



ALÉA MOUVEMENTS DE TERRAIN D'ORIGINE KARSTIQUE EN CONTEXTE CARBONATÉ

Évaluation et cartographie

BRGM, Cerema (2023). Guide méthodologique Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté – Evaluation et cartographie

Version numérique

ISBN : 978-2-37180-598-9



ISBN : 978-2-7159-2817-6



Version papier

ISBN : 978-2-37180-597-2



ISBN : 978-2-7159-2816-9



ISBN : 978-2-37180-598-9
Éditions du Cerema, mars 2023
Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand,
CS92803
69674 Bron Cedex, France

ISBN : 978-2-7159-2817-6
BRGM éditions, mars 2023
Centre scientifique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2, France

ALÉA MOUVEMENTS DE TERRAIN D'ORIGINE KARSTIQUE EN CONTEXTE CARBONATÉ

Évaluation et cartographie

Préambule

Cette publication a été établie dans le cadre d'une action conjointe BRGM et Cerema pour le bureau des risques naturels terrestres au sein du service des risques naturels et hydrauliques (BRNT/SRNH) et de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT). Pour le BRGM, cette action s'inscrit dans le cadre de sa mission d'appui au MTECT. Pour le Cerema, elle s'inscrit dans celui de ses opérations de recherche Precas (prévention du risque d'effondrement des cavités souterraines) puis Cavités souterraines.

Ce guide repose sur les expériences respectives du BRGM et du Cerema, ainsi que des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives au sein des deux organismes. Il a fait l'objet d'une relecture par des administrations, professionnels et collectivités susceptibles d'utiliser ou de diffuser ce document (liste ci-dessous).

Cette publication est une œuvre collective qui forme un tout indissociable. L'usage des informations et méthodes contenues s'effectue sous la seule responsabilité du lecteur/des utilisateurs. Le BRGM et le Cerema déclinent toute responsabilité quant aux conséquences qui découleraient de cet usage.

Rédacteurs (par ordre alphabétique) :

- CLEMENT Frédéric (Cerema)
- HUSSON Églantine (BRGM)
- NOURY Gildas (BRGM)
- VEDIE Émeric (Cerema)

Comité de rédaction (par ordre alphabétique) :

- AZEMARD Pierre (Cerema)
- DORE Ludovic (Cerema)
- HAUSSARD Sylvain (Cerema)
- RESPAUD Cyril (Cerema)

Relecteurs :

- BRGM : PERRIN Jérôme et VALLET Aurélien
- Cerema : DENIAUD Yann et PHILIPPE Alexandre
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires – DGPR : HERBAUX Margaret
- Directions départementales des territoires (DDT) de l'Ain (BARELLE Caroline), du Loir-et-Cher (MATHON David) et de la Haute-Saône (COLLET Bernard)
- INERIS : LECOMTE Amélie et GOMBERT Philippe
- Université Gustave Eiffel (UGE) : BOUSSAFIR Yasmina
- Université de Montpellier – laboratoire géoscience : VERNANT Philippe
- Comité français de géologie de l'ingénieur (CFG I) : DEVEZE Guilhem, DURVILLE Jean-Louis et relecture collective
- Institut suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA) : MALARD Arnaud
- Association française de karstologie (AFK) : CAILHOL Didier
- Fédération française de spéléologie (FFS) : WIENIN Michel et LANKESTER Maria
- Comité départemental de spéléologie de Charente (CDS 16) : BERGUIN Dominique, COURTOIS Michael et ROUILLE Michel
- Association de recherches spéléologiques de La Rochefoucauld (ARS-LR) : DOUCET Danielle
- Antea Group : CARPENTIER Nicolas et ANTOINET Éric
- Ginger CEBTP : LECOMTE Delphine

Sommaire

1. Introduction	6
2. Définitions des systèmes karstiques	8
2.1. Généralités	8
2.2. Les facteurs contrôlant la karstification	13
2.3. Typologie des karsts	16
3. Nature et conséquences des mouvements de terrain d'origine karstique	24
3.1. Typologie des mouvements	24
3.2. Les processus conduisant aux effondrements et affaissements	34
3.3. Les facteurs aggravants	39
4. Méthodologie d'évaluation de l'aléa	40
4.1. Principe général de la méthode	40
4.2. Données disponibles, cartes informatives	41
4.3. Évaluation de la prédisposition (ou probabilité d'occurrence)	52
4.4. Évaluation de l'intensité	64
4.5. Évaluation finale de l'aléa	70
5. Conclusion	71
6. Glossaire	72
7. Bibliographie	74
7.1. Références sur les mouvements de terrain, les cavités et les risques associés	74
7.2. Références sur le karst et les risques associés	74
7.3. Références antérieures du groupe de travail	77
7.4. Exemple d'études de cas s'inspirant de la présente méthodologie	79
8. Annexes	80
8.1. Compléments sur les systèmes karstiques	80
8.2. Compléments pour l'évaluation de l'aléa	87
8.3. Deux cas d'application	98

1.

Introduction

Le paysage français est exposé à une grande variété de mouvements de terrain répartis sur l'ensemble du territoire. Parmi eux, on recense notamment les instabilités liées à la présence d'un contexte karstique : essentiellement des effondrements et des affaissements, mais aussi parfois d'autres mouvements, plus rares mais localement tout aussi influents, tels que des glissements ou des coulées de boue.

Alors que l'aléa mouvements de terrain liés aux cavités souterraines (anthropiques) abandonnées et celui lié à la dissolution du gypse disposent de méthodes de caractérisation et d'identification adaptées, il n'existait pas, jusqu'à présent, de méthodologie spécifique pour déterminer l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté (hors craie, cf. encart 3). Actuellement, les secteurs karstifiés sont souvent uniquement traités en localisant les événements historiques, sans chercher véritablement à prédire où et comment pourraient se produire de nouveaux mouvements. Les processus souterrains à l'œuvre sont par ailleurs variés et rarement accessibles à une observation directe. Au vu de ces constats, le BRGM et le Cerema se sont associés pour partager leur expertise dans le domaine des mouvements de terrain et proposer une méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté hors craie¹. Il est précisé qu'au regard des vitesses de dissolution très lentes constatées dans les formations carbonatées, l'évolution morphologique des vides par dissolution de la roche en place à l'échelle d'une vie humaine, n'est pas considérée.

Ce guide méthodologique s'articule autour de **trois parties** principales. La première partie est un état de l'art consacré à la **description des systèmes karstiques** (synthèse bibliographique). La seconde partie présente **les mouvements de terrain** pouvant s'y produire en surface ainsi que les principaux facteurs (autrement appelés critères) qui en sont à l'origine. La troisième partie développe **la méthodologie d'évaluation de l'aléa**, avec une présentation des données nécessaires à ce travail. Des compléments d'explication et des exemples de traitement sont enfin fournis en annexes.

¹ Les travaux préparatoires ont donné lieu à l'édition de plusieurs rapports : cf. références en § 7.4

ENCART 1 : MÉTHODOLOGIE POUR GUIDER LES AMÉNAGEURS

Le présent document technique s'adresse aux bureaux d'études amenés à réaliser des études d'aléa mouvements de terrain d'origine karstique, ainsi qu'aux demandeurs, tels les services de l'État et les collectivités en charge de la mise en œuvre et de l'application de la politique de prévention des risques sur des territoires présentant cet aléa.

Il est conçu pour identifier les facteurs d'instabilité et pour évaluer le plus précisément possible l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique. La méthodologie présentée est valable pour la réalisation d'un PAC (porter à connaissance), d'un PPR (plan de prévention des risques) ou d'une étude d'aléa amont (à l'échelle communale ou pluricommunale). Les principes exposés peuvent également être utilisés pour des études spécifiques comme des diagnostics de stabilité effectués à l'échelle d'une parcelle ou d'un linéaire, voire en travaux souterrains (méthode à adapter). Cette méthodologie suit une approche classiquement développée pour ce type d'aléa : la probabilité d'occurrence (prédisposition) aux mouvements de terrain et leur intensité attendue sont évaluées puis croisées. L'approche multicritère proposée présente l'avantage de passer en revue l'ensemble des facteurs pouvant influencer les phénomènes en cause et facilite une gestion ciblée du risque. Les préconisations en matière d'aménagement/construction ne sont pas traitées dans ce guide.

Ce guide a bénéficié d'une revue des pratiques et connaissances internationales sur le karst.

Certains aspects connexes à l'aléa ne sont pas traités dans ce document (réglementation, méthodes de détection, etc.). Le lecteur désirant des informations sur ces sujets pourra consulter la bibliographie du présent document et se référer notamment aux documents suivants :

- Le guide à l'attention des collectivités « La gestion du risque cavités souterraines » (Cerema 2017),
- les *fiches pratiques* du Memento du Maire (<http://www.mementodumaire.net/>),
- le guide Méthode de reconnaissance des cavités (Cerema, 2021).

2.

Définitions des systèmes karstiques

2.1. Généralités

2.1.1. Définition du karst

Note : Les étoiles (*) indiquent les mots définis dans le glossaire, en fin de guide.

D'origine slave, le mot **karst** a avant tout été défini selon une vision géographique et hydrogéologique (cf. figure 1). Il désigne un paysage comprenant des **formes** situées en **surface** (canyons, dolines*, ouvalas*, gouffres*, grottes*, poljés*, vallées sèches*, etc.) et des formes **souterraines** (grottes, galeries, réseaux, etc.). L'ensemble est associé à un **régime hydrologique** spécifique, résultant de la **dissolution des roches** (pour en savoir plus à ce sujet, lire l'Annexe 8.1.1).

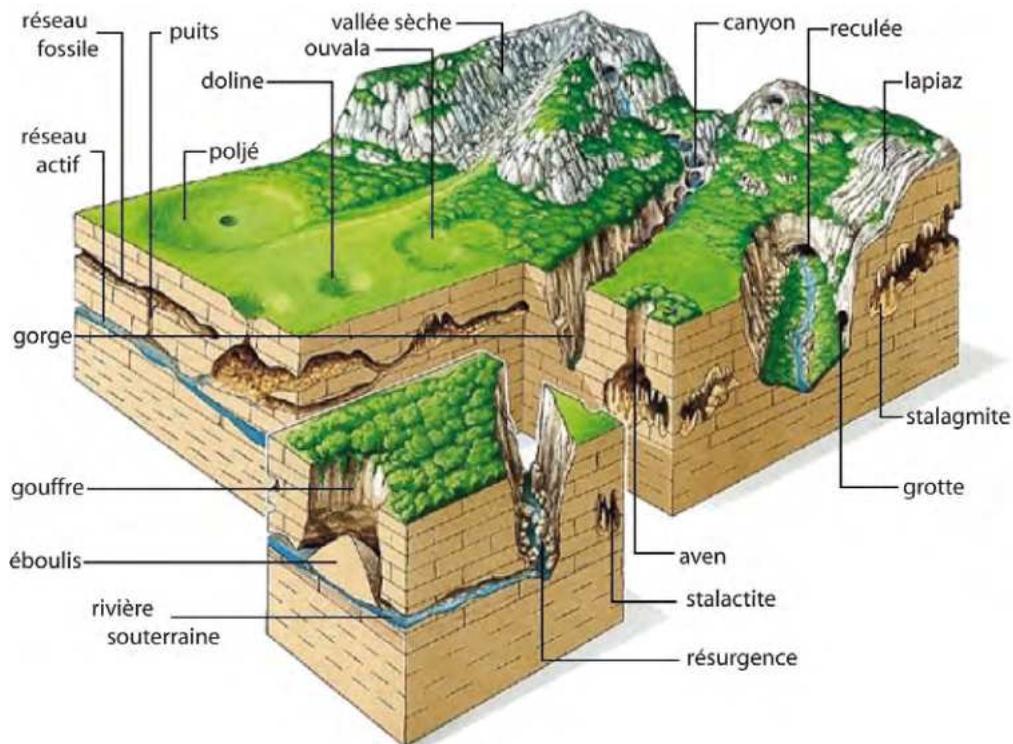


Figure 1 : Schéma conceptuel du relief karstique aérien et souterrain (d'après Archives Larousse).

Cette représentation géomorphologique et hydrogéologique illustre un relief de karst nu de type caussenard (= de cause). Il en existe d'autres : karsts de plaines, karsts sous couverture, karsts de montagne, karsts littoraux, etc. (cf. figure 10).

2.1.2. Les roches karstifiables

De nombreuses roches sont karstifiables, mais à des degrés très variés. On distingue en premier lieu les karsts « vrais » (qui affectent les roches dites « solubles » pour lesquelles les phénomènes, en particulier celui de dissolution, sont largement documentés) des pseudo-karsts (qui affectent des roches peu solubles, voire « insolubles », et qui sont minoritaires) :

- les roches où peuvent se développer des « karsts vrais » (karst *stricto sensu*) sont essentiellement **carbonatées (cf. encart 2)** : particulièrement les calcaires (y compris les craies et les tufs calcaires) mais aussi les dolomies, les marnes, les marbres ainsi que les calcschistes. Il en existe aussi dans les roches évaporitiques (sel, gypse, anhydrite...),
- les processus pseudo-karstiques peuvent se développer notamment dans des grès non carbonatés, des quartzites sédimentaires, les conglomérats, les laves, au sein de quelques roches plutoniques telles que les diorites, les gabbros et parfois même dans certains granites et au sein de certaines roches métamorphiques non carbonatées comme les gneiss et les micaschistes.

