profondeur.

Hydrogéologie

Lors de l'exécution de ces 3 sondages, des venues d'eau ont été observées à 15 mètres et à 20 mètres de profondeur dans les dépôts morainiques et à 8.3 mètres dans les alluvions.

Le toit de l'aquifère est situé entre 12.88 et 16.03 mètres de profondeur par rapport au terrain naturel. La moraine est le siège de circulations d'eau à la faveur de veines et horizons plus perméables. Une nappe pérenne dans les sables fins du toit de la moraine est donc identifiée.

A priori, les alluvions récentes ne sont pas le siège d'une nappe phréatique et ne semblent pas être alimentées par l'Avançon. Des circulations d'eau peuvent toutefois exister dans ces alluvions en période de précipitations.

F1, probabilité de vide : lithologie : gypse et anhydrite (Nappe de Bex) 30 pts
 Karstification : élevée 10pts
 Autre facteur : non
 total F1 : $30 \times 10 = 300$ (limité à :) **100 pts**

F2, couverture : 2 – 10 m:
 "Epaisseur des terrains meubles" (20 à 50 mètres) 0.8 pt
 Cohésion - compacité : moyenne à élevée 0.5 pt
 Perméabilité : moyenne comprise généralement entre 1E-04 à 1E-07 1 pt
 total F2 : $0.8 \times 0.5 \times 1 =$ **0.4 pt**

F3, eau naturelle : infiltration : diffuse 1 pt
 Nappe : dans couverture 1.2 pt
 total F3 : $1 \times 1.2 =$ **1.2 pt**

F4, facteurs artificiels : infiltration = inf. naturelle 1 pts
 Nappe : hors couverture. 1 pt
 Surcharge : élevée à moyenne (remblai et infrastructure lourde) 2 pt
 total F4 : $1 \times 1 \times 2 =$ **2 pts**

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 = 100 \times 0.4 \times 1.2 \times 2 = 96$ pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le Tableau 10 du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité moyenne** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 12)	Champs, parcs jardins, serres plastique,)	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé				Investigations conseillées	
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3.

La parcelle d'étude a fait l'objet d'une investigation géotechnique à l'aide de 3 sondages carottés qui mettent en évidence des vides karstiques. Au vu de la complexité et sensibilité du projet, une investigation hydrogéologique sur une durée plus longue et une investigation géophysique du fond de fouille de la future centrale hydroélectrique, afin de détecter l'extension des vides et cavités existantes et potentielles, pourraient être préconisées pour améliorer la connaissance des paramètres F1 et F3.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de construction d'une centrale hydro-électrique sur un substratum gypseux sous couverture épaisse

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol.

Avec la construction d'une centrale hydro-électrique dans des terrains meubles d'épaisseur comprise entre 23 et plus de 36 mètres surmontant un substratum gypseux, nous sommes dans la situation d'infrastructure E, « Spéciales ». Nous entrons verticalement dans la colonne E (flèche).



● 1. Éventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol *				
			A Sans	B Légères	C Unitaires	D Bâtiments	E Spéciales
100 Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projets y préte					
	102 Relèvement d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre					
200 Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé)	La complexité de l'ouvrage n'est nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'âle identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	202 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au talus du coussinément latéral						
	203 Comblement des cavités avec un matériau filtrant (sable ou gravier), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étanchéification ou de consolidation (voir ci-dessous) est envisageable					
300 Report de la charge en profondeur – sur le coussinément rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage n'est nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'âle identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	302 Micropileux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités récupérées par les micropileux					
	303 Pieux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités récupérées par les pieux					
	304 Pieux préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tube	Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un béton). Attention également au risque de flambage en fonction du rapport entre le diamètre des pieux et la hauteur des cavités récupérées par les pieux					
400 Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment, filier) ou de coulis minéraux (ciment, microciment + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'étanchéification (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de l'espace – vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limono-argileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					
	402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains (réduction de la plasticité et/ou de la cohésion) par remplissage des vides d'élargissement, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'elasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration))						
	403 Injections de compactage verticales ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts					
	404 Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (sableuse à argileuse)					
	405 Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différemment d'amplitude limitée (exemple société Urestek)	②	③			④
500 Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du coussinément rocheux (gypse, anhydrite, cornéite)	501 Si risque de dégradation de la stabilité du coussinément rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation (auvergade de l'objet exposé sauf si technique/financièrement envisageable de trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur)						
600 Gestion des eaux	601 Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Mise en œuvre de raccordements souples et visibles aux interfaces terrain/bâti					
	602 Gestion des eaux météorologiques et souterraines	Collecte des eaux météorologiques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque					
700 Mesures à l'objetc	701 Fondations du bâti	Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté					
	702 Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					

Num. Mesures préventives associées à l'opération d'un nouveau coussinément/infrastructure
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont la mise en œuvre est efficacement envisageable et les conditions de réalisation peuvent être rencontrées en termes de perméabilité
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation (à condition que le bâti existant soit fondé sur un radier monolithique ou en créant une carrière en sein armé si le site existant est tenu sur des éléments flottants)

Num. Mesures de remédiation uniquement
Num. Mesures constructives à réaliser avant la réalisation (construction) du projet
Num. Mesure à prendre dans le cadre de l'avant-projet
Num. Mesure en lien avec la gestion des eaux
Num. Mesures constructives à l'objetc – renforcement du bâti aux deformations potentielles

***Adéquation avec l'occupation du sol**
Type d'occupation, infrastructures et dommages Occupation du sol Exemples Appréciation

- A sans Absence d'aménagement
- B légères Infrastructures légères Champs, parcs, jardins, serres, plantations
- C unitaires Infrastructures linéaires Voies de communication routières ou ferroviaires
- D bâtiments Bâtiments standards Châteaux, villes, petits immeubles, usines, entrepôts logistiques
- E spéciales Infrastructures spéciiales (commerciales, lourdes, de grande hauteur et/ou sensibles) Parcs, aéroports, aéroports d'atterrissage, antennes, éoliennes, conducteurs fortes tensions

① Rapport détaillé des mesures / valeur du bien à protéger ou à construire disproportionately
② Rapport détaillé des mesures / valeur du bien à protéger ou à construire disproportionately
③ Peut s'intégrer à faire en fonction de la valeur du bien à protéger
④ Pas ou peu protégé car des infrastructures sont nécessaires pour assurer le fonctionnement et l'exploitation / déplacement de l'ouvrage éventuellement à envisager

Dans le cas précis, s'agissant de la construction d'une centrale hydro-électrique très sensible au tassement, les mesures 102, 601, 602, 701 et 703 sont vivement recommandées, alors que les mesures 101, 203, 303, 304 et 405 sont appropriées si l'aléa est jugé ponctuel et de faible ampleur et si elles sont engagées en parallèle d'un dispositif de surveillance.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A ; Roches karstiques sulfatées
- dans la situation de danger S3
- dans le cas de couverture C



Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

Nous partons du principe dans cet exemple que l'implantation d'une centrale hydro-électrique au fil de l'eau ne peut pas être modifiée.

La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**). Les mesures - peuvent également être mise en œuvre car la valeur du projet et sa haute sensibilité est suffisante et devraient être privilégiées. Comme les mesures + et ++, celles-ci peuvent être également combinées.

- 101 : terrassement (+)
 - 102 : relevé d'indices lors du terrassement (+)
 - 301 : ouvrage d'art (-)
 - 302 : micro-pieux forés armés (++)
 - 303 : pieux forés armés (-)
 - 304 : pieux préfabriqués (-)
 - 401 : injections d'étanchement (++)
 - 403 : injections de compactage (-)
 - 404 : colonnes jettées (-)
 - 405 : injections de compensation (méthode réservée à des objets existants)
 - 501 : renoncer ou déplacer (++) (dans ce cas impossible car situation du projet imposée par le site)
 - 601 et 602 : gestion des eaux. Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque (++)
 - 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé (++)

Ces méthodes peuvent se compléter les unes aux autres mais aussi s'exclure (cf. mesure 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle dans le choix de la méthode !

Etant donné que ce projet se base sur un cas réel, le bureau d'ingénieurs a préconisé les mesures suivantes :

- 102 : relevé d'indices lors du terrassement (+)
- 303 : pieux forés armés (-)
- 404 : colonnes jettées (-)
- 601 et 602 : gestion des eaux. Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque (++)
- 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé (++)

Exemple d'application UDN 3 : construction d'une villa individuelle de 2 étages et d'un sous-sol

Commune de Villeneuve, lieux-dits « Valleyre » - « Le Verger »

Création d'une villa individuelle de 2 étages et d'un niveau de sous-sol. Le projet se trouve au droit d'un imposant dépôt quaternaire, constitué de dépôts torrentiels recouvrant des dépôts morainiques rhodaniens. L'épaisseur de terrain meuble est supérieure à 20 mètres selon les données de l'épaisseur du quaternaire (modèle cantonal et carte de l'aléa karst de l'ISSKA). Un sondage géologique au droit de la zone d'étude met en évidence plus de 75 mètres de terrains meubles sans atteindre le substratum rocheux. Le substratum rocheux est composé de diverses roches triasiques de la nappe des Préalpes méridionales (cornieules, dolomies et brèches calcaires). Une dizaine de dolines sont présentes dans un rayon de 600 mètres au Sud du projet, dont 2 sont situées à moins de 200 mètres de la zone de projet.

Etape I : Analyse rapide

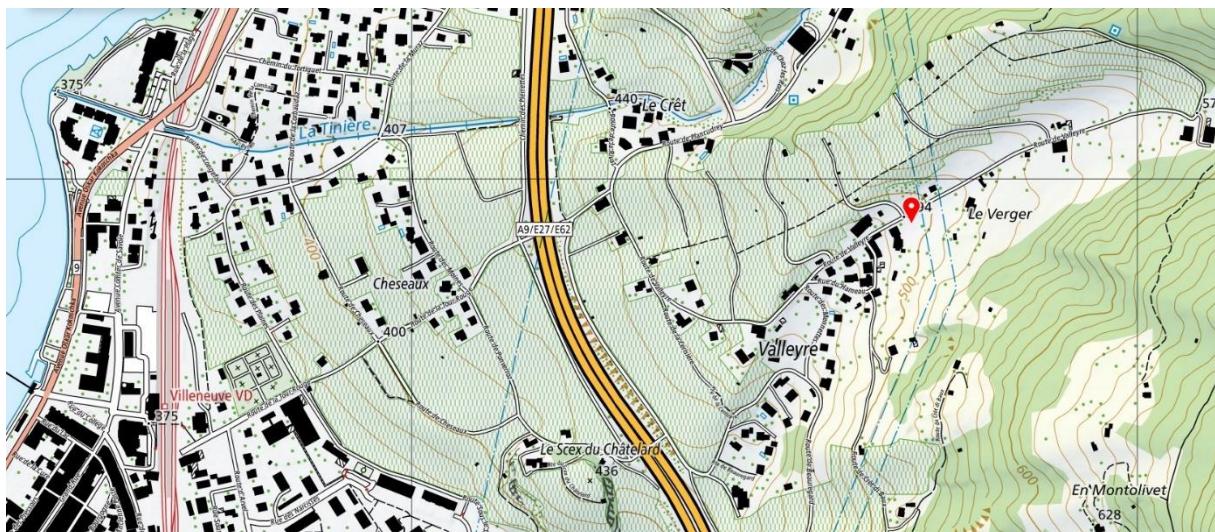


Figure 9 : Projet fictif de création d'une villa individuelle en amont d'un quartier déjà construit.

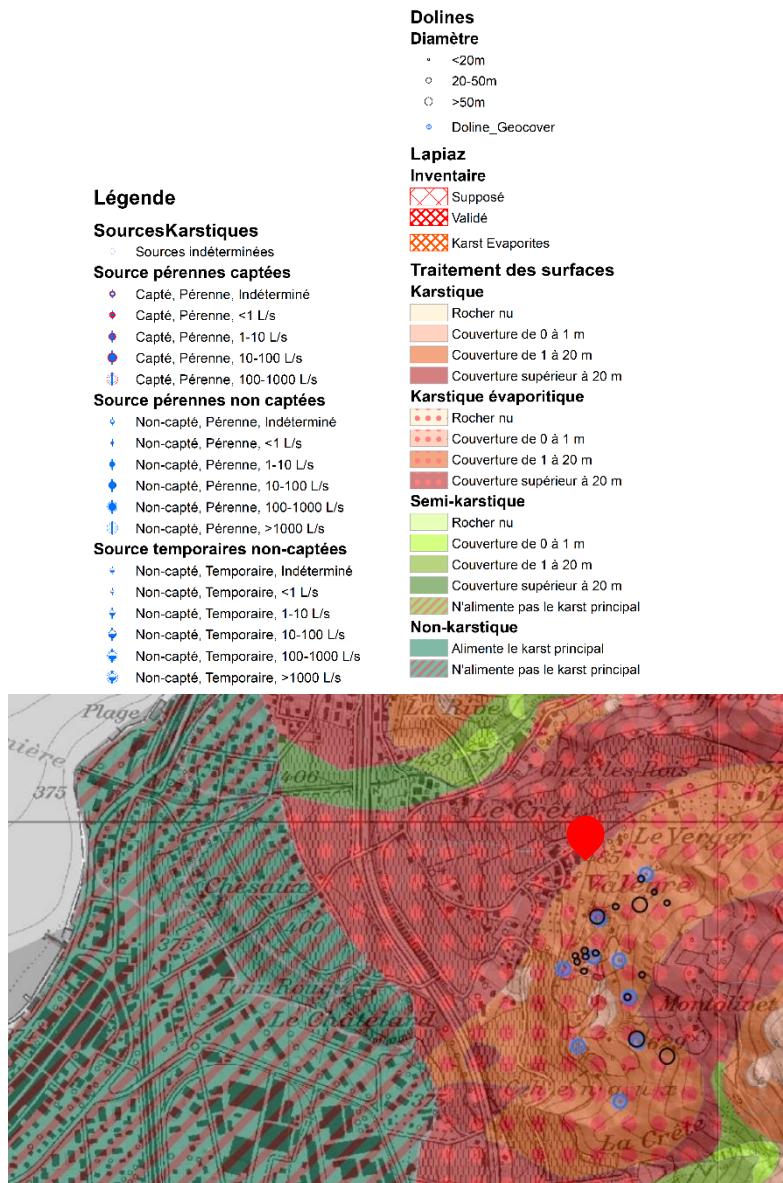


Figure 10 : Carte de l'aléa « karst » de l'ISSKA avec épaisseur des terrains meubles au-dessus du substratum gypseux (supérieure à 20 mètres au droit du site d'étude), sources karstiques et position des dolines.

Le substratum rocheux au droit de la zone d'étude est composé de cornieules, marnes, dolomies et calcaires bréchiques du Trias de la nappe des Préalpes médianes. Au droit de la zone d'étude, le substratum rocheux est recouvert par d'imposants dépôts quaternaires, soit des dépôts torrentiels et de la moraine rhodanienne indifférenciée. L'épaisseur de terrain meuble est estimée à plus de 20 mètres. Une dizaine de dolines sont présentes dans un rayon de 600 mètres au Sud du projet, dont 2 sont situées à moins de 200 mètres de la zone de projet.

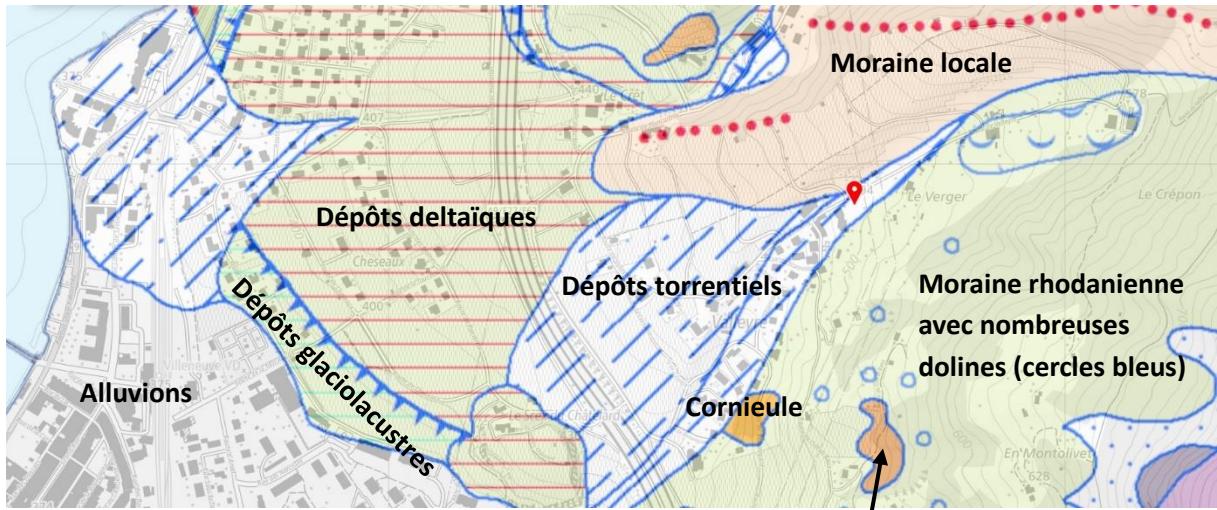


Figure 11 : Carte géologique vectorisée (source : map.geo.admin.ch).

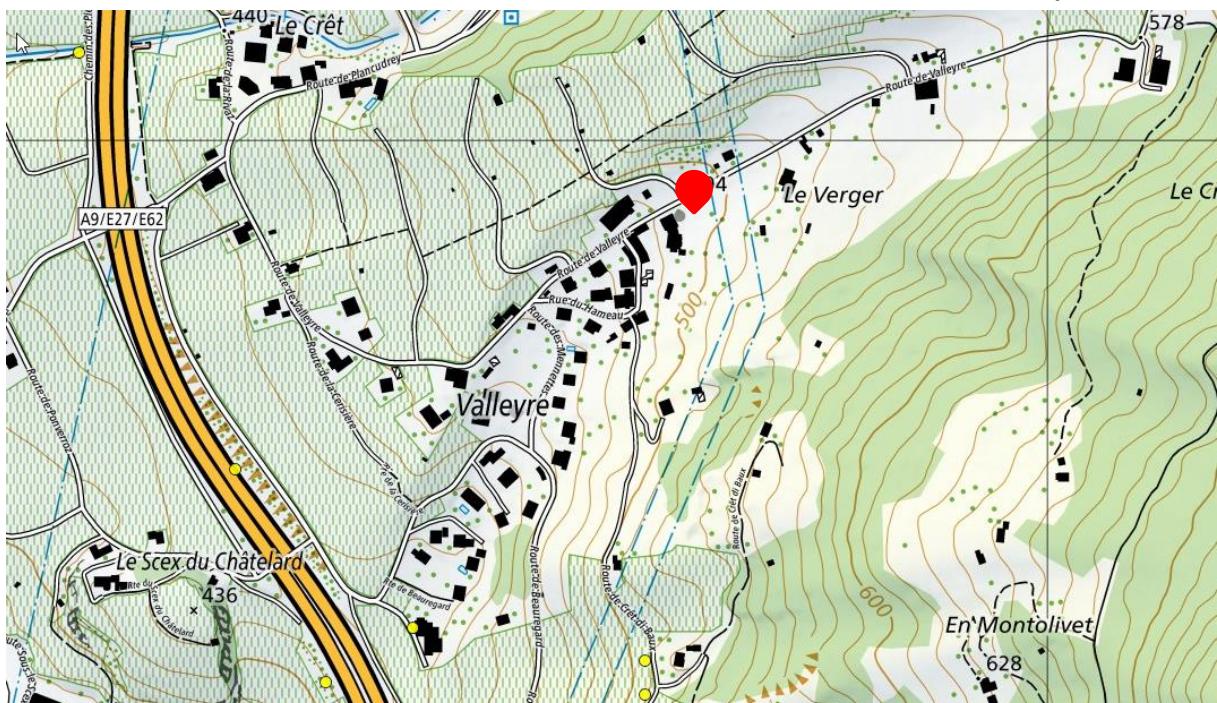


Figure 12 : Cadastre géologique du canton de Vaud (source : geo.vd.ch).

Un seul sondage carotté est situé à proximité de la parcelle du projet fictif de construction d'une maison individuelle. Sa profondeur est de 75 mètres. Il met en évidence les terrains suivants :

a) Terre végétale

Son épaisseur est de 0.4 mètres.

b) Matériel de déjection (alluvions en cône)

Ces dépôts sont observés jusqu'à une profondeur de 7.4 mètres. Il s'agit d'alternances métriques à plurimétriques de limon organique, de limon finement sableux et graveleux, ainsi que de gravier grossier et de pierres dans une matrice limono-organique. Des passages de gypse et des passages sablo-limoneux sont observés dans cette formation.

c) Matériaux de remplissage de doline

Ces matériaux sont observés jusqu'à une profondeur de 55 mètres. Ils sont composés :

- d'alternances de limon organique avec des niveaux de charbon très fins,
- de limon organique argileux alternant avec de la tourbe argilo-limoneuse avec des morceaux de bois décomposés,
- de tourbe argilo-limoneuse avec beaucoup de bois non décomposé et des débris organiques divers
- de limon organique avec des débris de bois passant à des limons peu argileux mous avec sable et gravier.

La présence de vides a été observée dans ces matériaux.

d) Moraine remaniée

Cette formation est observée jusqu'à une profondeur de 75 mètres. Elle est constituée de limon graveleux et peu argileux cohésif avec des pierres.

Hydrogéologie

Aucune information particulière sur la présence de nappe ou de venues d'eau dans le sondage carotté décrit précédemment n'existe dans ce secteur.

F1, probabilité de vide : lithologie : roches évaporitiques du Trias (Nappe des Préalpes médianes)

30 pts

Karstification : faible au droit du projet et élevée à proximité → moyenne

5 pts

Autre facteur : non

total F1 : $30 \times 5 = 150$ (limité à :) **100 pts**

F2, couverture :

"Epaisseur des terrains meubles" (plus de 70 mètres, soit 20 à 50 mètres) 0.8 pt

Cohésion - compacité : moyenne 0.5 pt

Perméabilité : faible inférieure à 1E-07 0.5 pt

total F2 : $0.8 \times 0.5 \times 0.5 =$ **0.2 pt**

F3, eau naturelle : infiltration : concentrée (talweg avec concentration eau ruissellement)

1.3pt

Nappe : dans couverture 1.2 pt

total F3 : $1.3 \times 1.2 =$ **1.56 pt**

F4, facteurs artificiels : infiltration = inf. naturelle

1 pt

Nappe : hors couverture. 1 pt

Surcharge : moyenne 1 .5 pt

total F4 : $1 \times 1 \times 1.5 =$ **1.5 pts**

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 = 100 \times 0.2 \times 1.56 \times 1.5 = 46.8$ pts

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élevé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le Tableau 10 du rapport (ci-dessus) → « dangerosité modérée ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 12)	Champs, parcs jardins, serres plastique,)	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé				Investigations conseillées	
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Etape II. Analyse détaillée

Une analyse bibliographique et des observations de terrain doivent être effectuées dans tous les cas, comme stipulé dans le chapitre 3.