Ce guide se focalise sur les **karsts des roches carbonatées** et notamment **ceux des calcaires, dolomies et marnes**. Même si la plupart des aspects traités ici pourraient être transférés à la **craie**, ses particularités (**cf. encart 3**) en limitent, en première approche, l'applicabilité. Quant aux **évaaporites**, elles sont exclues du champ d'application : leur solubilité, bien plus forte que celle des carbonates (une cavité peut s'agrandir de cent à mille fois plus vite), implique en effet des désordres pouvant apparaître très rapidement (par dissolution de la roche en place à l'échelle d'une vie humaine). L'aléa mouvements de terrain liés au gypse a par ailleurs déjà fait l'objet de documents spécifiques, en particulier le guide méthodologique rédigé par l'Ineris et le Cerema (2018).

ENCART 2 : LES ROCHES CARBONATÉES

Les roches carbonatées sont des roches dites biochimiques issues de la précipitation chimique d'ions carbonates (CO_3^{2-}) et de la sédimentation de débris d'organismes à squelettes ou coquilles carbonatées (bivalves, coraux et autres...). Dans cette famille on trouve les calcaires (CaCO_3) et les dolomies ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$) en proportion dominante. Ces roches sont typiques d'environnements lacustres en domaine continental ou de plateformes carbonatées en domaine marin. Selon les conditions d'environnement de dépôt, elles se composent de différents faciès plus ou moins sensibles à la dissolution et donc à la karstification : les faciès contenant une porosité et une perméabilité initiales sont plus sensibles à la dissolution et la karstification s'y développe d'autant plus facilement. La proportion d'argile joue aussi un rôle majeur : les marnes sont généralement peu sensibles à la karstification mais peuvent jouer un rôle de barrière ou d'écran aux écoulements (exemple des interbanes marneux).

ENCART 3 : CAS SPÉCIFIQUE DE LA CRAIE

Les particularités de la **craie** vis-à-vis des autres roches carbonatées sont principalement liées à sa plus forte porosité interne, à sa résistance mécanique globalement plus médiocre (et variable selon la teneur en eau) et à sa plus forte solubilité (en particulier en deçà de l'horizon argilo-humique). Ses caractéristiques sont responsables d'une karstification moins « évidente » (peu de réseaux développés), d'un comportement hydraulique plus diffus et d'une configuration spécifique prenant la forme de racines d'altération (autrement appelées « racines de pénétration » ; Rodet 1992) parfois profondes (cf. figure 2) ; ces dernières correspondant à

une concentration de l'infiltration des eaux et donc de la dissolution. La multitude des faciès présents, rarement retranscrite sur les documents existants, complexifie par ailleurs l'approche cartographique



Figure 2 : Racines d'altération de la craie sur une falaise du littoral normand – BRGM

2.1.3. L'organisation spatiale du karst

Le karst résultant d'une double définition géomorphologique et hydrogéologique est subdivisé selon la diversité des formes qu'il héberge (superficielles et souterraines) et des processus hydrodynamiques associés. Certains termes s'intéressent davantage aux **paysages** (critères géomorphologiques) alors que d'autres décrivent des **modalités d'infiltration des eaux superficielles et d'écoulement des eaux souterraines** spécifiques à ces aquifères (critères hydrogéologiques). On distingue ainsi de la surface vers la profondeur (cf. figure 3) : exokarst, épikarst et endokarst.

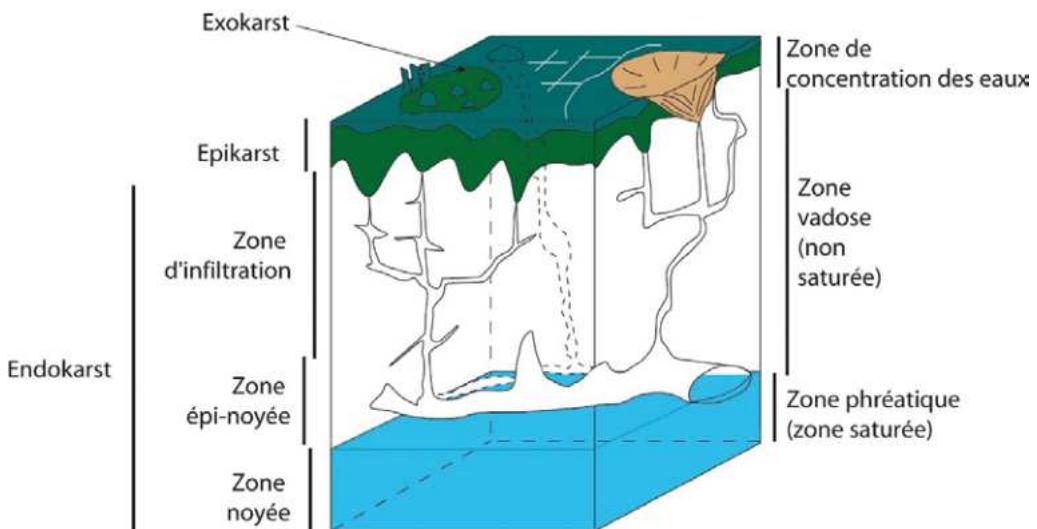


Figure 3 : Zonation verticale de l'aquifère karstique (d'après Camus, 2003)

L'**exokarst** correspond à la morphologie de surface de type lapiaz*, doline*, poljé*, reliefs ruini-formes*, reculée*, canyon, etc. : figure 4.



Lapiaz vertical au cirque de Gavarnie (65) - Cerema



Doline cultivée sur le causse de Sauveterre (48) - BRGM



Relief ruinforme* à La Roque-Sainte-Marguerite (12) - BRGM



Reculée de Baume-les-Messieurs (39) - BRGM

Figure 4 : Exemples de formes exokarstiques

L'**épikarst** constitue l'interface entre la surface (exokarst) et les réseaux de conduits interconnectés du système karstique (endokarst) ; autrement dit, il représente la partie sous-cutanée du karst. Épais de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, il collecte les eaux de surface et les concentre pour les infiltrer dans le massif *via* des zones d'introduction diffuses ou localisées (cf. figure 5). Dans cette zone, la perméabilité de la roche est souvent supérieure à celle en profondeur.



Épikarst, carrière près de Poitiers (86) - Cerema



Conduits verticaux, carrière de Pin (70) - BRGM



Doline et conduits verticaux, carrière de Pin (70) - BRGM

Figure 5 : Exemples de formes épikarstiques

L'**endokarst** correspond à la zone plus profonde où se structurent des réseaux de galeries et de drains interconnectés. On distingue au sein de l'endokarst, la zone vadose (ou non saturée) et la zone noyée (ou saturée) - figure 6 :

- la **zone vadose** peut elle-même être découpée en deux sous-zones : la **zone d'infiltration** par laquelle transite l'eau venue de l'épikarst et la **zone épinoyée** située au-dessus de la zone noyée, où vont se produire les fluctuations, contenues entre les basses eaux (étiage) et les hautes eaux (crues). La zone épinoyée est donc affectée par des phénomènes de mise en charge hydraulique et de déjaugeage. La zone noyée se trouve sous cette zone de battement de la nappe ;
- le toit de la **zone noyée** est en connexion avec l'exutoire* ou avec le niveau de base*. Suivant les caractéristiques de la roche (porosité, discontinuités, stratigraphie, tectonique...), le transit dans cette zone noyée s'organise autour d'un axe de drainage principal, qui prend la forme :
 - soit de conduits karstiques de taille variable (taille tendant à augmenter en se rapprochant de la résurgence) et souvent subhorizontaux ;
 - soit de circulations souterraines plus diffuses dans des discontinuités de tailles réduites et interconnectées (porosité en grand sans drain principal).



Cheminée karstique désobstruée à Chasseneuil-sur-Bonnieure (16) - Cerema



Salle borgne à Reugney (25) - BRGM



Conduits en réseau, pointe de Vallières à Saint-Georges-de-Didonne (17) - Cerema



Conduit noyé à la source du Bouillon (45) – Association « Spéléologie subaquatique du Loiret »



Conduit en zone épinoyée du réseau de La Rochefoucauld-en-Angoumois – Association de Recherches spéléologiques de La Rochefoucauld, G. Fersing

Figure 6 : Exemples d'explorations de l'endokarst

Cette organisation verticale du karst doit être appréhendée (i) pour comprendre la dynamique et le fonctionnement local ou régional du système karstique et en conséquence (ii) pour estimer la capacité du système à générer des mouvements de terrain. Les affaissements et effondrements peuvent en effet être générés par des processus différents (cf. § 1.1) et être induits par le fonctionnement actuel mais aussi provoqués par un fonctionnement passé (galerie fossile proche de la surface par exemple), d'où l'importance de comprendre l'évolution karstique au cours des temps géologiques et au cours du polyphasage de la karstification.

2.2. Les facteurs contrôlant la karstification

La karstification s'initie par l'**attaque acide** du carbonate de calcium sous l'action d'un fluide agressif (tel que de l'acide carbonique ou sulfurique, soit typiquement de l'eau plus ou moins acide²). Cette réaction **dissout** le carbonate de calcium. Le phénomène évolue ensuite sous l'action d'un ensemble de processus complexes, associant des **altérations physico-chimiques et/ou mécaniques** de plusieurs types possibles (corrosion, crypto-altération, fantômisation - figure 7 ; des compléments sont donnés en Annexe 8.1.4). Ces altérations aboutissent à la formation de structures de drainage par élargissement des vides initiaux de la roche encaissante (phénomène d'évidement, encore appelé spéléogénèse). Ces structures s'organisent typiquement le long de chemins préférentiels d'écoulements superficiels et/ou souterrains (discontinuités stratigraphiques ou tectoniques par exemple). L'ensemble est contrôlé par de nombreux facteurs, certains interagissant les uns avec les autres, ce qui en rend la vulgarisation complexe. On peut néanmoins ici distinguer les **caractéristiques originelles** et les **modifications environnementales ultérieures**.



Figure 7 : Exemple d'altération, carrière de Boulton (70), les altérites ont été déblayées par l'exploitant - BRGM

2.2.1. Les caractéristiques originelles

De nature géologique, ces caractéristiques originelles jouent un rôle prédominant dans la localisation de la karstification depuis l'échelle régionale jusqu'à celle des réseaux karstiques eux-mêmes :

- la **composition chimique** des roches les rend plus ou moins sensibles à la dissolution. La présence de dolomie dans la roche peut ainsi conduire à une dissolution plus lente du massif. La présence d'argile et/ou d'intercalations de marnes modifie par ailleurs la circulation des écoulements ;

² L'action de produits chimiques d'origine anthropique peut en théorie modifier la roche. La prise en compte d'une telle action nécessite des études spécifiques.

- la **structure** influe également sur la dissolution : plus la porosité et la perméabilité initiale de la roche sont grandes, plus l'eau aura la capacité d'y circuler, et plus cette dissolution pourra s'initier et se propager rapidement ;
- les **discontinuités dans le massif calcaire (joint de stratification, fracturation, lithologie)** initient des circulations d'eau et donc de la dissolution, tant à l'échelle microscopique (taille des grains et texture) qu'à l'échelle macroscopique, ce qui y favorise ensuite le développement des réseaux.

Dans ses études, l'Isska³ a constaté que 70 % des conduits karstiques se concentrent dans seulement 10 % du volume karstique au niveau d'horizons stratigraphiques particuliers ou de plans de fracture. Le terme « d'horizon d'inception » est proposé pour ces discontinuités particulièrement sensibles à la karstification (Filipponi *et al.*, 2012).

2.2.2. Les modifications environnementales ultérieures

À l'échelle des temps géologiques, les principales modifications environnementales sont liées à l'**agressivité de l'eau** et aux **conditions hydrodynamiques**. Ce dernier paramètre varie plus rapidement que les autres et peut s'inscrire dans une échelle de temps beaucoup plus courte, comme celle de la vie humaine, voire à l'échelle des cycles hydrologiques annuels ou interannuels. Ces paramètres fluctuant dans le temps ont des répercussions sur l'adaptation des systèmes karstiques et les risques associés, dont les mouvements de terrain.

a) L'agressivité de l'eau

L'agressivité des fluides qui karstifient un massif carbonaté peut provenir de **différentes origines** (cf. figure 8) :

- **épigène** : l'acide carbonique issu de l'atmosphère et/ou du sol (par ailleurs fonction du climat) ;
- **hypogène** : de sources profondes (CO₂, H₂S), indépendantes de la recharge de surface.

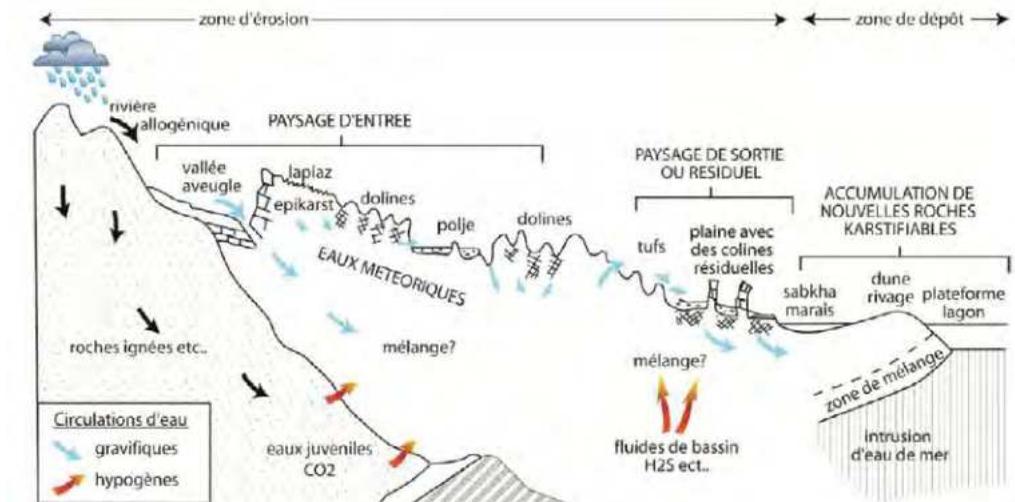


Figure 8 : Schéma des circulations d'eau dans le système karstique (Husson, 2013 ; d'après Ford et Williams, 1989)

La méthodologie développée dans ce guide l'a été à partir des concepts de la karstification épigène. Pour plus d'informations sur les processus hypogènes, lire l'Annexe 8.1.2.