Les méthodes d'investigation seront proposées par un bureau spécialisé (ingénieurs, géologues...). Etant donné l'épaisseur importante de terrain meuble au-dessus du substratum triasique et le manque de connaissance de la géologie locale, nous préconisons ici de faire des sondages carottés ainsi que des investigations géophysiques sur le fond de fouille du projet de villa. Les sondages permettent de faire des observations directes de la couverture, de préciser sa compacité - cohésion, sa perméabilité et la présence de nappe. Une campagne géophysique permet de définir des géométries suspectes, telles que des remplissages d'anciennes dolines, la présence potentielle de nappe dans les terrains quaternaires, de détecter d'éventuels vides et de définir plus ou moins précisément le type de matériaux meubles en surface.

Imaginons que l'analyse détaillée indique la présence d'anciennes dolines et de vides (dissolution de blocs gypseux) situés dans l'emprise du projet de rénovation de la villa.

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de rénovation d'une villa dans un substratum triasique avec une couverture quaternaire épaisse

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**.

Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol.

Avec la construction d'une villa de 2 étages avec un niveau de sous-sol dans des terrains meubles inconnus d'épaisseur supérieure à 70 mètres surmontant un substratum composé de roches évaporitiques, nous sommes dans la situation d'infrastructure D, « Bâtiments ». Nous entrons verticalement dans la colonne D (flèche).

Sélection des mesures de mitigation

Annexe D

1. Éventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol*				
			A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâtimen ts	E Spéciales
100 Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête					●
	102 Relevé d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre					●
200 Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé)	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					●
	202 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au toit du sous-bassement karstifié						●
	203 Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravette), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités		En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étanchéification ou de consolidation (voir ci-dessous) est envisageable				●
300 Report de la charge en profondeur – sur le sous-bassement rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'île identifiée. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					●
	302 Micropile fonds arrêtés (mention : car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tube de perçage perdus		Attention également au risque de flamboage selon la taille des cavités recoupées par les micropiles				●
	303 Pleu fonds arrêtés (mention : car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tube de perçage perdus		Attention également au risque de flamboage selon la taille des cavités recoupées par les pieux				●
	304 Pleu préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tube		Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (érosion dans un béton). Attention également au risque de flamboage en fonction du rapport entre le diamètre des pieux et la hauteur des cavités recoupées par les pieux				●
400 Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + filer) ou de couteaux minéraux (ciment, mercurement + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'étanchéification (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de la porosité – vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limonoargileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					●
	402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains [résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains] ou du massif rocheux [résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration])						●
	403 Injections de compactage verticales ou inclinées		Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts				●
	404 Colonnes jetées verticales ou inclinées		Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (sableuse à argileuse)				●
	405 Injections de compensation		Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différenciels d'amplitude limitée (exemple société Urest)	②	③		④
500 Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du sous-bassement rocheux (gypse, anhydrite, cornéole)	501 Si risque de dégradation de la stabilité du sous-bassement rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation/sauvegarde de l'objet exposé sauf si technique/financement/économique envisageable de trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur						
600 Gestion des eaux	601 Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Mise en œuvre de raccordements souples et visibles aux interfaces terrain/bâti					
	602 Gestion des eaux météoriques et souterraines	Collecte des eaux météoriques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque					
700 Mesures à l'objet	701 Fondations du bâti	Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté					
	702 Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					

Num. Mesures préventives essentiellement (mitigation d'un risque identifié précisément et à réaliser avec un nouveau aménagement/infrastructure)	Num. Mesures de remédiation uniquement	Type d'aménagement, constructions et dressage	Occupation du sol	Exemples	Appréciations	Report coût des mesures / valeur du bien à protéger ou à construire disproportionnée
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation	Num. Mesures constructives à réaliser avant la réalisation (construction) du projet	A/Des	Absence d'aménagement ou aménagements payants	Champs, pêches, jardins, serres plastiques	Meilleure appréciation	① Report
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont le bâti existant est efficacement envisageable si les conditions sont vérifiées par une étude en termes de perméabilité	Num. Mesures en lien avec la gestion des eaux	B/Légères	Infrastructures légères	Terrains de sports, hangars agricoles, serres vitrées	Meilleure appréciation : aide ponctuelle et de faible ampleur	② Report
Num. Mesures préventives et mesures de remédiation (à condition que le bâti existant soit fondé sur un radier monolithique et en créant une ceinture de béton armé si le bâti existant est fondé sur des zones de failles)	Num. Mesures constructives à l'objets – renforcement du bâti aux déformations potentielles	C/Linéaires	Infrastructures linéaires	Voies de communication routières ou ferroviaires	Meilleure appréciation : aide ponctuelle et de faible ampleur et/ou le mise en œuvre d'un dispositif de surveillance et/ou le report à une date ultérieure	③ Peut être intégrée à l'ouvrage en fonction de la valeur du bien à protéger
		D/Bâtimen	Édifices standards	Crèches, villes, petits immeubles, usines, entrepôts logistiques	Meilleure appréciation : aide ponctuelle et de faible ampleur	④ Des peu propres car des infrastructures spéciales sont généralement toutes en pierre ou en béton et nécessitent un déplacement de l'ouvrage existant ou de faire projeter à enlever
		E/Spéciales	Infrastructures spéciales (comptoirs, tourées, de grande hauteur et/ou sensibles)	Immeubles, bâtiments, constructions industrielles	Réduction du périmètre engagé et extension de l'ouvrage existant ou de faire projeter à enlever	⑤ Report

Dans le cas précis, s'agissant d'une construction d'une villa de 2 étages et d'un niveau de sous-sol, les mesures 101, 102, 301, 302, 303, 304, 401, 402, 403, 404, 601, 602, 701 et 702, sont envisageables, alors que les autres mesures plausibles semblent inenvisageables selon le contexte géologique ou disproportionnées par-rapport à un projet de construction d'une villa.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A ; Roches karstiques sulfatées
- dans la situation de danger S4
- dans le cas de couverture C

3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Urgibilité	Situation de danger considérée	100 Décapage		200 Comblement			300 Report de la charge en profondeur				400 Traitements de terrain				500 Projet		600 Gestion des eaux		700 Mesures à l'objet			
		Taille soline (g/1)		101	102	201	202	203	301	302	303	304	401	402	403	404	405	501	601	602	701	702
		Couverture	Type de sol	Terrassement	Relevé d'hydrostatique	Remblayage	Remblayage + remblayage en béton armé	Combâtement	Ouvrage d'art	Micro-pièux forés armés	Pièces fortes armées	Pièces préfabriquées	Injections de détachement	Injections de consolidation	Injections de compensation	Colonnes jetées	Réseaux d'eau	Eaux superficielles et souterraines	Fondations	Structure		
B - Rochers basiques et/ou calcaires (environnement forestier ou surfaces boisées, îles et massifs rocheux et/ou roches isolées et/ou roches disséminées dans des sols superficiels, îles et massifs rocheux et/ou roches disséminées dans des sols superficiels)	S1	R	M	++	++	++	++						++	++	++	++	++	++	++	++	++	
		CM	++	++	++	++							++				++	+	++	++	++	
	S2	R	M	+	+																	
		CM	++	++	++	++																
	S3	R	M	++	++	++	++															
		CM	++	++	++	++																
	S4	R	M	++	++	++	++															
		CM	++	++	++	++																
		R	+	+	+																	
		C	+	+																		
B - Rochers basiques et/ou calcaires (environnement forestier ou surfaces boisées, îles et massifs rocheux et/ou roches disséminées dans des sols superficiels)	S5	R	M	++	++	++		-	++	-	-	++	++			++	++	++	++	++	++	
		CM	++	++	++											++	++	++	++	++	++	
	S6	R	M	+	+																	
		CM	+	+																		
	S1	R	M	++	++	++	++	++	++													
		CM	++	++	++	++																
	S2	R	M	++	++	++	++	++														
		CM	++	++	++	++																
	S3	R	M	++	++	++	++	++														
		CM	++	++	++	++																
C - Roches semi-érosives	S4	R	M	++	++	++	++	++	++	-	++	-										
		CM	++	++	++	++																
	S5	R	M	+	+																	
		CM	++	++	++	++																
	S6	R	M	+	+																	
		CM	++	++	++	++																
	S1	R	M	++	++	++	++	++	++													
		CM	++	++	++	++																
	S2	R	M	+	+																	
		CM	+	+																		
C - Roches semi-érosives	S3	R	M	++	++	++	++	++	++													
		CM	++	++	++	++																
	S4	R	M	+	+																	
		CM	+	+																		
	S5	R	M	++	++	++	++	++	++													
		CM	++	++	++	++																
	S6	R	M	+	+																	
		CM	+	+																		
		R	M	++	++	++	++	++	++													
		CM	++	++	++	++																

Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.

Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.

Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.

Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

Nous partons du principe dans cet exemple que l'implantation de la villa ne peut pas être modifiée. La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**) :

- 302 : micro-pièux forés armés ;
- 601 et 602 : gestion des eaux. Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque ;
- 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé.

Ces méthodes peuvent se compléter les unes aux autres mais aussi s'exclure. Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle dans le choix de la méthode !

Les mesures 101, 102 et 401 semblent peu plausibles à cause de la très grande épaisseur de terrains quaternaires au-dessus du substratum triasique, tout comme l'injection de compensation (mesure 405) qui est spécifique au bâti existant.

Exemple d'application UDN 4 : construction d'un chalet de 3 étages et d'un sous-sol

Commune de Gryon, route du Perrey

Création d'un chalet de 3 étages et d'un niveau de sous-sol. Le projet se trouve au droit d'un imposant dépôt quaternaire, constitué principalement de dépôts morainiques. L'épaisseur de terrain meuble est supérieure à 20 mètres selon les données de l'épaisseur du quaternaire (modèle cantonal et carte de l'aléa karst de l'ISSKA). 4 sondages géologiques au droit de la zone d'étude mettent en évidence plus de 30 mètres de terrains meubles sans atteindre le substratum rocheux. Celui-ci est composé de gypse et d'anhydrite et, localement, de cornieule du Trias de la nappe de Bex – Laubhorn. De nombreuses dolines sont présentes à proximité directe du projet. L'une d'elle se situe d'ailleurs au droit de la zone du projet.