³ Institut Suisse de spéléologie et de karstologie

b) L'hydrodynamisme

Le terme « hydrodynamisme » est utilisé dans ce guide pour décrire le **fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du site karstique étudié**, en particulier (i) les modalités d'entrée et de sortie des eaux et (ii) le transfert des eaux entre la surface et le souterrain.

Au niveau de l'entrée (zone d'introduction de type unaire, binaire, ternaire... fonction des modes d'entrée des eaux dans le système karstique, cf. figure 14), l'infiltration peut être **diffuse** (via une couverture, un sol, un épikarst) ou concentrée (par une perte* par exemple). Cette dernière peut être **pérenne** (comme les pertes de la Loire constamment alimentées par les eaux du fleuve à Orléans) ou **temporaire** (cas du ruissellement lié aux intempéries en contexte de karst de contact : cf. § 2.3.3).

Les modalités de **sortie** (zone de restitution) sont généralement considérées comme contrôlées par le **niveau de base**. Celui-ci étant difficile à définir en raison des nombreuses configurations possibles, nous considérons ici qu'il s'agit de la position altimétrique des points de restitution (sources et résurgences). L'organisation interne et le fonctionnement du système karstique sont étroitement reliés à ce niveau de base. Ce dernier varie à l'échelle des temps géologiques. Il est généralement considéré comme constant à l'échelle humaine, en dehors d'événement catastrophique d'origine climatique ou anthropique.

Entre les entrées et les sorties, l'**interconnexion des réseaux** induit un fonctionnement hydrogéologique complexe avec par exemple des mises en charge, des siphons... Ce fonctionnement est à considérer dans la méthodologie dans la mesure du possible. L'Annexe 8.1.3 développe ces modalités d'entrée et de sortie des eaux.

Les paramètres qui fluctuent dans le temps à l'échelle des temps géologiques sont à distinguer de ceux qui évoluent à échelle humaine :

- **à l'échelle des temps géologiques**, le niveau de base est essentiellement contrôlé par l'eustatisme (le niveau des mers) et la géodynamique (surrection et subsidence). Lors d'une surrection ou d'une baisse eustatique, le niveau de base va s'enfoncer dans le massif. Lors de subsidences ou de remontées du niveau marin, le niveau de base local remonte également. Le niveau de base ayant régulièrement fluctué provoque plusieurs successions de chutes/remontées du niveau noyé. Cette variation dans le temps est responsable de plusieurs phases de karstification (altération *in situ* du massif pouvant être considérée comme la phase initiale de la spéléogénèse). Il est important de prendre en compte ces paléo-karstifications, car les systèmes karstiques actuels sont en général préstructurés par ces phases anciennes. Plus un massif a subi de phases de karstification, plus l'intensité de la karstification actuelle (densité de cavité et interconnexions) risque d'être importante. Ce polyphasage doit donc être pris en compte dans la problématique des mouvements de terrain en milieu karstique ;
- **à l'échelle humaine**, ce sont les niveaux piézométriques, et par conséquent le gradient hydraulique (cf. figure 9), qui jouent un rôle sur **les mouvements de terrain** (rôle majeur des interactions hydrodynamiques entre la surface et les vides sous-jacents). Cette influence se fait notamment **à l'échelle du cycle hydrologique** (étiage/crue). L'homme peut être à l'origine de modifications du niveau piézométrique : par exemple lors de la construction d'un barrage ou d'une retenue d'eau, d'un bassin avec concentration des eaux, de pompages, etc. Le changement climatique modifie aussi les équilibres et bouleverse les cycles hydrologiques avec des périodes d'étiage plus longues et des épisodes de pluies plus intenses.

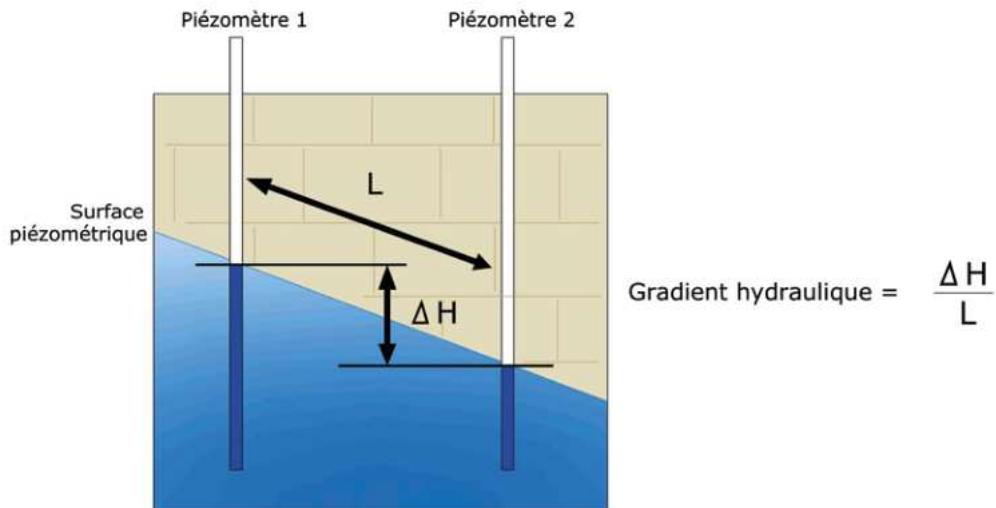


Figure 9 : Définition du gradient hydraulique

2.3. Typologie des karsts

2.3.1. Classification géomorphologique

La classification géomorphologique distingue les karsts en fonction de critères géologiques, structuraux et bioclimatiques **locaux**. On distingue en France : le karst caussenard, le karst jurassien, le karst de haute montagne, le karst méditerranéen, le fluviokarst, le karst de la craie... Chaque pays, chaque région ont ainsi leur propre classification : le karst dinarique en Europe, le karst tropical (en Chine, à Cuba...), etc.

En France métropolitaine, 40 % de la superficie est affectée par des phénomènes karstiques en surface. Des karsts existent également **en outre-mer**.

La carte géomorphologique des karsts de France métropolitaine (cf. figure 10) classe les environnements karstiques par type de climat (haute montagne, méditerranéen), de relief (chaînes de montagnes, plateaux, plaines) ou encore par environnement géologique (chaîne plissée, plateaux couverts, karst des gypses...). Elle permet de schématiser l'étendue et la variété des régions karstiques du territoire métropolitain. Pour plus de détails sur la typologie de ces paysages et leur mise en place au cours des temps géologiques, voir la notice accompagnant la carte géomorphologique des karsts de France (Nicod, 1995).

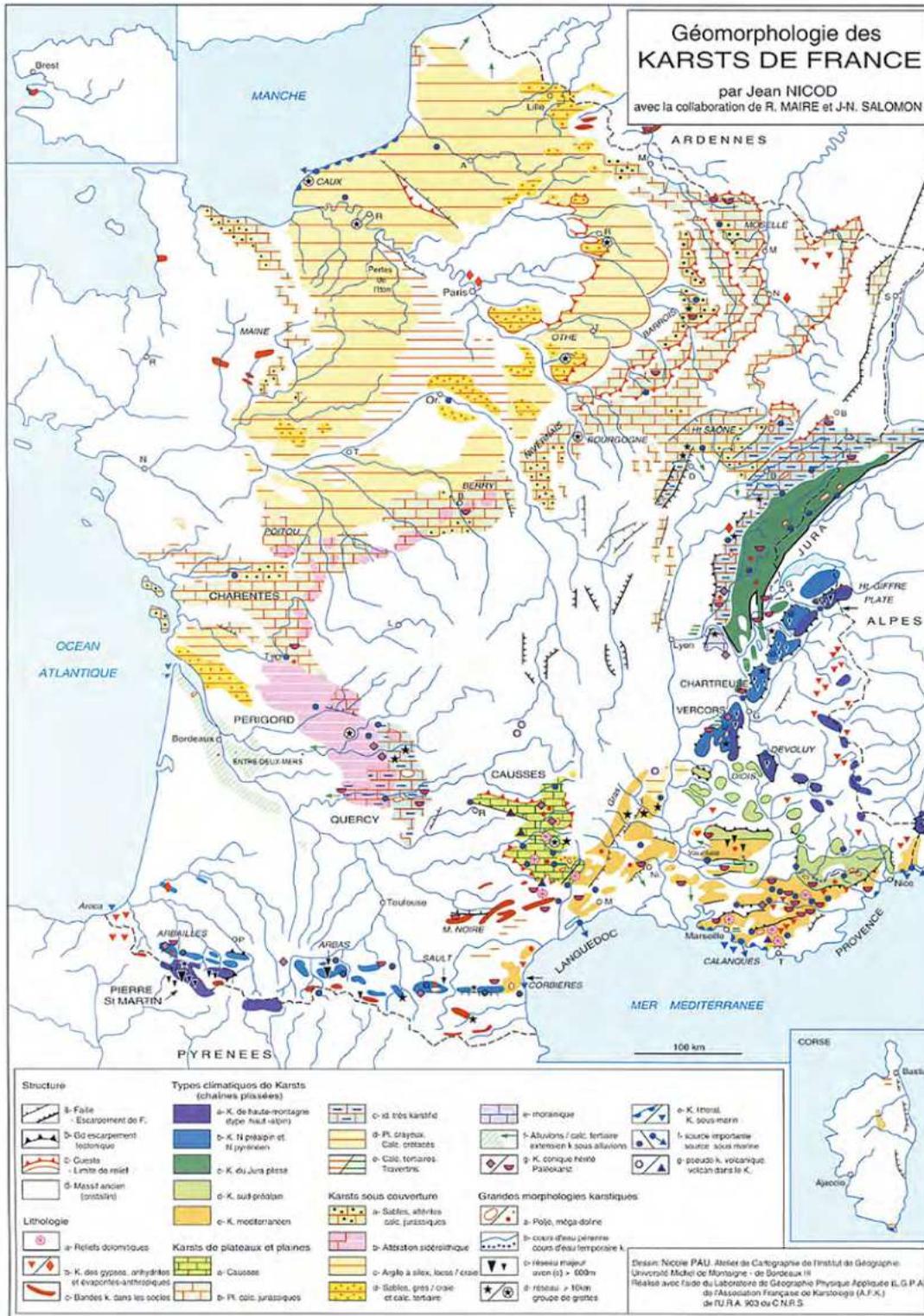
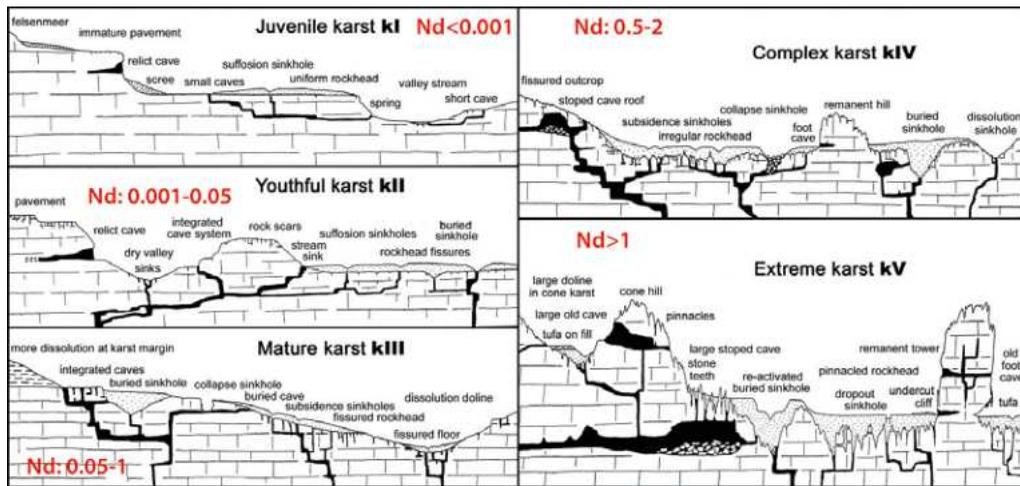


Figure 10 : Carte géomorphologique des karsts de France (Nicod, 1995)

2.3.2. Classification en ingénierie

Les paysages karstiques peuvent aussi être distingués en fonction de la « maturité » de leur paysage, de leurs formes associées et de leur évolutivité. La classification développée par Waltham & Fookes (2003) vise à conjuguer ces trois paramètres afin de prévoir la complexité des travaux d'aménagement (cf. figure 11). En fonction entre autres du taux d'apparition de mouvements de terrain (affaissements et effondrements) par kilomètre carré et par an, elle distingue cinq types de paysages karstiques, depuis le stade « juvénile » jusqu'au stade « extrême ».



Nd : taux d'apparition de nouveaux effondrements par kilomètre carré et par an

Figure 11 : Classification du degré de karstification en cinq catégories (Waltham & Fookes, 2003).