Etape I : Analyse rapide

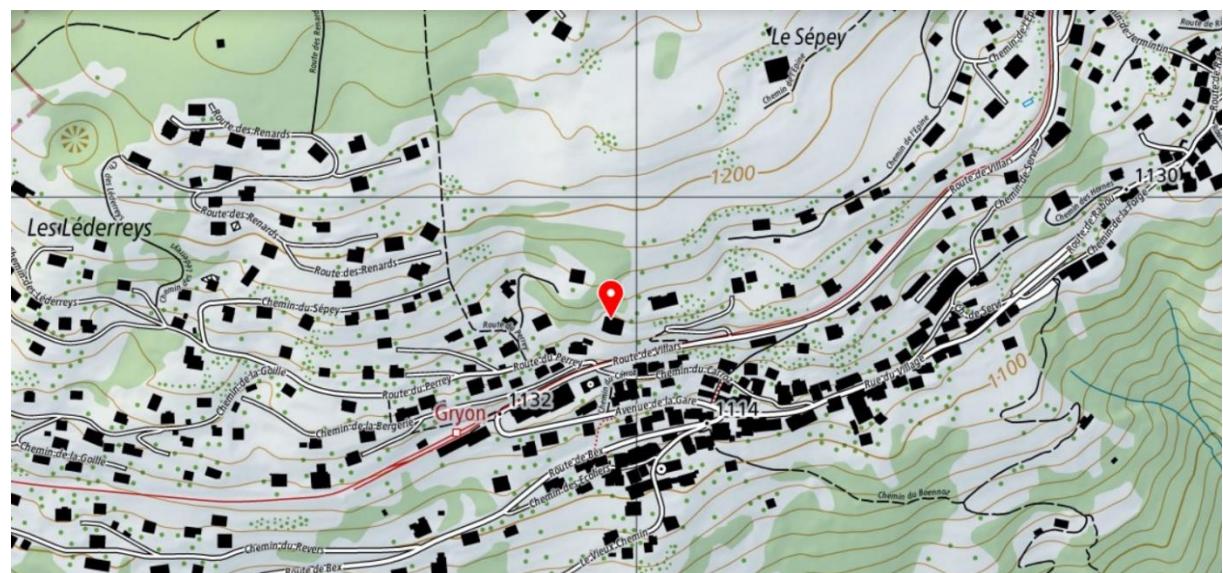


Figure 13 : Projet fictif de création d'un chalet de 3 étages avec un niveau de sous-sol en amont d'un quartier déjà construit.

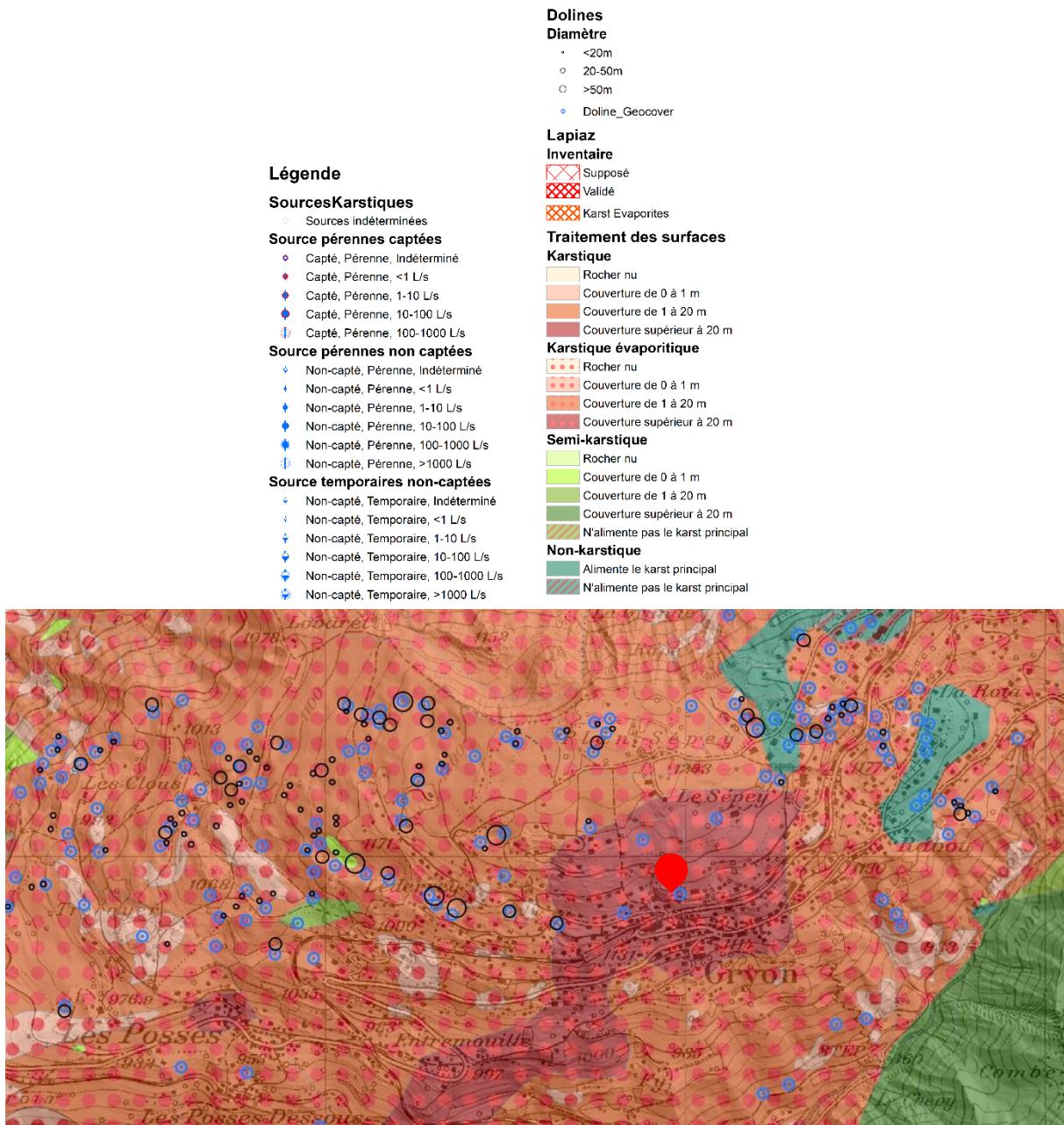


Figure 14 : Carte de l'aléa « karst » de l'ISSKA avec épaisseur des terrains meubles au-dessus du substratum gypseux (supérieure à 20 mètres au droit du site d'étude), sources karstiques et position des dolines.

Au droit de la zone d'étude, le substratum rocheux est recouvert par d'imposants dépôts quaternaires supérieurs à 30 mètres d'épaisseur, soit depuis la surface de remblais, de colluvions, de dépôts d'éboulements et de moraine de fond (glaciaire local). L'épaisseur des terrains meubles est supérieure à 30 mètres. De nombreuses dolines sont présentes à proximité du projet, dont l'une est située au droit de la zone de projet.

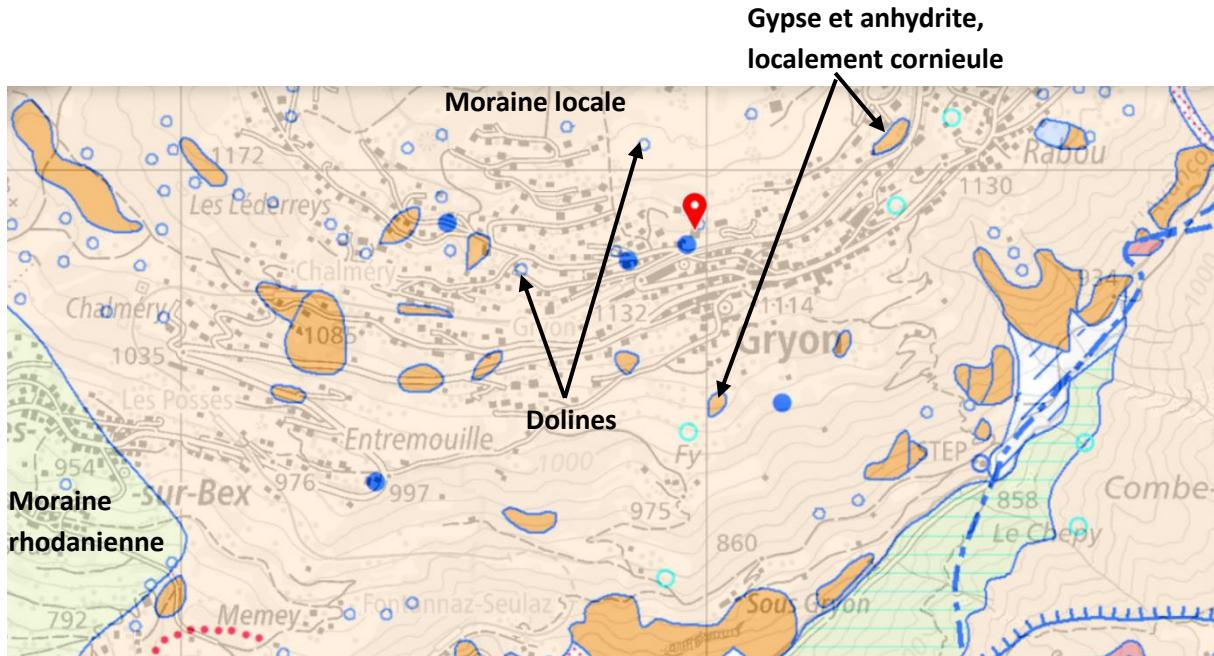


Figure 15 : Carte géologique vectorisée (source : map.geo.admin.ch)



Figure 16 : Cadastre géologique du canton de Vaud (source : geo.vd.ch).

Quatre sondages carottés, dont l'un horizontal de 30 mètres de long sont situés au droit de la parcelle du projet fictif de construction d'un chalet de 3 étages et un niveau de sous-sol. Leur profondeur est comprise entre 10 et 30 mètres.

Le sondage au Nord du projet met en évidence les terrains suivants :

a) Moraine riche en blocs en lien avec un éboulement post-glaciaire

D'une épaisseur de l'ordre de 10 mètres, elle est constituée généralement de limon argileux, plus ou moins graveleux et sableux avec beaucoup de pierres et de blocs. Elle est généralement pulvérulente jusqu'à près de 5 mètres de profondeur, puis plus consistante en profondeur (ferme à dure). Des passes plus sablo-graveleuses décimétriques caractérisent cette formation.

b) Moraine peu décomprimée

Ces dépôts sont observés jusqu'à une profondeur de près de 26 mètres. Il s'agit de limon argileux et graveleux avec beaucoup de pierres et de blocs (calcaires et triasiques) de consistance ferme à dure.

c) Roche calcaire broyée et décomposée

Cette formation est observée jusqu'à 30 mètres de profondeur et correspond à des calcaires marneux de l'Hauterivien altérés, broyés et décomposés dans une matrice argilo-détritique.

d) Moraine remaniée

Cette formation est observée jusqu'à une profondeur de 75 mètres. Elle est constituée de limon graveleux et peu argileux cohésif avec des pierres.

Le sondage au Sud-Ouest du projet met en évidence d'autres types de terrain de surface, soit :

e) Remblais

Le sondage S3 met en évidence plus de 10 mètres de terrain morainique remanié correspondant à des remblais de consistance hétérogène. Ils sont composés principalement de limon argileux avec un peu de sables et de graviers ainsi que des pierres et de blocs généralement calcaires. Des signes d'humidité sont observés dans ces dépôts artificiels.

Le sondage au Nord-Ouest du projet met en évidence d'autres types de terrain de surface, soit :

f) Remplissage de doline

Le sondage S2 met en évidence près de 4 mètres colluvions et éluvions composés de limons argileux avec des pierres de consistance lâche. Ces dépôts sont interprétés en tant que remplissage d'une doline existante.

g) Blocs marno-calcaires en voie d'effondrement

Ces dépôts de remplissage de dolines surmontent des blocs marno-calcaire altérés, disloqués et décomposés en voie d'effondrement jusqu'à un profondeur de 10 mètres.

A noter que le sondage horizontal traverse la parcelle du projet du Sud au Nord sur une longueur de 30 mètres (azimut de 342.5°N). Ce sondage a mis en évidence des remblais composés de moraine remaniée, puis des déblais interprétés comme remplissage de doline sur une longueur de près de 20 mètres. Plus loin sont rencontrés des matériaux grossiers en voie d'effondrement sur plus de 7 mètres de long. Ce dernier horizon est composé de calcaires marneux hauteriviens très fracturés, disloqués et altérés avec des passes plus marneuses et broyées. Plusieurs vides pluridécimétriques (de 0.4 à 0.75 mètre) sont observés dans cette formation.

Hydrogéologie

Aucune venue d'eau n'a été observée dans ces sondages, mais des pertes sont observées dans les remblais, les blocs marno-calcaires en voie d'effondrement et les vides. A priori, aucun aquifère n'est présent au droit du projet jusqu'à 30 mètres de profondeur.

F1, probabilité de vide : lithologie : roches évaporitiques du Trias (Nappe de Bex - Laubhorn)	30 pts
Karstification : élevée au droit et à proximité du projet	10 pts
Autre facteur : non	
total F1 : $30 \times 10 = 300$	(limité à :) 100 pts

F2, couverture :

"Epaisseur des terrains meubles" (plus de 20 mètres)	0.8 pt
Cohésion - compacité : moyenne à faible	1 pt
Perméabilité : inconnue mais jugée moyenne comprise entre 1E-04 et 1E-07	1 pt
total F2 : $0.8 \times 1 \times 1 =$	0.8 pt

F3, eau naturelle : infiltration : diffuse

Nappe : poss. couverture	1.1 pt
total F3 : $1 \times 1.1 =$	1.1 pt

F4, facteurs artificiels : infiltration = inf. naturelle

Nappe : hors couverture.	1 pt
Surcharge : élevée (présence de remblais et projet d'un grand chalet)	2 pt
total F4 : $1 \times 1 \times 2 =$	2 pts

Total général : $F1 \times F2 \times F3 \times F4 = 100 \times 0.8 \times 1.1 \times 2 = 176 \text{ pts}$

Nb de points	Evaluation de la dangerosité	Temps de retour indicatif	Probabilité d'occurrence sur 50 ans
>1000	effondrement très probable	<1 an	> 99.5%
500 à 1000	très élevé	1 à 3 ans	> 99%
100 à 500	élévé	3 à 10 ans	90 - 99%
50 à 100	moyen	10 à 30 ans	50 - 90%
10 à 50	modéré	30 à 100 ans	20 - 50%
1 à 10	très faible	100 à 1000 ans	2 - 20%
<1	nul	>1000 ans	< 2%

Selon le *Tableau 10* du rapport (ci-dessus) → « **dangerosité élevée** ».

Type de construction	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Infrastructures légères	Infrastructures linéaires	Bâtiments	Bâtiments/Structures complexes, lourdes et/ou sensibles
Niveau de dangerosité (cf. tableau 12)	Champs, parcs jardins, serres plastique,)	Terrain de sport, hangar agricole, serre vitrée	Voie de communication routière ou ferroviaire	Bâtiment standard, petit immeuble, usine, entrepôt logistique	Grand immeuble, appui ouvrage d'art, antenne/éolienne, conduite forcée aérienne
nul	A priori pas d'investigation nécessaire				
très faible					
modéré					
moyen					
élevé				Investigations conseillées	
très élevé					
« effondrement très probable »					

Ensuite, selon l'exemple du tableau 11, il convient de procéder à une étude complémentaire par des spécialistes (= analyse détaillée). → **Consulter le chapitre 3 du Cahier 1 pour la mise en œuvre de méthodes d'investigation permettant l'analyse détaillée.**

Etape III. Mesures de mitigation (annexe D) pour l'exemple de construction d'un chalet de 3 étages et un niveau de sous-sol sur un substratum gypseux sous couverture épaisse

La sélection des **mesures de mitigation conseillées** se fait à l'aide des tableaux de l'**annexe D**. Le premier tableau détaille les mesures avec les techniques de mise en œuvre et l'adéquation du type d'infrastructure par rapport à l'occupation du sol. Avec la construction d'un chalet de 3 étages et 1 niveau de sous-sol dans des terrains meubles d'épaisseur de plus de 30 mètres surmontant un substratum gypseux, nous sommes dans la situation d'infrastructure D, « Bâtiments ». Nous entrons verticalement dans la colonne D (flèche).

Sélection des mesures de mitigation

- 1. Éventail des mesures de mitigation techniquement envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Annexe D

Méthodes	Techniques	Remarques	Adéquation avec l'occupation du sol *				
			A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâtiements	E Spéciales
100 Décapage des terrains de couverture	101 Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture maudite est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête	●	●	●	●	●
	102 Reléve d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre					
200 Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201 Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compactables (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au toit du sousbalement karstifié	Le complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'un simple auge en béton armé posé directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	202						
	203 Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravier), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étanchéification ou de consolidation (voir ci-dessus) est envisageable					
300 Report de la charge en profondeur – sur le sousbalement rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301 Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'un simple auge en béton armé posé directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire					
	302 Micropleins forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tubage perdu	Attention également au risque de flambrage selon la taille des cavités recoupées par les micropleins					
	303 Pleins forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tube perdu	Attention également au risque de flambrage selon la taille des cavités recoupées par les pleins					
	304 Pleins préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tube	Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un béton). Attention également au risque de flambrage en fonction du rapport entre le diamètre des pleins et la hauteur des cavités recoupées par les pleins					
400 Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + filer) ou de coulis minéraux (ciment, micromicte + bentonite ou fumée de silice)	401 Injections d'enfoncement (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de la porosité – vides intergranulaires – et/ou la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limonoargileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes					
	402 Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains : résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains) ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou la fissuration)						
	403 Injections de compactage verticale ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts					
	404 Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (tableau à argileuse)					
	405 Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différenciels d'ampleur limitée (exemple société Uretel)	②	③			④
500 Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du sousbalement rocheux (gypse, anhydrite, cornue)	501 Si risque de dégradation de la stabilité du sousbalement rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation (sauf si l'objet exposé sauf si techniquement/financièrement envisageable de trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur)						
600 Gestion des eaux	601 Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Mise en œuvre de raccordements souples et visibles aux interfaces terrain/bâti					
	602 Gestion des eaux météoriques et souterraines	Collecte des eaux météoriques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque					
700 Mesures à l'objet	701 Fondations du bâti	Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté	●				
	702 Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé					

Num. Mesures préventives essentiellement (intégration d'un risque identifié précisément à la réalisation d'un nouvel aménagement/infrastructure)

Num. Mesures préventives et mesures de remédiation

Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont l'efficacité ou l'efficience n'est pas toujours évidente si elles sont réalisées en termes de perméabilité

Num. Mesures préventives et mesures de remédiation (à condition que le bâti existant soit soumis à un radier monolithique ou en créant une couche en béton armé si le sol existant est forcé sur des éléments karstifiés)

Num. Mesures de remédiation uniquement

Num. Mesures constructives à réaliser avant la réalisation (construction) du projet

Num. Mesure à prendre dans le cadre de l'avant-projet

Num. Mesures en lien avec la gestion des eaux

Num. Mesures constructives à l'objekt – renforcement du bâti déformations potentielles

* Adéquation avec l'occupation du sol

Type d'aménagements, d'infrastructures et d'ouvrages

Occupation du sol

Exemples

Appréciations

A bâti	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers (champs, parcs, jardins, serres pratiques)	Meilleure appropriée
B Légères	Infrastructures légères (terrains de sport, hangars agricoles, serres vitrées)	Meilleure appropriée si elle ponctuel et de faible ampleur
C Linéaires	Infrastructures linéaires (voies de communication routières ou ferroviaires)	Meilleure appropriée si elle ponctuel et de faible ampleur et/ou si la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance
D Bâtiements	Bâtiements standards (ateliers, usines, entrepôts logistiques)	Meilleure appropriée
E Spéciales	Infrastructures spéciales (complexes, lourdes, de grande hauteur et/ou sensibles)	Généralement peu approprié. Aspects d'ouvrage d'art, antennes, éoliennes, conduites forcées aériennes. Sécurisation ou périmètre dangereux et abandon de l'ouvrage existant ou de l'ouvrage projeté à envisager

- ① Rapport des mesures / Vérouiller si bien à protéger ou à construire disportionnale
- ② Rapport des mesures / Vérouiller si bien à protéger ou à construire disportionnée
- ③ Peut être nécessaire à faire en fonction de la veille du bâti à risque
- ④ Peut être nécessaire si l'infrastructure occasionne un phénomène fortement forcé en profondeur / Déplacement de l'ouvrage éventuellement envisagé

Dans le cas précis, s'agissant d'une construction d'un chalet de 3 étages et un niveau de sous-sol, les mesures 301, 302, 304, 405, 601, 602 701 et 702 sont vivement recommandées, alors que les mesures 101, 102, 203, 303, 401, 402, 403 et 404, voire 201 et 202 sont appropriées si l'aléa est jugé ponctuel et de faible ampleur et si elles sont engagées en parallèle d'un dispositif de surveillance pour les deux dernières.

Nous entrons horizontalement dans le deuxième tableau :

- dans la lithologie A ; Roches karstiques sulfatées
- dans la situation de danger S3 ou S4 (extension du phénomène moyenne à grande)
- dans le cas de couverture C

3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Urologie	Situation de danger considérée	100 Décapage		200 Comblement			300 Report de la charge en profondeur				400 Traitements de terrain				500 Projet		600 Gestion des eaux		700 Mesures à l'objet																				
		Tableau de vides		Relevé d'indices lors du terrassement			Remblayage +				Ouvrage d'art			Micro-pieux forés armés		Pileux forés armés		Pileux préfabriqués		Injections d'étanchement		Injections de consolidation		Injections de compactage		Colonnes jettées		Injections de compensation		Renoncer ou déplacer		Réduire d'eau		Eaux souterraines et superficielles		Fondations		Structure	
		Couverture	M. ou pluviométrique, CM a centimétrique ou décimétrique	Terrassement	Relevé d'indices lors du terrassement	Remblayage	Remblayage +	Remblayage en béton armé	Comblerement	Comblerement	Comblerement	Ouvrage d'art	Micro-pieux forés armés	Pileux forés armés	Pileux préfabriqués	Injections d'étanchement	Injections de consolidation	Injections de compactage	Colonnes jettées	Injections de compensation	Renoncer ou déplacer	Réduire d'eau	Eaux souterraines et superficielles	Fondations	Structure														
A - Rochers karstiques suffisamment résistants pour assurer la sécurité (sauf effets de glissement et/ou dégagement de roches)	S1	R	++	++	++	++										++	++				++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++							
		CM	++	++	++	++										++	++				++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++							
	S2	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++																																	
	S3	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++																																	
	S4	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++																																	
	S5	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++																																	
B - Rochers karstiques carbonatés (calcaires)	S6	Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																																					
	S1	R	++	++	++	++	++	++																															
		CM	++	++	++	++	++	++																															
	S2	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++	++	++																															
	S3	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++	++	++																															
	S4	R	+	+																																			
		CM	++	++	++	++	++	++																															
	S5	R	+	+																																			
C - Rochers semi-karstiques	S6	Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																																					
	S1	R	++	++	++	++	++	++																															
		C	+	+																																			
	S2	R	++	++	++	++	++	++																															
		C	+	+																																			
	S3	R	++	++	++	++	++	++																															
D - Rochers à tendance instable	S4	R	+	+																																			
		C	+	+																																			
	S5	R	++	++	++	++	++	++																															
		C	+	+																																			
	S6	R	+	+																																			

Les mesures de mitigation proposées dans ce tableau, basées sur une construction standard, peuvent varier par rapport à celles du premier tableau.