2.3.3. Classification retenue pour ce guide : karst « nu » versus karst « sous couverture »

L'apparition de mouvements de terrain d'origine karstique est liée à deux paramètres principaux : la configuration des terrains superficiels et profonds et le fonctionnement hydrodynamique des systèmes associés. L'interaction entre ces deux paramètres varie fortement suivant la présence et l'épaisseur d'une couverture :

- en contexte de **karst « nu »**, le substratum carbonaté (la roche) affleure (cf. figure 12). Il peut être recouvert par un horizon pédologique (sol) sur une très faible épaisseur et de manière sporadique (non cartographiable) ;
- en contexte de **karst « sous couverture »**, le substratum est surmonté d'une formation reconnue (cartographiable), non karstifiable (cf. figure 12). Cette couverture peut être classée par nature (argileuse, sableuse...) et/ou par origine (morainique, alluviale, d'altération...).

En France métropolitaine (552 000 km²), le karst nu concerne 40 000 km² (7 % du territoire) alors que le karst sous couverture intéresse 170 000 km² (31 %) - figure 13.



Karst nu avec lapias et gouffre (Parmelan - 74).
BRGM



Karst sous couverture alluviale (Olivet - 45).
Cliché F. Isambert

Figure 12 : Exemples de karst nu et sous couverture

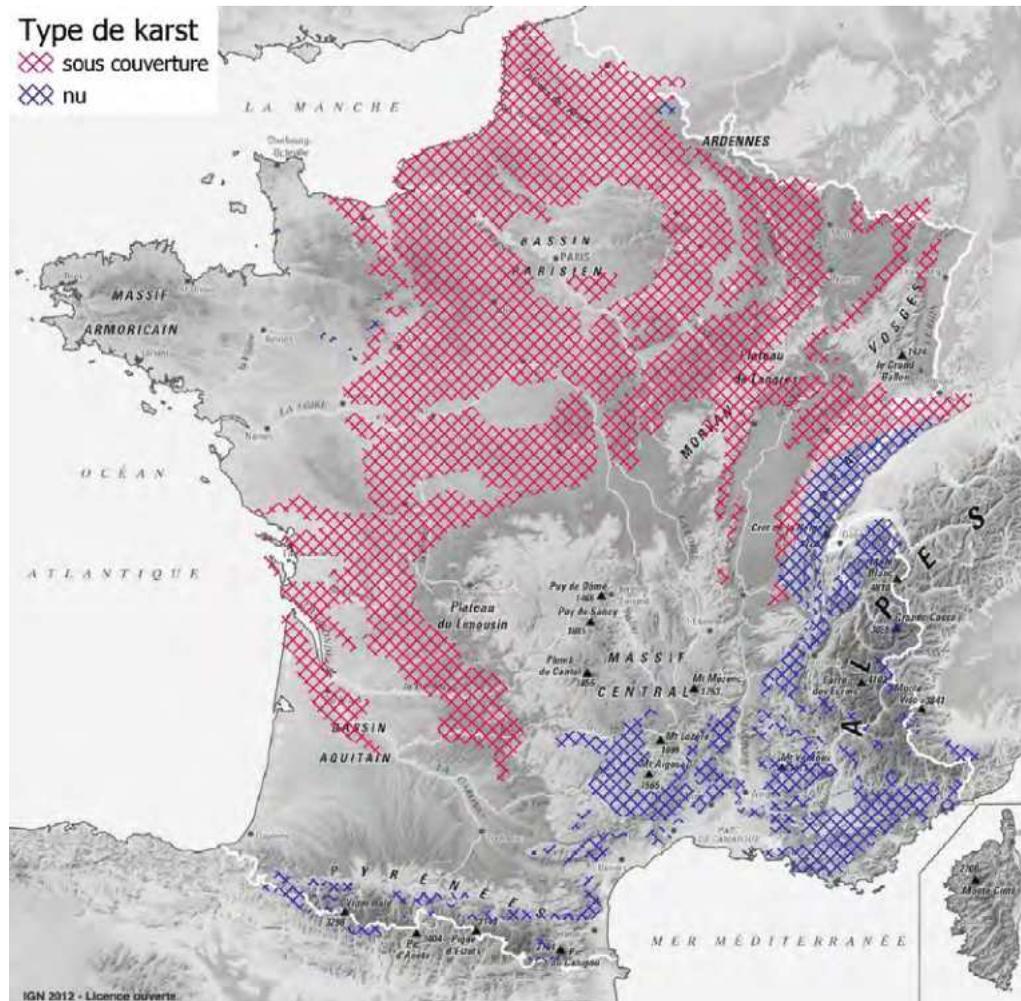


Figure 13 : Carte simplifiée du karst en France (d'après Nicod et al., 2010).

a) Spécificités d'un karst nu

Dans un environnement de karst nu, l'**apport d'eau** est moins tamponné/régulé que dans le karst sous couverture car l'eau s'infiltré directement dans la roche. La recharge est alors fonction des épisodes pluvieux (intensité et durée) et donc irrégulière. L'infiltration se fait par l'intermédiaire des discontinuités de surface de type fissures (configuration appelée « lapiaz » ou « lapiés ») et peut être stockée temporairement dans un épikarst sous-jacent. Drainée par gravité vers la zone vadose, l'eau s'écoule rapidement.

L'irrégularité des apports d'eau génère des variations marquées et rapides des niveaux piézométriques (nappes perchées et phréatiques) à l'origine de modifications des écoulements souterrains lors de mises en charge soudaines. Cette spécificité du karst nu contribue à **deux situations instables** :

- en cas de crue du système, la zone noyée ne peut pas absorber toute la recharge et le système se met alors en charge : un réseau complexe de boucles de trop-plein se développe dans la zone épinoyée. Dans le cas d'une zone épinoyée peu profonde et de fortes crues, ces cheminées peuvent être proches de la surface et ainsi être à l'origine d'instabilités locales de type rupture de toit (cf. § 1.1) ;
- lorsque le réseau en charge intercepte la surface (flanc de vallée par exemple), de fortes mises en charge peuvent générer des glissements, des coulées de boue (processus d'extrusion - cf. § 1.1).

b) Spécificités d'un karst sous couverture

Ici, cette appellation est à prendre **au sens large** : elle regroupe le karst « sous couverture » stricto sensu (la couverture est issue d'un dépôt ultérieur, elle est allochtone*) et le karst « couvert » (la couverture est issue de l'altération du substratum, elle est autochtone*).

La perméabilité de la couverture joue un rôle primordial dans la déstabilisation des terrains :

- une **couverture imperméable** (de nature argileuse par exemple) limite, voire empêche l'infiltration dans la masse rocheuse (cf. figure 14, cas 1), sauf si elle est localement absente (couverture percée : figure 14, cas 3 ou discontinue : figure 14, cas 5), comme dans le cas du karst de contact. Elle joue alors le rôle de collecteur d'écoulement et provoque la concentration des eaux de surface au niveau de l'épikarst (zone de perte concentrée). L'infiltration de ces concentrations d'eau est alors rapide et irrégulière : à cet endroit, la structuration du karst en zone vadose et épi-noyée est semblable à celle du karst nu et se traduit par un réseau de drains et de conduits mis en charge (de type conduite forcée) et donc sollicité, en particulier de manière mécanique ;
- une **couverture perméable à semi-perméable** (de nature granulaire à limoneuse) tamponne/régule en revanche l'infiltration des eaux dans le karst. La recharge se fait alors de façon plus diffuse et régulière, laissant davantage de temps à une action chimique des eaux d'infiltration. En termes de spéléogénèse, le développement de la zone épinoyée est de ce fait limité, ce qui provoque, à l'échelle d'un grand système, le développement progressif de conduits tabulaires, préférentiellement à la profondeur du niveau piézométrique – ou juste en dessous.

Dans le cas de couvertures semi-perméables, ces environnements karstiques sont dominés par la dissolution sous couverture et sont également à l'origine d'une altération masquée, qu'on appelle la crypto-karstification (pour en savoir plus à ce sujet, lire l'Annexe 8.1.4).

Le comportement géotechnique et hydrogéologique de la couverture influe sur l'apparition et l'intensité des mouvements de terrain suivant quatre autres paramètres significatifs :

- en fonction de la **cohésion de la couverture**, les mouvements de terrain (en surface) peuvent se matérialiser progressivement (effet sablier dans une couverture purement pulvérulente) ou brutalement (rupture du « toit » d'une cavité aveugle progressivement mise en place au sein d'une couverture cohésive) ;

- l'**épaisseur** de la couverture joue quant à elle principalement sur le diamètre du désordre mais aussi sur la fréquence d'occurrence (au-delà d'une certaine épaisseur, les occurrences des désordres deviennent faibles) ;
- la **position et la variation du niveau piézométrique** (de la nappe karstique et éventuellement de la nappe de couverture) diminuent dans certains cas la résistance mécanique de la couverture ;
- la **recharge** joue enfin sur la vitesse d'infiltration, dans la zone vadose notamment, et donc sur la stabilité en surface.

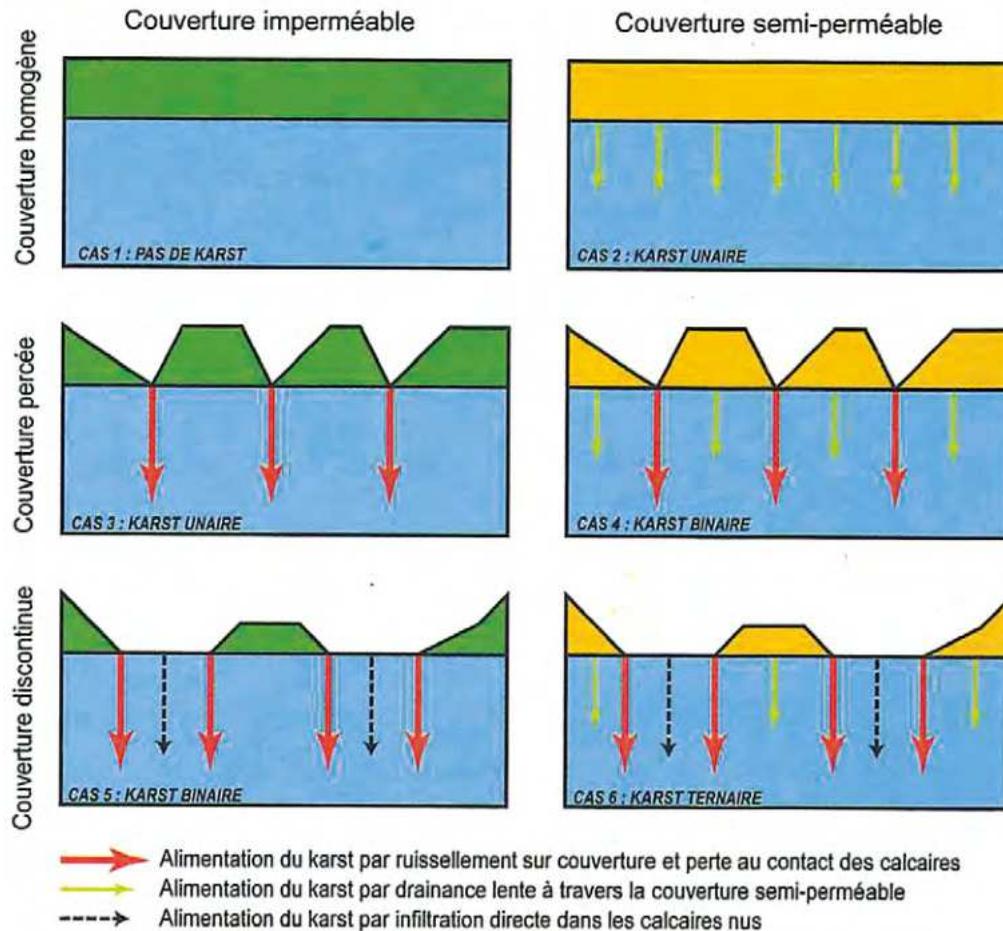


Figure 14 : Typologie des karsts sous couverture (d'après Jaillet, 2010). Classement fait selon le type et la répartition de cette couverture induisant jusqu'à trois modes d'infiltration (unaire, binaire, ternaire)

c) Le cas des karsts de contact

Le contact géologique entre le karst nu et un autre type de terrain (c'est-à-dire montrant des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques différentes⁴) est appelé karst de contact. Différentes configurations peuvent être rencontrées :

- un premier cas correspond à la configuration dans laquelle le karst nu est en position aval vis-à-vis d'une formation peu perméable (cf. figure 15). Dans cette situation, les ruissellements de surface venant de la formation peu perméable s'infiltrent par des pertes dans la formation

⁴ Par exemple : un karst sous couverture peu perméable, un calcaire non karstifié sous couverture peu perméable, un terrain cristallin, etc.

- karstique, non seulement en raison du changement de perméabilité, mais aussi de possibles ruptures de pente entre les deux formations. Il s'agit dans ce cas de karsts de contact tels que définis par Jaillet (2005) ou de **karsts d'introduction** (Rodet, 1992) ;
- un deuxième cas correspond à la configuration dans laquelle le karst nu est en position amont vis-à-vis d'une formation peu perméable ; dans cette situation, on rencontre des émergences* qui drainent la nappe karstique (cf. figure 16) ; il s'agit de **karsts de restitution** (Rodet, 1992).

Les karsts de contact peuvent se rencontrer dans trois contextes géologiques différents :

- Contact lithostrati-graphique avec calcaire en dessous des formations peu perméables et facilement érodables (par exemple liserés karstiques de Lorraine).
- Zone plissée mettant à la surface l'ensemble de la formation géologique (par exemple Haut-Jura).
- Contact tectonique (par exemple plateaux de Haute-Saône).