Nous partons du principe dans cet exemple que l'implantation d'un chalet d'envergure de 3 étages et un niveau de sous-sol ne peut pas être modifiée.

La ligne du tableau préconise – à choix ou en combinaison – les méthodes suivantes (petites croix en vert **++ ou +**). Les mesures - peuvent également être mise en œuvre car la valeur du projet et sa haute sensibilité est suffisante et devraient être privilégiées. Comme les mesures + et ++, celles-ci peuvent être également combinées.

Aussi bien le contexte S3 que le contexte S4 privilient les mesures suivantes :

- 101 : terrassement (+)
- 102 : relevé d'indices lors du terrassement (+)
- 301 : ouvrage d'art (-)
- 302 : micro-pieux forés armés (++)
- 303 : pieux forés armés (-)
- 304 : pieux préfabriqués (-)
- 401 : injections d'étanchement (++)
- 403 : injections de compactage (-)
- 404 : colonnes jettées (-)
- 405 : injections de compensation (méthode réservée à des objets existants) (++)
- 501 : renoncer ou déplacer (++) (dans ce cas impossible car situation du projet imposée par le site)
- 601 et 602 : gestion des eaux. Raccordements souples et visitables, évacuation des eaux hors du secteur à risque (++)
- 701 et 702 : radier monolithique et structures en béton armé (++)

Ces méthodes peuvent se compléter les unes aux autres mais aussi s'exclure (cf. mesure 500). Elles ne sont pas un mode opératoire unique ou une recette à suivre à la lettre. L'expérience de l'ingénieur et la spécificité locale joueront un grand rôle dans le choix de la méthode !

Etant donné que ce projet se base sur un cas réel d'une construction existante, le bureau d'ingénieurs a préconisé les mesures suivantes pour limiter la fissuration et les dommages du bâtiment existant :

- 405 : injections de compensation (méthode réservée à des objets existants).

Liste d'autres exemples moins développés (ISSKA)

Canton	Commune	Lieu-dit	Np & ancrage / terrain	Lithologie	Statut cas (réel / potentiel)	Descriptif	Altéa	Dégâts	Date éventuelle du cas	Coordonnée (réel X)	Références	Analyse sommaire			Total des points	Évaluation dangerosité	Remarques
												F1	F2	F3	F4		
VD	Bex	La Ruz	Terrain de football	Gypse	réel	Effondrement 3 x 2 m	Trou à combler	Non	juin 2005	2.567000 1122575 **	ECIA	30 x 5 =>100	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	110	dangerosité élevée
VD	Bex	La Scie	Bâtiment habitation et entrepot	Gypse sous bâche local	pas clair	Dommage au bâti	Instabilité (?)	inconnus	avant 2003	2.563380 1122785 EPFL 2003 [page 15]	Courriel du 20.9.2021 à l'ISSKA	30 x 10 =>100	1 x 0.5 x 1	1 x 1 x 2	1 x 1 x 1	90	dangerosité moyenne
VD	Bex	Chemin Julien Gallet Villas		Gypse sous bâche local	potentiel	Ville qui s'affaisse se déforme en formation	Risque d'affaissement dans doline	Instabilité	1985 (ouverture doline)	2.567788 1122584 Notice carte géologique 1885 Les Diablerets	30 x 5 =>100	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	27	dangerosité élevée	
VD	Bex	Pierre Besse	Bloc erratique classé	Gypse sous bâche local	réel	Risque d'affaissement dans doline	Perte d'un objet classé	Instabilité	récent	???	Google street view	30 x 5 =>100	1 x 0.5 x 1	1 x 1 x 2	1 x 1 x 1	70 à 100	moyenne élevée
VD	Gryon	Avenue de la Gare	Immeubles	Gypse sous bâche local	probable	Fissures à certains bâtiments très trés	Instabilité	Fissures	récent	???	Google street view	30 x 5 =>100	1 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	27	dangerosité moyenne
VD	Ollon	Hümoz	Grange	Gypse sous bâche local	probable	Fissures	Instabilité	Fissures	récent	???	Google street view	30 x 10 =>100	1 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	165	dangerosité élevée
VD	Ollon	Panex	Chalet / grange	Gypse sous bâche local	probable	Partie de maison penchée	Instabilité	Instabilité	récent	???	Google street view	30 x 5 =>100	1 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	115	dangerosité élevée
VD	Fiez	Partie nord du village	Paturage	Gypse sous falaise couverte	réel	Maisons fissurées (centre et nord du village)	Instabilité	Instabilité	en cours	???	Rapport à l'affection "Village d'Ollon, Dossier 17/22 CAMAC"	30 x 5 =>100	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 2	1 x 1 x 1	364	dangerosité élevée
VD	Fiez	La Grandsonne Dessous	Paturage	Marne-Calcare (Mab. d'Effingen)	réel	Petit affondrement (dôle) ouest du chapelet de dolines	Petit trou dans le paturage	Non	avant août 2019	2.532650 1191645 BDD Convention VD ISSKA 10 x 5	Rapport Convention VD ISSKA	30 x 10 =>100	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	17.5	dangerosité modérée
VD	Fiez	Les Preselettes	Paturage	Marne-Calcare (Mab. d'Effingen)	réel	Effondrement (entrefois d'un gouffre de 8 m profonde)	Trou dans le champ	Non	avant août 2019	2.532340 1191895 Rapport Convention VD 2019	Rapport Convention VD	10 x 10 (gouffre)	0.7 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	91	dangerosité moyenne
VD	Le Chénit	Grande plaine de vent	Paturage	Calcaire	réel	Effondrement spontané (estimé à 5 mle 1.9.2023)	Trou en plein paturage	Non	2022	2.503094 1155901 Rapport Convention VD 2022 et 2023	Rapport Convention VD	10 x 5	0.75 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	18.75	dangerosité modérée
VD	Muttox	Le Querquevié	Forêt	Calcaire	réel	Effondrement ou petit effondrement ou petit gouffre canouillé sous les végétaux	Pas retrouvé le 14.8.2023	Non	avant nov. 2018	2.545625 1191235 **	Rapport à l'info.ssc.ch du 12.11.2018	10 x 10	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	11.66	dangerosité modérée
VD	Saint-Cergue	Corne Grasse	Paturage	Calcaire Valanginien inf. ou Weissenbecken	réel	Effondrement au passage d'une vache	Trou de 6 m "à combler"	Perte d'un bovin	juin 2021	2.495744 1146253 Rapport Convention VD 2020	Rapport Convention VD (Kimmeridge)	6 x 10	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	21	dangerosité modérée
VD	Sainte-Croix La Clatte-Dessus	Jardin		Calcaire Kimmeridgien	réel	Effondrement avec entrée de 0.5 x 0.5 m, profonde 5 m	Trou à canceler (barrière)	Non	avant septembre 2019	2.526155 1183732 Rapport Convention VD 2020	Rapport Convention VD (Kimmeridge)	6 x 10	0.7 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	70	moyenne un cas similaire (entrée 1.0 x 1.5 m) est connu 150 m au SW
Autres cantons																	
AG	Heilikon	Buech	Champ	Muschelkalk, dolomique	réel	2 effondrements dans un champ (5x8 et 9x3 m, prof. max 13.7 m)	Trou à combler / canceler	inconnus	2.1.2010	2.635870 1262300 Sc11000_48 Heilikon	Matériel ISSKA	10 x 5	1 x 1 x 1	1 x 1 x 2*	1 x 1 x 2*	165	dangerosité élevée
BE/JU	Villeret	Téléski des Breuleux	Parking / paturage	rm Twannbach (Portlandien inf.)	réel	Un polain qui avait disparu a été retrouvé au fond de l'effondrement avec entrée de 13.7 m	Trou dans une zone de gisement	Perte d'un poulin	2023	2.567737 1227130 Médias régionaux	Visite sur place (ISSKA)	10 x 5	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	17.5	dangerosité modérée
BE	Lenk	Betberg (Grüde)	Zone de bûcher / piste de ski	Gypse (nappe Bex-Lauhorn)	réel	On imagine une zone traversée par des steiers et un télécabine imaginé	Risques pour les personnes	Effondrement sur piste de ski	cas fictif	2.596525 1140400 Visite sur place (ISSKA)	30 x 10 =>100	0.7 x 1 x 1	1 x 3 x 1	2 x 1 x 2	364	dangerosité élevée	
BL	Rischenzh	Champ		Sidroithothite/rm de L'Irsane (Oxfordien)	réel	Effondrement de 13 m dans un champ ouvert de 5 x 5 m	Trou dans le champ	Risques pour les personnes	2019	2.503355 1252327 Mett ISSKA Sc1329	10 x 10	1 x 1 x 1	1 x 1 x 2*	1 x 1 x 2*	330	dangerosité élevée	
BL	Bridach	Grüt	Dolne dans couv. meuble épaisse	Calcaire d'Altération sur Kimméridgien	réel	Effondrement spontané (forêt)	Trou à combler / canceler	inconnus	avant 2017	2.568130 1252850 (2017)	Buchere Dolines ISSKA	6 x 5	1 x 0.7 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	34.65	dangerosité élevée
NE	La Chaux-de-Fonds	Quartier les Foulets	Villa et garage	Warcne-Calcare (Mab. d'Effingen)	réel	Entraillement solairement celui de la maison	Gâche à détruire	Dû	2023	???	ECAP - Géologue cantonal	10 x 5	0.7 x 0.5 x 1	1 x 3 x 1	4 x 1 x 2	182	dangerosité élevée
NE	La Chaux-de-Fonds	La Ronde, avai STEX	Lut de rivière	Grande taille dans le lit de la rivière	réel	Une conduite d'eau percée	Dû, importants	2023	???	Rapport ISSKA	10 x 10	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 2	1 x 1 x 2	364	dangerosité élevée	
NE	La Chaux-de-Fonds	Talus, trottoir		Portlandien inférieur	réel	Effondrement sur un chantier dominant sur une grande salle de 8 x 12 m	Travaux de CC pour stabiliser	Instabilité du bâti	21.3.2023	2.553965 11217889 Mett ISSKA 1000_164	Archives du cas et visite sur l'église	10 x 10	0.7 x 0.5 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	154	dangerosité élevée
VS	Nax	Village	Chalets, antenne télécom	Gypse pennique, grès de Clot la Cime	réel	Grosse doline instable au nord du village	Effondrement toit de l'église	Instabilité du bâti	1999	2.598135 1119780	Archives de l'église de Nax	30 x 10 =>100	0.7 x 0.5 x 1	1 x 3 x 1	1 x 1 x 1	68.25	dangerosité moyenne

Facteur F2 : si la comparaison est ironique, nous avons pris par défaut un facteur de 0.5 ; "cohésion moyenne".
 ** corordonnées incertaines ?? ?
 corordonnées non fournies : * surchiffrage possible par véhicule lourd (tracteur agricole, engin militaire)

Annexe C

Annexe C : Dispositions constructives de prévention et de remédiation (mesures de mitigation)

Lorsque l'évaluation du danger et de la vulnérabilité de l'ouvrage mettent en évidence des conditions justifiant des dispositions constructives, il importe de choisir la bonne manière de traiter le cas. La Figure 1 présente de manière schématique les cas possibles.

- Un soubassement rocheux constitué de **roches sulfatées kartifiées** (anhydrite et/ou gypse) :
 - **sans** couverture de terrains meubles ; **cas R ("Rocher")**; l'on distingue encore dans ce cas les ouvertures visibles dans le rocher :
 - métriques : **R (M)**
 - centimétriques : **R (CM)**
 - **avec** couverture de terrains meubles; **cas C**;
- Un soubassement rocheux constitué de **roches carbonatées karstifiées** (calcaires) :
 - **sans** couverture de terrains meubles ; **cas R (M) et R (CM)** ;
 - **avec** couverture de terrains meubles; **cas C ("Couverture")** ;
- Un soubassement rocheux constitué de **roches semi-karstifiées** (alternances calcaires-marnes) :
 - **sans** couverture de terrains meubles ; **cas R** (sans distinction d'ouverture);
 - **avec** couverture de terrains meubles; **cas C**.

Gestion intégrée des dangers naturels - Aléa effondrement

Niveau de fondation des ouvrages existants ou projetés

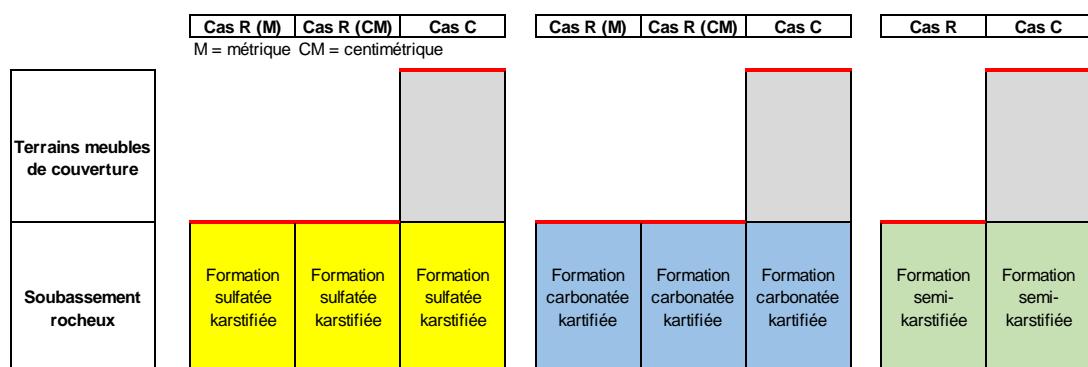


Figure 1. Aperçu schématique des situations possibles à distinguer pour le choix de mesures constructives adéquates.

Le tableau en 3 parties de l'annexe D *Sélection des mesures de mitigation en fonction du danger et de l'occupation du sol* fait la synthèse des mesures de renforcement des sols de fondation (terrains meubles de couverture) et/ou du soubassement rocheux dont la mise en œuvre est techniquement envisageable pour chacun des cas.

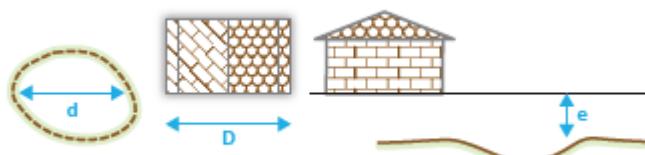
Mode d'emploi de l'annexe D Sélection des mesures de mitigation (en fonction de l'occupation du sol et du danger)

D'abord, nous pouvons voir dans le premier tableau les mesures de mitigation qui sont en adéquation avec l'occupation du sol. Ce tableau permet d'évaluer la mitigation sur d'autres ouvrages tels que terrain de sport, usines, etc...

(extrait du tableau de l'annexe D)

Selon les situations de danger S1 à S6 rappelées en bas de l'annexe, nous entrons ensuite dans le deuxième tableau ***Sélection des mesures de mitigation en fonction du danger***, qui nous permet de nous situer selon la lithologie et la situation de danger dans une ligne du tableau. Nous pouvons y voir les mesures de mitigation conseillées (++) ou plutôt conseillées (+). Il est normé pour le cas standard d'un chalet ou d'une villa de taille moyenne.

(extraits du tableau de l'annexe D)



Sélection des mesures de mitigation

L'annexe D inclut aussi bien les mesures constructives que de remédiation. En effet, il inclut des mesures pour :

- pallier les risques associés à des aménagements, des infrastructures ou des ouvrages projetés (**mesures constructives**);
 - sécuriser et pallier les dégâts causés à des aménagements, des infrastructures ou des ouvrages existants (**mesures de remédiation**).

Les deux tableaux listent les techniques potentiellement utilisables (selon 7 catégories de mesures de mitigation notées 100 à 700 et des sous mesures notées 101, 102, etc...).

Le premier tableau indique les situations de danger pour lesquelles les techniques respectives pourraient être appliquées. Pour une situation de danger donnée, on peut ainsi facilement visualiser les méthodes constructives ou remédiaitives potentiellement applicables. Un élément dans le choix des méthodes est évidemment la vulnérabilité des ouvrages concernés. Le deuxième tableau donne donc des indications générales sur l'adéquation plus ou moins bonne entre les méthodes et les ouvrages.

Le but de cette annexe est avant tout de donner un aperçu, ainsi que des pistes pour prendre des décisions. Il offre un cadre qui permet d'évaluer les propositions qui seraient faites par des spécialistes, et de discuter du bien-fondé du choix de telle option par rapport à telle autre. Dans la mesure où la gamme des cas possibles est très large, il ne s'agit pas d'une grille décisionnelle aboutissant de manière univoque à une solution pour un problème posé. L'annexe donne un indice des méthodes qui paraissent les plus adaptées, respectivement peu adaptées aux situations de danger considérées, mais l'expérience et le bon sens du géologue sont nécessaires pour faire un choix adapté à chaque situation.

Description du contenu de l'annexe D

- **Techniques**

Les techniques sont décrites sommairement et commentées. Elles sont regroupées en fonction de la méthodologie envisagée pour résoudre le problème. Elles sont présentées par ordre croissant de complexité, donc de coûts. Des numéros sont donnés à chaque technique ce qui permet de s'y référer plus facilement.

- **Mesures constructives et de remédiation**

Les couleurs d'arrière-plan des techniques permettent de distinguer les techniques constructives et/ou de remédiation dont la mise en œuvre est techniquement envisageable pour remédier aux différentes conditions de sites prises en considération.

La légende des couleurs associée aux mesures de renforcement des sols de fondations et/ou du soubassement rocheux proposées précise si ces mesures sont :

- des mesures **constructives uniquement**;
- des mesures constructives **et** des mesures de remédiation;
- des mesures constructives **et** des mesures de remédiation mais dont la mise en œuvre est difficilement envisageable **si les conditions du site ne doivent pas être modifiées en termes de perméabilité** (**textes de couleur rouge**);
- des mesures constructives **et** des mesures de remédiation à la condition toutefois que le bâti existant soit fondé sur un **radier monolithique** ou que celui-ci **soit renforcé** (ceinture en béton armé) dans le cadre des travaux de sécurisation et de réparation envisagés suite à un dégât;
- des mesures de **remédiation uniquement**;
- des mesures constructives et/ou de remédiation propres au bâti ou à la gestion des eaux météoriques ou souterraines qui devraient être appliquées systématiquement en présence de terrains de fondations sensibles à la karstification.

Les **textes de couleur bleue** correspondent à des remarques qualitatives portant sur la méthodologie ou sur les mesures constructives ou de remédiation proposées.

Remarque fondamentale : en présence de terrains meubles de couverture, la mise en œuvre des mesures de renforcement proposées pour les sols de fondation n'est envisageable que **si la stabilité du soubassement rocheux est assurée à moyen et à long termes**.

A ce titre, la nature lithologique du soubassement rocheux est fondamentale. Si le soubassement rocheux en présence est de nature sulfatée (**anhydrite et/ou gypse**), la mise en œuvre des mesures constructives et/ou de remédiations proposées doit également être examinée sous l'angle du **potentiel d'évolution** des phénomènes karstiques **constatés ou susceptibles de se développer** dans le soubassement rocheux à **court, voir très court, termes** (quelques mois); notamment en cas de modification des conditions de circulation des eaux souterraines (débit et/ou cheminements).

En cas de risque **d'évolution rapide des conditions de stabilité du soubassement rocheux**, il peut s'avérer opportun de **renoncer à la réalisation** de l'objet projeté ou à la sauvegarde de l'objet impacté par le phénomène. Il est toutefois possible de sursoir à une telle décision si la présence de gypse ou d'anhydrite est associée à des **accidents tectoniques (failles / plans de chevauchement)** et que ces types rocheux forment des corps discontinus de faible puissance. Il faut alors pallier le risque d'instabilité en reportant la charge **plus profondément** sur un rocher sain et stable à long terme à condition que le surcoût engendré par ces travaux reste **financièrement acceptable** en regard de la valeur du bien à construire ou à sauvegarder.

- **Situations de danger**

Cette partie se lit horizontalement.

Le premier élément qui doit être évalué est le type de milieu (A. roches sulfatées, B. roches carbonatées, C. roches semi-karstiques).

Le deuxième élément est la situation de danger au sens de la figure 15 du rapport principal. Le critère principal est ici la présence, la taille et la position d'une dépression par rapport à l'ouvrage. Dans le cas S1, aucune dépression significative n'a été mise en évidence par les investigations menées, mais il subsiste un doute sur la stabilité du terrain, par exemple une suspicion de cavité à faible profondeur. Dans les autres cas, une ou plusieurs dépressions sont visibles ou reconnues par les analyses rapides ou détaillées.

Le troisième élément est donné par la présence ou absence de couverture non ou peu consolidée sur la roche karstifiée. La dangerosité déterminée par les analyses rapides ou détaillées (chapitre 3 Cahier 2 et chapitre 3 Cahier 1) viendra évidemment pondérer l'évaluation pour le choix de la méthode constructive, un danger élevé justifiant davantage de moyens techniques mis en œuvre qu'un danger faible.

Le quatrième élément à évaluer est la taille probable des vides dans le soubassement rocheux. S'il s'agit de vides métriques (ou plus) au danger de soutirage de la couverture (abaissement) s'ajoute celui de l'effondrement. Par défaut les deux dangers sont cumulés. Si la couverture est absente, des vides centimétriques présenteront un danger nettement plus faible que des métriques.

- **Appréciation de l'adéquation des mesures de renforcement des sols de fondation et/ou du soubassement rocheux en fonction du type d'aménagement, d'infrastructure ou d'ouvrage existant ou projeté en surface**

La partie droite du tableau présente notre appréciation de l'adéquation des mesures de renforcement proposées pour les sols de fondation et/ou le soubassement rocheux en fonction du type d'aménagement, d'infrastructure ou d'ouvrage existant ou projeté en surface selon les catégories et le code couleur suivants :

- Vert foncé : mesure **appropriée**;
- Vert clair : mesure **appropriée** à condition que l'aléa identifié ou que le phénomène constaté soit **ponctuel et de faible ampleur**;
- Jaune : mesure **appropriée** à condition que l'aléa identifié ou que le phénomène constaté soit **ponctuel et de faible ampleur** et moyennant la **mise en œuvre d'un dispositif d'auscultation** (nivellement, inclinomètres, extensomètres, etc.) des terrains de fondation et/ou de l'objet existant ou projeté.
- Rouge : mesure **inappropriée**;
- Noir : **sécurisation du périmètre jugé dangereux et abandon** de l'objet existant ou projeté à envisager.