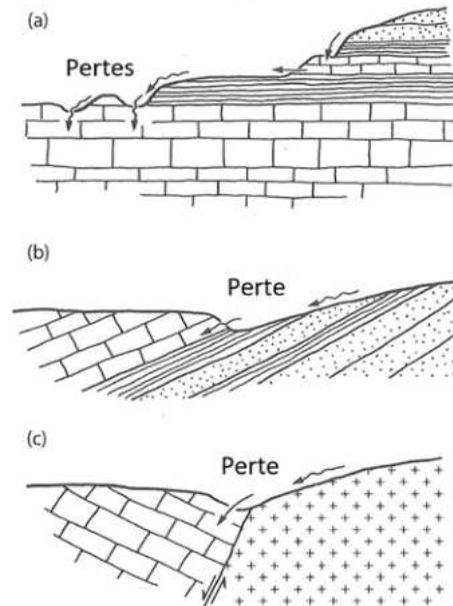
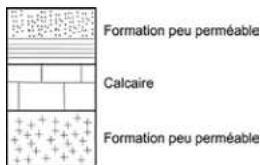
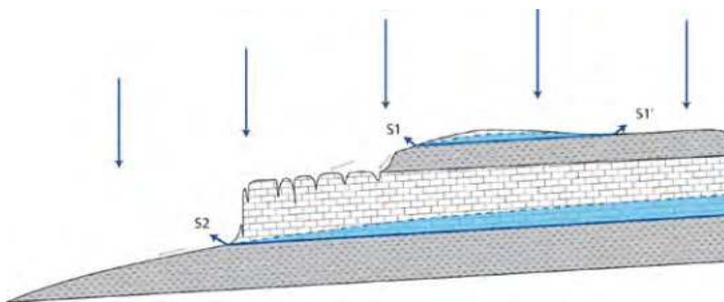


Figure 15 : Exemples de karsts d'introduction (karst nu en contact aval avec une formation peu perméable - d'après Ford & Williams, 2007)



Karsts de restitution, avec deux sources en aval pendage (S1 et S2) et une source en amont pendage (S1').

Les couches grises sont imperméables (marnes par exemple).

Figure 16 : Exemple de karsts de restitution (d'après Cornet & Lelong, 2006)

Étant le siège de forts changements d'infiltration et de circulation d'eau, les karsts de contact constituent des secteurs propices aux mouvements de terrain (Jaillet, 2005 ; Perrin *et al.*, 2013, 2014 b ; figure 17) et doivent être bien pris en compte dans l'approche méthodologique, notamment lors de la phase cartographique.

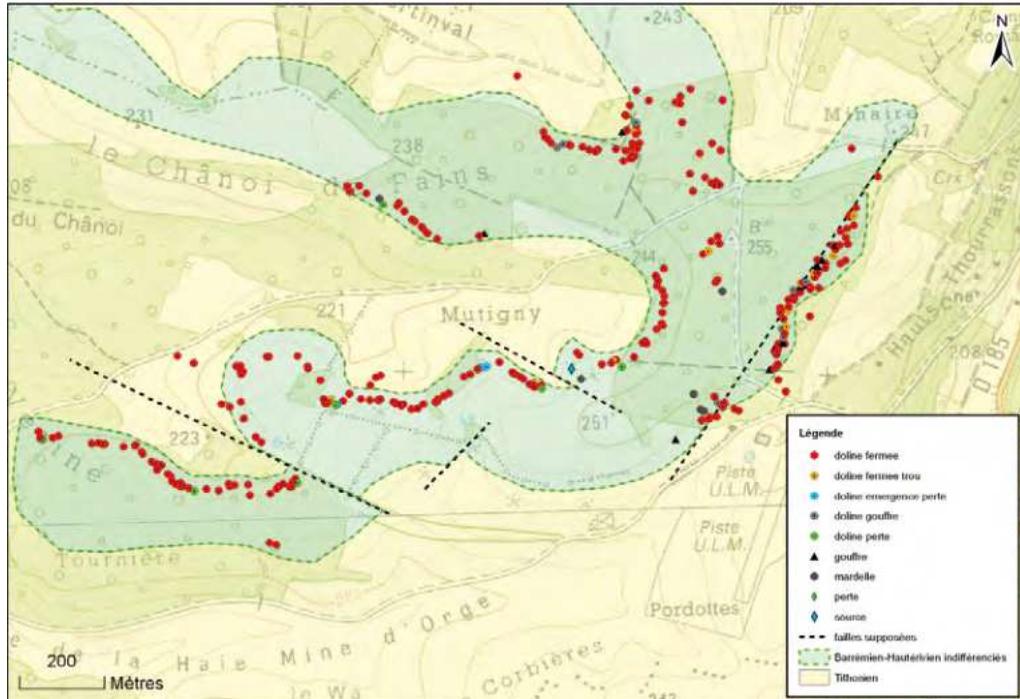


Figure 17 : Carte des morphologies karstiques du bois de Vaux-Vauthier (55 – Perrin et al., 2013)

Il faut noter qu'en fonction du contexte géologique, la formation calcaire karstifiable peut se prolonger en amont du karst de contact sous la couverture peu perméable ou, au contraire, n'être présente qu'en aval du contact (cf. figure 15-b et c). Il s'agit également d'une zone où la concentration des écoulements et des infiltrations accroît l'érosion des sols de surface : les dépressions topographiques locales qui en résultent éventuellement peuvent être confondues, à tort, avec les indices d'une instabilité souterraine (cf. § 4.2.3).

Il est utile de préciser que la zone relative aux karsts de contact peut être évolutive dans le temps si l'érosion des formations superficielles est intense (par exemple, recul de la formation peu perméable sur la figure 15-a). En conséquence, les secteurs directement en aval du karst de contact actuel peuvent correspondre à une zone karstifiée susceptible d'être encore partiellement active ou d'être réactivée par exemple lors d'aménagements.

3.

Nature et conséquences des mouvements de terrain d'origine karstique

Pour rappel, la méthode présentée ici s'applique uniquement aux mouvements de terrain directement liés au karst et pouvant, à l'échelle d'une vie humaine, générer des désordres de nature à remettre en cause la sécurité des biens et des personnes (mouvements de terrain qualifiés de « principaux »). Ce chapitre décrit ces mouvements de surface (cf. § 3.1.1) ainsi que les processus souterrains impliqués (cf. § 3.2).

Il fournit également quelques indications sur d'autres désordres possibles (non concernés par la méthode - cf. § 3.1.2), à savoir : les mouvements de terrain « connexes » aux formes karstiques : glissements de terrain (au niveau des pertes ou des zones de résurgence notamment), ravinements localisés et coulées de boue. Certains affaissements de terrain peuvent aussi être associés à d'autres processus tels que la consolidation (tassement) des sols, en lien notamment avec des perturbations d'ordre hydro(géo)logique.

3.1. Typologie des mouvements

3.1.1. Les principaux mouvements de terrain de surface

Il s'agit des mouvements de terrain déclenchés par la descente des terrains de surface vers les vides souterrains : les affaissements et les effondrements. Objets principaux d'attention pour la qualification de l'aléa, ces mouvements de terrain sont concernés par trois phases plus ou moins lentes : une **maturation** (dégradation de la configuration souterraine, difficilement visible), aboutissant à l'**apparition** d'une déformation (plus ou moins rapide) à la surface du sol (à considérer comme la phase la plus critique pour les enjeux), déformation qui progresse ensuite vers une ultime phase d'**évolution** (réajustement des terrains).

a) Les effondrements et affaissements

Deux types de mouvements de terrain sont ainsi classiquement associés au karst : les **effondrements** et les affaissements. Un affaissement peut être le signe précurseur d'un effondrement. Dans les deux cas, les déformations engendrées à la surface du sol sont habituellement pseudo-circulaires⁵. Leurs diamètres varient de quelques décimètres à quelques mètres et peuvent atteindre, de manière exceptionnelle, quelques dizaines de mètres. Les **profondeurs** sont généralement comprises entre quelques décimètres et quelques mètres, mais peuvent s'avérer nettement plus importantes dans le cas d'un grand réseau de vide(s) sous-jacent(s) et/ou d'une forte épaisseur de couverture. Des illustrations sont fournies ci-après (cf. figure 18 à figure 21) : elles sont organisées par taille de mouvement, suivant les classes d'intensité usuelles (cf. § 4.4.2).

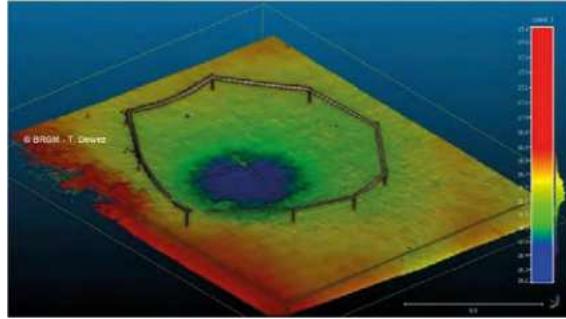
Les principales différences entre ces deux mouvements concernent leur **cinétique d'apparition** et les **déformations** engendrées :

- un affaissement conduit à une **dépression aux pentes peu marquées**, sans rupture des terrains (cf. figure 18). Les affaissements sont considérés comme des mouvements **lents**, pouvant

⁵ Leur forme finale peut quelquefois être plus complexe, par exemple lorsque plusieurs événements proches se rejoignent (coalescence) ou lorsqu'un conduit karstique allongé s'effondre de manière linéaire (suivant les axes de drainage et/ou ceux de fracturation).

évoluer pendant plusieurs années, voire dizaines d'années, ce qui limite souvent l'observation de leur apparition et de leur évolution ;

- un effondrement aboutit à une **dépression marquée aux bords francs** (cratère, fontis, perte), avec une rupture des terrains (cf. figure 19, figure 20 et figure 21). Alors que leur maturation peut être longue, leur apparition en surface est souvent soudaine (quelques secondes à quelques heures).



Affaissement sur les rives de la Tardoire (16) - Cerema

Traitement photogrammétrique d'un affaissement à Orléans (45) - BRGM

Figure 18 : Exemples d'affaissements



Effondrement associé à un soutirage proche de l'aire du Larzac de l'A75 (12) - Cerema



Effondrement lié à la rupture du toit rocheux à Castelnaud-le-Lez (34) - Cerema



Effondrement lié au déboufrage de cheminées à Saint-Maixant (33) - Cerema

Figure 19 : Exemples d'effondrements d'intensité limitée (diamètre inférieur à 3 m)



Effondrement à Thiviers (24) - Cerema



Effondrement à Darvoy (45) - BRGM



Effondrement à Sandillon (45) - BRGM



Effondrement dans le lit du Bandiat (16) - Cerema

Figure 20 : Exemples d'effondrements d'intensité modérée (diamètre compris entre 3 et 10 m)

Effondrement
à Cézan (32) -
BRGM



Effondrement
sur les rives du
Bandiat (16) -
Cerema



Figure 21 : Exemples d'effondrements d'intensité modérée à élevée (diamètre proche de 10 m)

b) Les glissements, coulées de boue et éboulements

En plus des affaissements et effondrements, le karst peut dans certains cas générer des **désordres au niveau des versants**, sous la forme de **glissements**, de **coulées de boue** et/ou **d'éboulements** (cf. figure 22). Ces mouvements sont principalement associés au processus d'extrusion (§ 3.2.4). Pour rappel, les glissements de terrain issus de l'ajustement des terrains surplombant les formes karstiques sont ici considérés comme des mouvements secondaires : des éléments à ce sujet sont fournis au § 3.1.2.

Les risques générés par de tels mouvements de terrain sont détaillés dans d'autres documents (cf. en bibliographie § 7.1, et en particulier le guide *PPRN mouvements de terrain* (ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement & ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, 1999)).



Figure 22 : Exemple de coulée de boue et d'éboulement suite à une extrusion, Saint-Maurice-Navacelles (34) - Cerema

3.1.2. Autres désordres possibles en surface

a) Les mouvements de terrain connexes à l'activité karstique

Certains mouvements de terrain ne sont **pas directement liés au karst** ou alors lui sont **secondaires**. Les indications fournies ici pourront être gardées en mémoire, en particulier dans le cas d'une étude d'aléa menée à une échelle fine. La méthodologie objet de ce guide ne traite pas ces mouvements de terrain.

La déstabilisation des bords des formes karstiques

La plupart des formes karstiques sont marquées par une pente plus ou moins forte, qui peut naturellement être instable, en particulier dans les zones de pertes ou dans le cas d'un effondrement récent (bords francs et matériaux de surface peu résistants et sensibles à l'eau – cf. figure 22).

Cette déstabilisation est marquée par des **ruptures**, des **glissements** ou des **ravinements**. Elle se fera lentement ou par à-coups successifs. Elle aboutira à terme à un recul des bords de la forme, jusqu'à l'obtention d'une **pente d'équilibre** et à un remplissage entier ou partiel du fond de la forme (cf. figure 23). L'extension et la cinétique de ce mouvement secondaire varient en fonction du comportement géotechnique des matériaux présents et des sollicitations extérieures (surcharges, arrivées d'eau, etc.).

Dans les études, cela peut rendre délicat le diagnostic d'une telle forme.

En termes de **risque**, ce mouvement secondaire peut être considéré (à court/moyen terme) comme une menace à prendre en compte dès la constatation du mouvement primaire/initial. Dans le cas toujours possible où de tels mouvements secondaires puissent « prendre le pas » sur ceux directement liés au karst (par exemple pour des dolines profondes avec des bords francs ou constituées de matériaux sensibles à l'eau), une évaluation spécifique devra être menée, éventuellement site par site. Il s'agira d'utiliser les méthodes d'évaluation classiques de la stabilité des terrains.

Le tassement de matériaux mobilisés suite à un mouvement de terrain

Suite à des mouvements de terrain de type affaissement ou effondrement (cf. figure 23), le **remaniement** des matériaux mobilisés diminue leur densité et leur portance au profit de leur volume (foisonnement*). Ils vont alors peu à peu se réarranger, d'autant plus s'ils sont hétérogènes et/ou soumis à une surcharge.

Cette consolidation génère un **tassement** visible au niveau de la surface du sol.

Le tassement des sols de surface – par consolidation

La topographie du toit d'une roche karstifiée est très souvent d'apparence chaotique (front d'altération du toit rocheux et crypto-karst) : elle présente des creux et des bosses, parfois marqués et formant des pinacles rocheux alternant avec des passages plus ou moins altérés (argiles de décalcification par exemple). Lorsque le karst est couvert ou sous couverture, cette topographie est masquée (cf. figure 24). Les **épaisseurs de couverture** sont alors **très variables**. La déformabilité des zones de remplissage peut par ailleurs être soit accentuée (dans le cas de matériaux décomprimés dans ces remplissages), soit réduite (dans le cas contraire).

Les contraintes exercées par un aménagement peuvent alors engendrer des **tassements différentiels** du sol avec d'éventuelles conséquences sur les constructions sans toutefois mettre en cause leur stabilité immédiate.



Figure 23 : Exemple de déstabilisation des bords d'un effondrement sur les rives du Bandiat (16) - Cerema

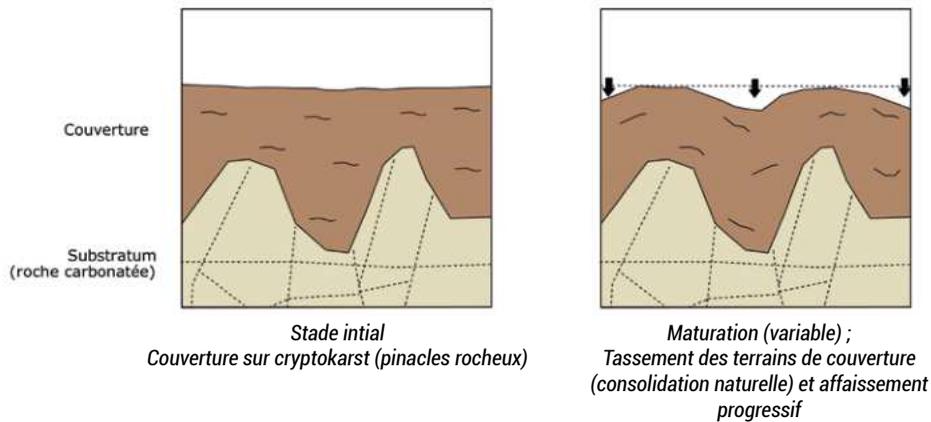


Figure 24 : Tassements de la couverture par consolidation

Le tassement des sols de surface – par hydro-compaction / lessivage

Sans qu'il y ait besoin pour cela de vide sous-jacent, le **transport vertical de particules fines vers le bas du profil pédologique (lessivage hydrique)** peut créer, en surface, une dépression topographique correspondant à ce qu'on appelle « fausse doline » (cf. figure 25). Ce processus pourrait s'apparenter à celui de suffosion/soutirage (cf. § 3.2), à ceci près qu'il est considéré comme bien plus lent et sans présence de vide sous-jacent (mouvement de terrain sans origine karstique).

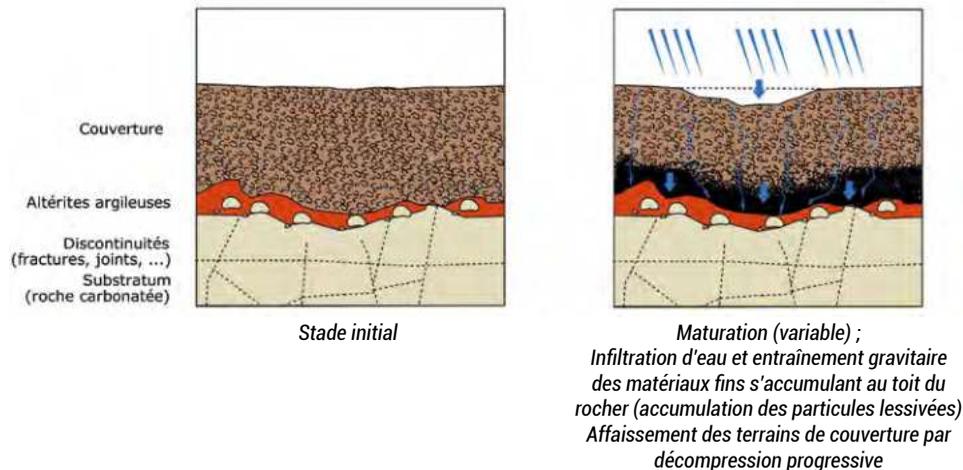


Figure 25 : tassement de la couverture par « hydro-compaction »

b) Perturbations de nature hydro(géo)logique

Compte tenu de la géomorphologie d'un paysage karstique (§ 2), celui-ci peut aussi être affecté par des perturbations **hydrologiques** (concernant uniquement la surface du sol) ou **hydrogéologiques** (avec une part « souterraine »). Là encore, l'évaluation de ces manifestations n'est pas incluse dans le présent guide. Si besoin, elle doit faire l'objet d'études spécifiques (analyse piézométrique, mesures de débit, etc.).

Les inondations de points bas (dolines, poljé, etc.)

S'ils sont peu perméables ou ne disposent pas d'exutoire suffisant, les points bas topographiques que constituent la plupart des formes karstiques peuvent être **inondés** par des arrivées d'eau (cf. figure 26). De telles inondations peuvent déstabiliser les éventuels points d'infiltration en fond de dolines et les bords des formes karstiques.



Vue de la vallée inondée de la Retrève vers l'ouest

Doline inondée – vue vers le nord (autoroute A10 au 1^{er} plan)

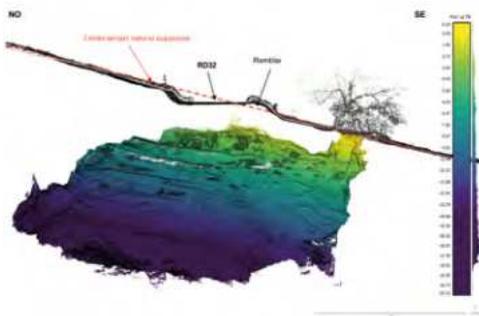
Figure 26 : Vallée sèche* et doline inondée suite à un épisode pluvieux intense (mai-juin 2016 - Loiret) - BRGM

Les émergences / sources karstiques

Dans certains cas très particuliers (doline-perte, forte mise en charge du réseau karstique, etc.), des **venues d'eau** (émergences) peuvent inonder la forme karstique par le bas. Elles peuvent également déstabiliser les bords des formes karstiques (voir plus haut le passage concernant la « déstabilisation des bords des formes karstiques »).

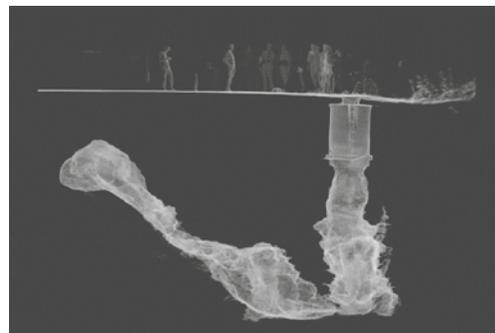
3.1.3. Situations critiques annonciatrices de mouvements

Il est généralement difficile de prédire quand, où et comment vont apparaître les mouvements de terrain évoqués (à moins d'avoir repéré et suivi les configurations instables les préfigurant). L'observation de situations potentiellement critiques est toutefois possible (cf. figure 27, figure 28 et figure 29). Celles-ci peuvent se faire en souterrain, *via* des explorations spéléologiques (mais seule une partie très limitée des vides karstiques est visitable par l'homme), ou éventuellement depuis la surface du sol, *via* des investigations spécifiques (reconnaisances géophysiques, suivis topographiques, etc.).



Levé 3D à Reugney (25) – BRGM

L'épaisseur résiduelle de terrains rocheux fracturés séparant le vide de la surface varie entre 1 et 3 m.



Levé 3D à Bordeaux (33) – Parallèle 45 / Cerema

Cette cavité se trouvait sous une voirie très empruntée. Elle a été rapidement comblée pour supprimer tout risque pour les usagers.

Figure 27 : Vides karstiques proches de la surface du sol



Décollement des bancs à Bèze (21) – BRGM



Chute de dalle du toit dans le réseau de La Fuië (16) – Cerema



Zone bréchique instable dans le réseau de Camelot (16) - Cerema



Salle en partie effondrée dans le réseau de Camelot (16) - Cerema

Figure 28 : Dégradation du toit rocheux de cavités explorables



Débouffage d'une cheminée dans une salle n'ayant pas atteint la surface, réseau de la Fuië (16) - Cerema



Petit vide de soutirage mis à jour lors d'un terrassement (45) - BRGM



Crue décennale d'un réseau karstique perché dans une zone sensible à l'extrusion (34) – Cerema

Figure 29 : Autres exemples de zones en équilibre instable

3.1.4. Conséquences des mouvements de terrain sur les enjeux en surface

Les **risques** générés par les mouvements de terrain liés au karst sont ceux typiquement présentés dans les guides existants, notamment ceux concernant les cavités souterraines (voir en particulier le guide *PPRN cavités souterraines abandonnées* : ministère de l'écologie, du Développement durable et de l'énergie, 2012). Ces risques sont fonction du type de mouvement, des dimensions atteintes, de la vitesse d'apparition et, bien sûr, de la vulnérabilité des enjeux touchés (personnes, véhicules, ouvrages). Un grand effondrement peut en effet entraîner la ruine rapide d'une construction alors que les désordres structuraux initiés par un affaissement ou un petit effondrement ne remettent généralement pas en cause (en tout cas pas immédiatement) la sécurité des biens et des personnes.

Parmi les conséquences possibles, on peut ainsi retenir les suivantes :

- lorsque le mouvement se produit au passage d'un véhicule, voire d'une personne, celui-ci peut tomber dans le vide (cf. figure 30). Le risque de victime est alors fort ;
- la proximité d'un mouvement de terrain avec un enjeu peut aboutir à sa ruine (cf. figure 31, figure 32) ;
- même léger, un tel mouvement peut gêner le bon usage d'un enjeu au point de le rendre inopérant, notamment s'il touche une voirie (cf. figure 33). Si l'effondrement a par exemple lieu dans un cours d'eau ou s'il affecte un ouvrage hydraulique, il peut générer une perte (cf. figure 34) ou une brèche (digue).



Chute d'un engin (40) – M. Pochon



Chute mortelle dans un effondrement (33) – Sud-Ouest

Figure 30 : Exemples d'effondrements ayant généré des chutes



Bâtiment en situation critique (45) – M. Lepiller



Canalisations proches de la rupture (45) - BRGM

Figure 31 : Exemples d'effondrements mettant les enjeux en situation critique



Confortement d'une église suite à sa fissuration (86) - BRGM



Fissuration d'un pavillon (47) - Cerema



Rupture d'un dallage dans une maison (45) - BRGM



Trou dans une chaussée (45) - Cofiroute



Route emportée (16) - Cerema



Maison détruite (45) - DDT45

Figure 32 : Exemples d'effondrements ayant abouti à une ruine partielle ou totale d'un ouvrage



Creux dans la route gênant la circulation (45) - BRGM



Vide sur chaussée et déformation d'un soutènement (12) - Cerema



Fragilisation d'une digue (45) - Cerema



Gêne à la circulation des véhicules (45) - BRGM

Figure 33 : Exemples d'effondrements mettant en défaut l'usage d'un ouvrage



Perte active dans la vallée du Bandiat (16) - Cerema



Perte en Loire (45) - BRGM

Figure 34 : Exemples d'effondrements avec perte du cours d'eau

3.2. Les processus conduisant aux effondrements et affaissements

Pour rappel, les mouvements de terrain « principaux » traités par la présente méthode sont : l'effondrement, l'affaissement et les glissements / coulées de boue. Plusieurs processus en sont à l'origine. Les glissements / coulées de boue sont ici associés à l'extrusion d'un conduit colmaté. Les effondrements et affaissements peuvent quant à eux prendre naissance *via* trois

processus différents. Au total, **quatre processus sont retenus**, à savoir (par ordre relativement subjectif mais globalement décroissant en termes de fréquence d'apparition à l'échelle nationale suivant le retour d'expérience des auteurs) :

- 1) **La suffosion/le soutirage des matériaux de couverture.**
- 2) **Le débouillage d'un conduit karstique colmaté.**
- 3) **L'extrusion d'un conduit colmaté.**
- 4) **La rupture du toit d'une cavité.**

Une première distinction intéresse ici les **types de karsts** où peuvent survenir ces processus :

- les quatre processus peuvent avoir lieu en contexte de karst sous couverture ;
 - concernant le karst nu, le débouillage, la rupture de toit ainsi que l'extrusion peuvent se produire.
- Ces processus et les principaux critères associés sont détaillés ci-dessous.

3.2.1. Suffosion/soutirage des matériaux de couverture

Ces processus concernent le karst sous couverture, pas le karst nu (absence de matériaux meubles en surface du karst).