1. Éventail des mesures de mitigation technique envisageables selon le type d'aménagements, d'infrastructures ou d'ouvrages existants ou projetés (occupation du sol)

Annexe D

Méthodes		Techniques		Remarques		Adéquation avec l'occupation du sol *				
						A Sans	B Légères	C Linéaires	D Bâtiments	E Spéciales
100	Décapage des terrains de couverture	101	Terrassement, enlèvement et évacuation des terrains de couverture	Mesure envisageable si l'épaisseur de la couverture meuble est faible à très faible (inférieure ou égale au mètre) et si la nature de l'infrastructure projetée s'y prête						
		102	Relevé d'indices lors du terrassement	Mesure recommandée si la mesure 101 est mise en œuvre						
200	Comblement de la dépression avec des matériaux de substitution choisis	201	Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compacts (principe du filtre inversé)							
		202	Préparation et remblayage de la dépression en surface avec des matériaux cohésifs et compacts (principe du filtre inversé) + construction d'une dalle en béton armé avec des ouvertures au toit du soubassement karstifié	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire						
		203	Comblement des cavités avec un matériaux filtrant (sable ou gravette), du béton/mortier à faible teneur en ciment selon la taille et la connectivité des cavités	En cas de comblement avec de la gravette, la mise en œuvre ultérieure d'injections d'étanchement ou de consolidation (voir ci-dessus) est envisageable						
300	Report de la charge en profondeur – sur le soubassement rocheux ou non – par incorporation de structures rigides	301	Construction d'un ouvrage d'art	La complexité de l'ouvrage d'art nécessaire au franchissement de l'obstacle devra être adaptée aux spécificités de l'aléa identifié. L'éventail des solutions envisageables va de la construction d'une simple auge en béton armé posée directement sur le sol de fondation à la réalisation d'un véritable pont avec tablier, culées et fondations profondes si nécessaire	①					
		302	Micropieux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants) sauf en ayant recours à un tubage perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités recoupées par les micropieux						
		303	Pieux forés armés (attention car la mise en œuvre de cette méthode n'est pas viable en présence de vides francs préexistants de grand volume) sauf en ayant recours à un tubage perdu	Attention également au risque de flambage selon la taille des cavités recoupées par les pieux						
		304	Pieux préfabriqués (métal ou béton) posés dans un tubage	Attention : en cas de recours à du métal, il faut être attentif à l'agressivité des eaux ou protéger le métal par passivation (enrobage dans un béton). Attention également au risque de flambage en fonction du rapport entre le diamètre des pieux et la hauteur des cavités recoupées par les pieux						
400	Amélioration des qualités du massif rocheux de fondation par injection de mortier (ciment + filler) ou de coulis minéraux (ciment, microciment + bentonite ou fumée de silice)	401	Injections d'étanchement (objectif = réduction de la perméabilité du massif rocheux par remplissage de la porosité – vides intergranulaires – et/ou de la fissuration)		②					
		402	Injections de consolidation (objectif = amélioration des caractéristiques géomécaniques des terrains (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et collage des grains) ou du massif rocheux (résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion par remplissage des vides intergranulaires et/ou de la fissuration)	Attention : la cohésion des terrains ne peut pas être améliorée en présence d'une phase limono-argileuse importante à moins d'avoir recours à des résines polyuréthanes						
		403	Injections de compactage verticales ou inclinées	Méthode adaptée à des terrains meubles peu compacts						
		404	Colonnes jetées verticales ou inclinées	Méthode adaptée en présence de terrains meubles graveleux avec matrice fine (sableuse à argileuse)						
		405	Injections de compensation	Méthode réservée uniquement au redressement d'un bâti existant suite à des tassements différenciels d'ampleur limitée (exemple société Uretek)		③				
500	Examen supplémentaire de la stabilité à long terme du soubassement rocheux (gypse, anhydrite, cornieule)	501	Si risque de dégradation de la stabilité du soubassement rocheux à moyen ou court terme, renoncer à la réalisation /sauvegarde de l'objet exposé sauf si techniquement/financièrement envisageable de trouver de meilleures conditions de fondation en profondeur							
600	Gestion des eaux	601	Gestion des réseaux d'eau (alimentation en eau potable, évacuation des eaux usées)	Mise en œuvre de raccordements souples et visitables aux interfaces terrain/bâti	④					
		602	Gestion des eaux météoriques et souterraines	Collecte des eaux météoriques (bâti + terrain), drainage des eaux souterraines (terrain) et évacuation hors des secteurs à risque						
700	Mesures à l'objet Renforcement de la résistance du bâti aux déformations	701	Fondations du bâti	Réalisation d'un radier monolithique armé sous la totalité du bâti projeté						
		702	Structure du bâti	Réalisation de l'ensemble des structures porteuses en béton armé						

- Num.** Mesures préventives essentiellement (mitigation d'un risque identifié préalablement à la réalisation d'un nouvel aménagement/infrastructure)
- Num.** Mesures préventives et mesures de remédiation
- Num.** Mesures préventives et mesures de remédiation dont la mise en œuvre est difficilement envisageable si les conditions du site ne doivent pas être modifiées en termes de perméabilité
- Num.** Mesures préventives et mesures de remédiation (à condition que le bâti existant soit fondé sur un radier monolithique ou en créant une ceinture en béton armé si le bâti existant est fondé sur des semelles filantes)

- Num.** Mesures de remédiation uniquement
- Num.** Mesures constructives à réaliser avant la réalisation (construction) du projet
- Num.** Mesure à prendre dans le cadre de l'avant-projet
- Num.** Mesures en lien avec la gestion des eaux
- Num.** Mesures constructives à l'objet – renforcement du bâti aux déformations potentielles

* Adéquation avec l'occupation du sol

Type d'aménagements, d'infrastructures et d'ouvrages	Occupation du sol	Exemples	Appréciations
A Sans	Absence d'aménagement ou aménagements paysagers	Champs, parcs, jardins, serres plastiques	Mesure appropriée
B Légères	Infrastructures légères	Terrains de sport, hangars agricoles, serres vitrées	Mesure appropriée si aléa ponctuel et de faible ampleur
C Linéaires	Infrastructures linéaires	Voies de communication routières ou ferroviaires	Mesure appropriée si aléa ponctuel et de faible ampleur et/ou la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance
D Bâtiments	Bâtiments standards	Chalets, villas, petits immeubles, usines, entrepôts logistiques	Mesure inappropriée
E Spéciales	Infrastructures spéciales (complexes, lourdes, de grande hauteur et/ou sensibles)	Grands immeubles, appuis d'ouvrage d'art, antennes, éoliennes, conduites forcées aériennes	Sécurisation du périmètre dangereux et abandon de l'ouvrage existant ou de l'objet projeté à envisager

- ① Rapport
Coût des mesures / Valeur du bien à protéger ou à construire disproportionnée
- ② Rapport
Coût des mesures/ Valeur du bien à protéger ou à construire disproportionné
- ③ Pesée d'intérêts à faire en fonction de la valeur du bien à protéger
- ④ Cas peu probable car ces infrastructures spéciales sont généralement fondées en profondeur / Déplacement de l'ouvrage éventuellement à envisager

2. Situations de danger considérées

		Formation Profondeur des phénomènes	R Soubassement rocheux Peu profonds ($e \leq D$)	C Terrains meubles de couverture Profonds ($e > D$)
S1	Effondrement/doline potentielle (absence de dépression nette)			
S2	Effondrement/doline de faible extension ($d < D$)			
S3	Effondrement/doline d'extension moyenne			
S4	Effondrement de grande extension			
S5	Alignement de dolines			
S6	Situation inconnue – Géologie favorable aux effondrements – Conditions inconnues			

3. Choix des mesures de mitigation selon les situations de danger considérées pour un chalet ou une maison

Annexe D

	Lithologie	Situation de danger considérée		100 Décapage		200 Comblement			300 Report de la charge en profondeur				400 Traitements de terrain				500 Projet	600 Gestion des eaux		700 Mesures à l'objet			
		Taille doline (d/D)	Couverture	Terrassement	Relevé d'indices lors du terrassement	Remblayage	Remblayage + dalle en béton armé	Comblement (soubassement rocheux) avec matériau filtrant (sable ou gravette)	Ouvrage d'art	Micro-pieux armés	Pieux armés	Pieux préfabriqués	Injections d'étanchement	Injections de consolidation	Injections de compactage	Colonnes jetées	Injections de compensation	Renoncer ou déplacer	Réseaux d'eau	Eaux météorologiques et souterraines	Fondations	Structure	
				101	102	201	202	203	301	302	303	304	401	402	403	404	405	501	601	602	701	702	
A – Roches karstiques sulfatées (anhydrite/gypse) (en présence de roches sulfatées, il faut systématiquement avoir recours à des ciments résistants aux sulfates)	S1	M	++	++	++								++	++				++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++								++					++	+	++	++	++	++
		C	+	+									++					++	+	++	++	++	++
	S2	M	++	++	++								++	++	++			++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++								++					++	++	++	++	++	++
		C	+	+						++			++					++	++	++	++	++	++
	S3	M	++	++	++				-	++	-	-	++	++				++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++				-				++					++	++	++	++	++	++
		C	+	+					-	++	-	-	++					++	++	++	++	++	++
	S4	M	++	++	++				-	++	-	-	++	++				++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++				-	++	-	-	++	++				++	++	++	++	++	++
		C	+	+					-	++	-	-	++					++	++	++	++	++	++
	S5	M	++	++	++				-	++	-	-	++	++				++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++				-	++	-	-	++	++				++	++	++	++	++	++
		C	+	+					-	++	-	-	++					++	++	++	++	++	++
	S6	Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																					
B – Roches karstiques carbonatées (calcaires)	S1	M	++	++		++	++											++	++	+	+	++	++
		CM	++	++	++	++												++	+	+	+	++	++
		C	+	+														++	+	+	+	++	++
	S2	M	++	++		++	++											++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++	++												++	+	+	+	++	++
		C	+	+						++								++	+	+	+	++	++
	S3	M	++	++		++	++		-	++	-	-						++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++	++												++	+	+	+	++	++
		C	+	+					-	++	-	-						-	++	+	+	++	++
	S4	M	++	++		++	++		-	++	-	-						++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++	++												++	++	+	+	++	++
		C	+	+					-	++	-	-						-	++	+	+	++	++
	S5	M	++	++		++	++		-	++	-	-						++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++	++			-	++	-	-						++	++	+	+	++	++
		C	+	+					-	++	-	-						-	++	+	+	++	++
	S6	Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																					
C – Roches semi-karstiques	S1		++	++	++													++	+	+	+	+	+
		C	+	+														++	+	+	+	+	+
		S2	++	++	++	++												++	+	+	+	+	+
	S3	M	++	++	++	++	+	+	+									++	++	++	++	++	++
		C	+	+														++	+	+	+	+	+
		S4	++	++	++	++	+	+	+									++	++	++	++	++	++
	S5	M	++	++	++	++	+	+	+									++	++	++	++	++	++
		CM	++	++	++	++	+	+	+									++	++	+	+	++	++
		C	+	+														-	++	+	+	++	++
	S6	Toutes les mesures dont la mise en œuvre est conseillée ci-dessus pour les situations S1 à S5 peuvent être envisagées. À évaluer au cas par cas.																					

Num. Mesures préventives essentiellement (mitigation d'un risque identifié préalablement à la réalisation d'un nouvel aménagement/infrastructure)
 Num. Mesures préventives et mesures de remédiation

Num. Mesures préventives et mesures de remédiation dont