Il s'agit d'une érosion souterraine, rendue possible par la conjonction de trois composants :

- la **présence de vides dans le substratum carbonaté sous-jacent**. Ces vides doivent être connectés d'une part avec les matériaux de surface et d'autre part avec les écoulements superficiels et/ou souterrains. La taille des vides importe peu, dans la mesure où il suffit qu'ils soient légèrement supérieurs à la granulométrie des matériaux à évacuer, ce qui est souvent le cas, du moins pour les matériaux les plus fins ;
- l'**érodabilité des matériaux de surface** (en particulier leur épaisseur et leur cohésion). Les matériaux compétents (rocheux) ne sont pas affectés ;
- des **circulations d'eau** entre la couverture et le réseau karstique sous-jacent (apparition d'un **gradient hydraulique**). Sans eau, les matériaux ne peuvent en effet pas être remaniés/évacués. Ces circulations peuvent être liées à l'infiltration à travers la couverture et/ou associées au battement de nappe (celle d'aquifère karstique et/ou celle d'aquifère(s) perché(s) dans la couverture). Dans le cas d'une nappe baignant tout ou partie de la couverture, la variation de son niveau peut accélérer, voire déclencher le processus (par exemple par déjaugage, lorsque le niveau de la nappe baisse) ; on retiendra la notion de **fatigue hydrogéologique** (terme générique).

Comme le montrent des observations en souterrain (au niveau des poches de matériaux érodés ou en cours d'érosion), deux déclinaisons du processus peuvent être ici distinguées. La **suffosion** évacue uniquement les particules les plus fines. Les plus grossières restent en place ou se réarrangent par action gravitaire. Cette érosion sélective est *a priori* liée à une érodabilité et/ou à des sollicitations moins fortes que le **soutirage** qui, lui, évacue plutôt l'ensemble du fuseau granulométrique (l'ensemble du matériau est « absorbé »). Les recherches disponibles et celles actuellement menées pour comprendre ces processus s'intéressent essentiellement aux ouvrages en terre présents à la surface du sol (digues, barrages, etc.). Des réflexions sont initiées pour le karst, mais les progrès à réaliser sont tels qu'il convient, pour ce guide, de ne considérer qu'un seul processus, appelé ici suffosion/soutirage. Pour les mêmes raisons, la maturation de ce processus est difficile à évaluer, excepté dans le cas d'apports d'eau exceptionnels (générés par exemple par d'intenses précipitations et/ou par des inondations) qui augmentent considérablement la vitesse de maturation (maturation plus rapide ; phase plus courte) et favorisent le déclenchement du soutirage.

En fonction de la cohésion et de l'épaisseur de la couverture, **plusieurs maturations** sont possibles (cf. figure 35). Le diamètre du désordre en surface dépend des caractéristiques de la couverture (épaisseur, caractéristiques mécaniques), de l'hydrogéologie (infiltration/nappe) et de la configuration des vides :

- dans le cas de matériaux sans cohésion (pulvérulents), leur suffosion/soutirage aboutit à un affaissement ou à un effondrement s'il y a absorption rapide de l'ensemble des matériaux. Le processus peut être comparé à l'écoulement d'un sablier ;
- dans le cas de matériaux cohésifs, leur suffosion/soutirage génère en surface plutôt des désordres soudains faisant suite à la formation progressive de zones décomprimées et/ou de cavités dites « aveugles » au droit de la zone d'absorption des matériaux (avec éventuellement un affaissement comme phénomène précurseur pendant la phase de maturation du processus).

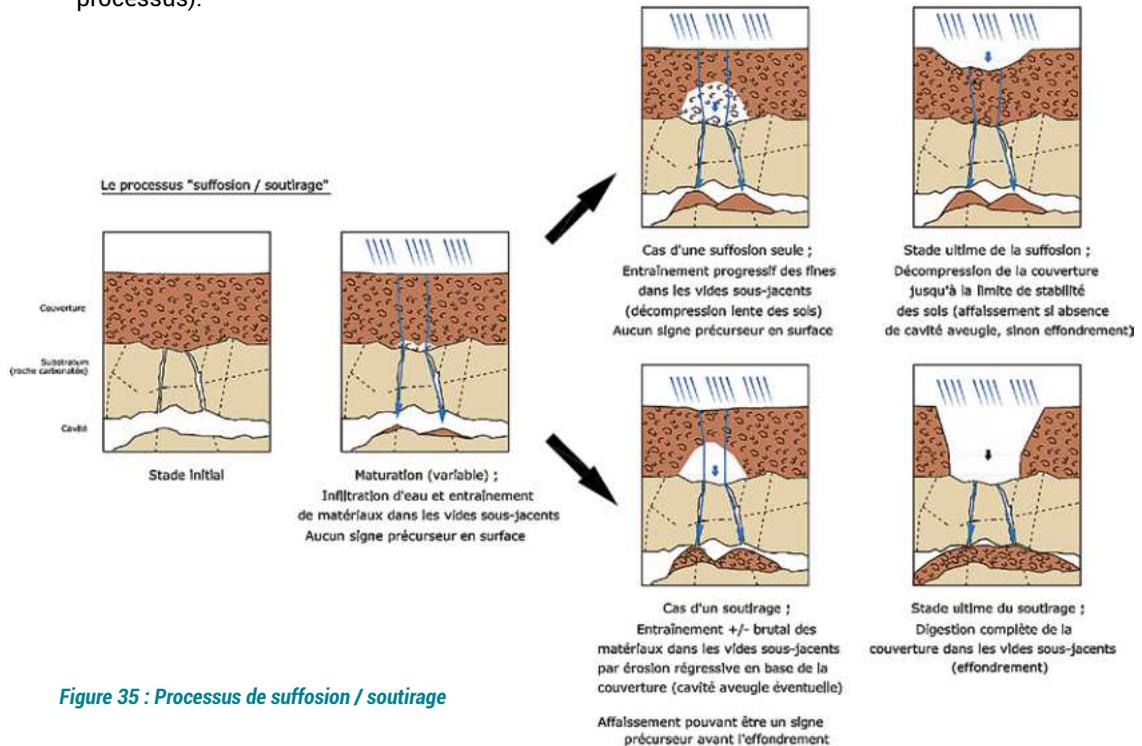


Figure 35 : Processus de suffosion / soutirage

3.2.2. Le débouillage d'un conduit karstique

Ce processus concerne *a priori* tous les types de karst. Dans un souci de simplification, le schéma de la figure 36 ne présente pas de couverture (cas du karst nu).

Le processus s'applique au niveau d'un **conduit (fissure large, boyau, cheminée) colmaté dans l'encaissant rocheux**, conduit disposé de manière verticale à subverticale. Le colmatage peut être constitué de matériaux endogènes (fantôme de roche / altérites plus ou moins remaniées) ou exogènes (exemple des remplissages alluvionnaires).

Ces conduits **débouillent** (se vident) plus ou moins rapidement, en fonction des **caractéristiques géotechniques** du colmatage (cohésion, angle de frottement) et du **gradient hydraulique** (maturation). Dans le cas d'une nappe baignant tout ou partie du conduit, la variation de son niveau peut de plus générer une **fatigue hydrogéologique** progressive du matériau et accélérer voire déclencher le processus (principalement par déjaugage, lorsque le niveau de la nappe baisse).

Dans un second temps et dans le cas d'un karst sous couverture, la vidange du conduit peut ensuite se propager vers la surface au sein de la couverture sus-jacente (seconde phase de maturation). Le mouvement atteint enfin la surface sous la forme d'un mouvement de terrain au droit du conduit débarrassé. L'instabilité est souvent brutale (de type effondrement localisé) mais peut également prendre la forme d'un affaissement si le débouillage est lent.

Le diamètre du désordre en surface est avant tout lié à celui du conduit initialement colmaté : pour un karst nu, les deux diamètres sont similaires ; pour un karst sous couverture, l'effet sablier s'ajoute au diamètre initial du conduit (cf. Treffot, 2015). Comme pour le processus de suffosion/soutirage, la cinétique du débouillage reste difficile à évaluer ; elle peut être considérée comme rapide en cas de forts apports d'eau (variation forte et/ou rapide du gradient hydraulique).

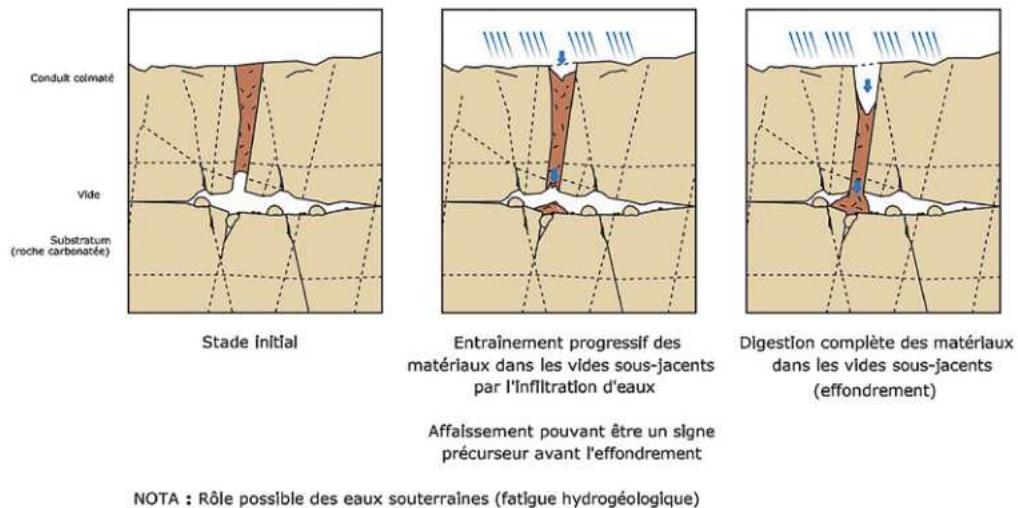


Figure 36 : Processus de débouillage (en contexte de karst nu – existe aussi pour le karst sous couverture)

3.2.3. La rupture du toit d'une cavité calcaire

Ce processus concerne tous les types de karst, avec ou sans couverture.

Bien connu dans le domaine des carrières souterraines (cas courant des décollements de dalle de toit par rupture en traction), il se produit également en secteur karstique, préférentiellement au droit de **toits rocheux particulièrement fracturés / altérés** (au niveau de joints stratigraphiques) **et/ou présentant d'importantes portées** (largeurs de vide).

La communauté scientifique considère ce mouvement comme **rare** en termes de risque naturel car, pour apparaître, l'équilibre souterrain doit être rompu. Or cet équilibre est généralement le fruit d'une évolution « à l'échelle des temps géologiques ». Une modification de cet équilibre à **l'échelle d'une vie humaine** paraît ainsi peu probable, à moins bien sûr d'une sollicitation extérieure notable, naturelle (séisme) ou le plus souvent anthropique (terrassement, forte surcharge, etc.).

La rupture mécanique depuis le toit de la cavité (cf. figure 37) peut constituer un signe avant-coureur d'un mouvement de terrain en surface, visible uniquement depuis le fond. Selon le foisonnement⁶ des matériaux effondrés, l'éboulement peut soit s'arrêter avant la surface (auto-comblement), soit l'atteindre sous la forme d'un affaissement ou d'un effondrement.

Dans le cas d'une nappe baignant le toit de la cavité, la variation de son niveau peut de plus générer une fatigue hydrogéologique et accélérer le processus.

⁶ Le foisonnement est un phénomène physique habituellement associé aux terrassements : lorsqu'un sol ou une roche est déplacé et/ou remué, son volume augmente. Ce phénomène a également lieu de manière naturelle lorsque se produit un mouvement de terrain (éboulement, effondrement).

Le diamètre des mouvements de terrain atteints en surface paraît surtout fonction de la taille du vide initial (dans le massif) et de l'épaisseur à la fois du toit calcaire et de la couverture (rôle de l'effet sablier) ; selon les configurations, ce diamètre peut se révéler particulièrement imposant dans les grands réseaux karstiques (gouffre de Padirac).

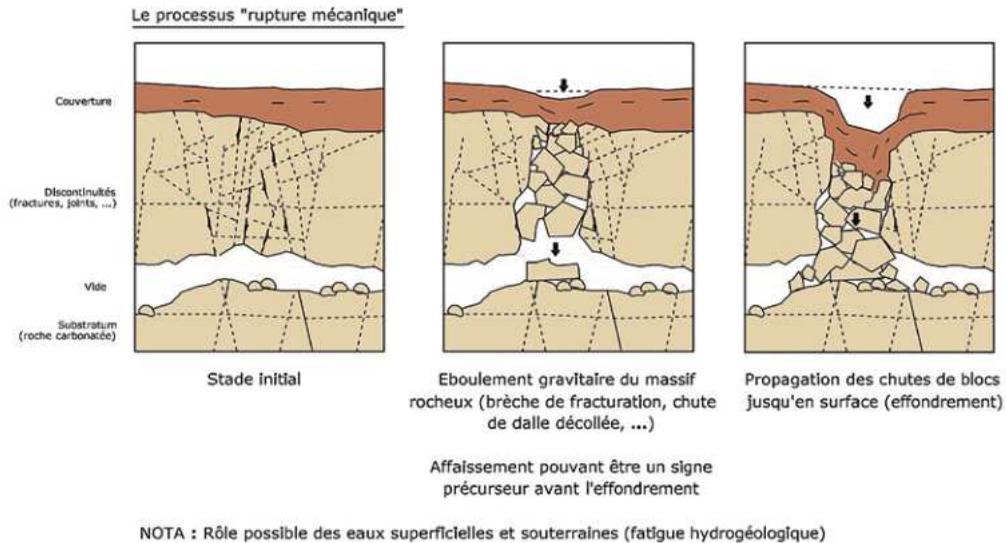


Figure 37 : Processus de rupture du toit d'une cavité

3.2.4. L'extrusion d'un conduit colmaté

Ce processus concerne *a priori* tous les types de karst, mais il est en réalité associé à une configuration plus complexe que pour les autres processus : le **matériau de colmatage d'un conduit karstique** situé suffisamment bas dans le réseau et interceptant la surface d'un terrain naturel généralement en pente (versant) est vidé suite à la **mise en charge hydraulique importante du réseau karstique** auquel il est associé (maturation le plus souvent rapide). En fonction en particulier de leur **sensibilité à l'eau, de leur proximité avec les sorties aériennes et de leur nature**, les matériaux sont alors évacués hors du réseau souterrain du secteur (avec présence ou non d'une couverture superficielle) sous la forme d'un **glissement** ou d'une **coulée de boue** (cf. figure 38) ou plus rarement d'un éboulement (conduit débouchant dans un versant ou une paroi rocheuse). La dangerosité de cette catégorie de mouvement de terrain réside le plus souvent dans la soudaineté du déclenchement, qui peut être assimilé à « l'expulsion » d'un bouchon (matériaux généralement cohésifs) sous l'effet d'une augmentation de pression hydraulique dans des réseaux dits « fossiles » réactivés.

De tels mouvements paraissent peu documentés à l'échelle nationale (principalement documentés dans les karsts méditerranéens), ce qui explique un retour d'expérience insuffisant pour pouvoir indiquer ici les intensités qu'ils peuvent atteindre. Ils sont *a priori* associés à des précipitations extrêmes faisant remonter les niveaux piézométriques à des cotes exceptionnelles. À titre d'exemple, il est probable que la coulée de boue de Sarno (Italie) s'explique par la rupture de la couverture de cendres volcaniques, sous l'effet d'une extrusion karstique au droit d'un versant calcaire (ayant fait une centaine de victimes ; BRGM 1998).

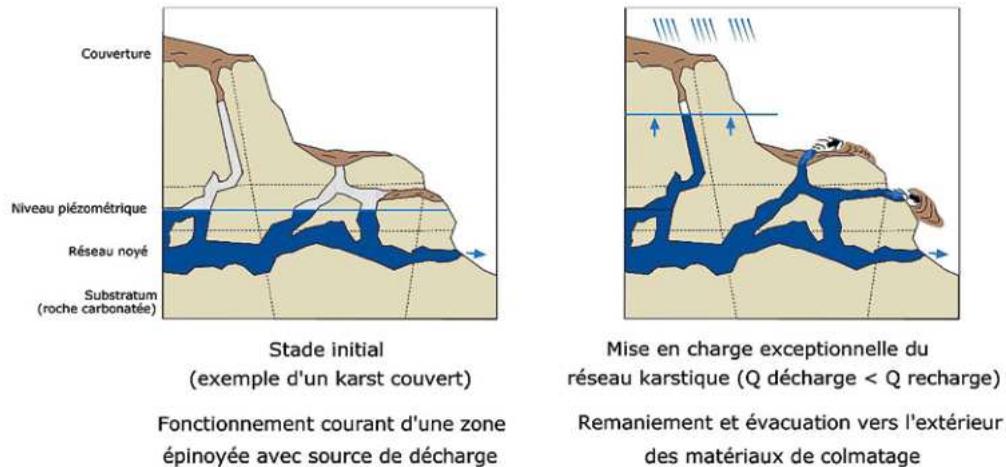


Figure 38 : Processus d'extrusion

3.3. Les facteurs aggravants

Plusieurs facteurs peuvent dégrader, parfois rapidement, la stabilité des secteurs karstiques. Ces facteurs peuvent être **naturels** : les **inondations** sont les cas les plus fréquents. On citera la recrudescence de cas ayant suivi l'inondation de deux secteurs dans l'Orléanais au printemps 2016 (Noury *et al.*, 2017).

Ils peuvent également être **anthropiques**. Une étude a été menée sur le **rôle des aménagements** à l'échelle nationale et internationale (Perrin et Noury, 2015 et 2016). Pour la résumer :

- d'assez nombreuses synthèses bibliographiques existent à l'international. Elles s'accordent globalement avec celle effectuée à l'échelle de la France. Parmi les 77 événements ou groupes d'événements collectés et analysés :
 - la concentration des eaux d'infiltration cause le plus de dommages sur le territoire national. Celle-ci résulte de quatre types d'aménagements : les bassins (42 %), les canalisations aériennes (19 %), les canalisations enterrées (19 %) et les ouvrages d'infiltration ponctuelle (13 %, incluant les forages, y compris géothermiques) ;
 - les autres causes de désordres recensés sont les pompages d'eau (5 %) et le percement d'un tunnel ayant entraîné un déboufrage (un cas) ;
- les terrassements peuvent également contribuer à l'apparition de tels mouvements de terrain : les travaux peuvent être à l'origine de surcharges et modifier la sensibilité du site.

La prise en compte du rôle éventuel des aménagements dans l'aléa mouvements de terrain est un choix à faire au début d'une étude. Elle n'est généralement pas incluse pour une étude type PPR (pour des questions d'échelle).

De même, les effets du dérèglement climatique (intensité des précipitations, sécheresses marquées, dégels, etc.) peuvent-ils être pris en compte dans la qualification des facteurs aggravants.

4.

Méthodologie d'évaluation de l'aléa

La méthodologie est présentée selon cinq étapes successives : principe général, réalisation des cartes informatives, caractérisation des critères impliqués, combinaison des critères par processus, évaluations de la probabilité d'occurrence (prédisposition), de l'intensité et de l'aléa. Plusieurs logigrammes illustrent la démarche.

4.1. Principe général de la méthode

4.1.1. Mouvements de terrain traités, définitions de l'aléa et des zones homogènes

La méthode traite uniquement les mouvements de terrain directement liés au karst et susceptibles, à l'échelle d'une vie humaine, de remettre en cause la sécurité des biens et des personnes (suite à des affaissements, effondrements et glissements de terrain/coulées de boue : cf. § 3.1.1). Les désordres d'ordre secondaire en sont exclus (mouvements « connexes » et perturbations d'ordre hydro(géo)logiques : cf. § 3.1.2).

L'aléa mouvements de terrain d'origine karstique traduit la **probabilité** qu'un **désordre d'intensité** donnée survienne au cours d'une **période** s'étirant de l'imminence à la centaine d'années (période de retour centennale). En d'autres termes, l'aléa est la résultante d'un croisement entre la probabilité d'occurrence (prédisposition : cf. définitions au § 4.3.1) et l'intensité prévisible des mouvements de terrain (intensité : cf. définitions au § 4.4.1).

Le guide PPR Cavités souterraines abandonnées (ministère de l'écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012) propose de débiter la réflexion avec la définition d'un **aléa de référence** :

« La notion d'aléa de référence est définie comme l'aléa correspondant au plus important événement historique connu dans le site étudié, sauf si l'analyse du site conduit à considérer comme vraisemblable à échéance centennale un événement d'encore plus grande ampleur.

Cet aléa de référence correspondra au niveau d'aléa le plus élevé sur le site. »

Dans le contexte karstique, compte tenu de la possibilité d'avoir des différences significatives au sein du site étudié, cet aléa de référence peut être décliné par **zone homogène**. Une zone homogène présente des caractéristiques et une sensibilité similaires (même qualification des critères d'instabilité).

4.1.2. L'intérêt de l'approche multicritère

Un raisonnement dédié à chacun des quatre processus retenus, via le **passage en revue** des différents critères les influençant, permet de traiter l'**ensemble** des configurations karstiques et des conséquences associées.

Cette approche permet par ailleurs d'identifier, pour une zone homogène donnée, les critères les plus influents, ces derniers pouvant ensuite être la cible d'éventuelles actions correctrices.

4.1.3. Une qualification de type multi-aléas

En considérant que plusieurs processus peuvent se produire sur un secteur donné, la démarche se fait **par processus**. Un ou plusieurs processus peuvent éventuellement être écartés une fois le milieu bien caractérisé. Un aléa peut ainsi être obtenu pour chaque processus retenu. Leur **combinaison finale** est de type multialéa (cf. figure 39). **L'aléa résultant** doit faire apparaître le ou les processus impliqué(s) sur la zone étudiée, le niveau d'aléa pour chacun de ces processus et le niveau d'aléa final retenu (le plus élevé parmi les processus en jeu).

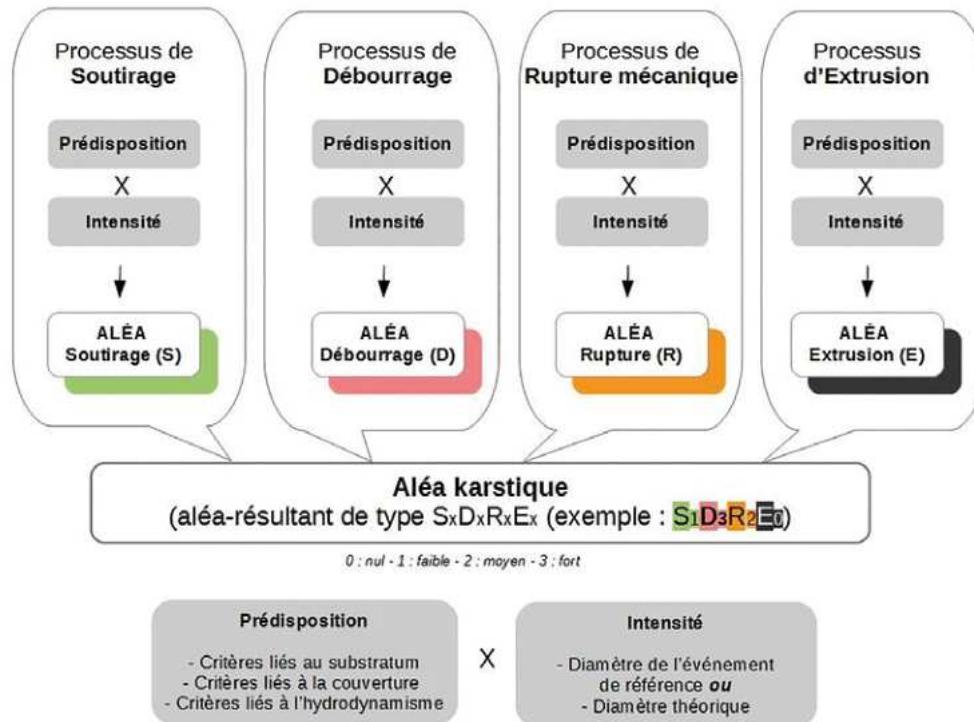


Figure 39 : Cheminement global de la méthode

4.2. Données disponibles, cartes informatives

4.2.1. Définition et compréhension du secteur d'étude

Le demandeur d'une évaluation de l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique s'intéresse généralement à des limites administratives (typiquement une ou des emprises communales) plutôt que géologiques. Or le karst, en tant que système complexe, nécessite dans l'idéal d'être étudié à une échelle différente des limites administratives, compatible avec ses limites physiques. La définition d'un **périmètre d'étude scientifiquement cohérent** impose donc une réflexion préalable, si possible lors de la constitution du cahier des charges de l'étude⁷ ou, à défaut, précisée au lancement de l'étude.

Cette définition se base tout d'abord sur les **données physiographiques relatives à la géologie, à**

⁷ Sous la responsabilité du maître d'ouvrage ou de son représentant et *via* par exemple une assistance technique.

la géomorphologie et à l'hydro(géo)logie. Les principaux **événements historiques** ayant affecté le périmètre d'étude ou ses alentours proches sont également à prendre en compte.

Une fois le périmètre d'étude défini, le travail de collecte peut débuter ; il doit notamment permettre d'obtenir :

- une compréhension pertinente du fonctionnement du(des) réseau(x) karstique(s) ;
- une bonne lecture du paysage et de son évolution géologique (naturelle) et historique (anthropique) ;
- une identification de la nature et de la dynamique des mouvements de terrain en surface.

Cette collecte et sa synthèse - travail appelé « **phase informative** » - implique la **recherche documentaire** de différents types de données : celles liées au milieu souterrain et aux explorations spéléologiques, les occupations et usages du sol⁸ (passés, actuels et éventuellement futurs), y compris l'urbanisme (méthodes constructives, gestion des eaux), etc.

Cette phase nécessite, en complément des recherches d'archives, l'**acquisition de nouvelles données** : (i) investigations de terrain (observations, enquêtes, reconnaissances), (ii) données aériennes, satellitaires, topographiques (MNT Lidar par exemple) et (iii) plus exceptionnellement : reconnaissances géotechniques et/ou géophysiques. Ces données feront bien sûr l'objet d'analyses (photo-interprétation par exemple).

La rigueur indispensable à ce premier travail implique de disposer d'un laps de **temps suffisant**, de manière à tendre vers l'exhaustivité.

4.2.2. Données nécessaires à la qualification de l'aléa

Pour qualifier l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique, il est nécessaire d'explorer **toutes les sources possibles (locales ou nationales)** afin d'obtenir (i) la meilleure description possible du relief, du sol et du sous-sol du secteur d'étude et (ii) le plus large recensement envisageable des phénomènes d'origine karstique.

Étant donné le grand nombre de données possibles et la multiplicité de leurs sources, cette collecte doit ensuite faire l'objet d'une **analyse** critique et d'un effort de **synthèse**. Vu le nombre de critères à rechercher, la synthèse doit permettre de faire ressortir l'information utile à la qualification ou à la répartition géographique de chacun d'entre eux. À titre d'exemple, l'épaisseur de la couverture pourra être obtenue en croisant les informations de la notice de la carte géologique, des coupes de sondage de la BSS, des descriptifs d'anciens mouvements de terrain, des études hydrogéologiques éventuelles, en interrogeant le comité départemental de spéléologie du secteur, etc.

En parcourant et analysant l'ensemble de ces sources, il doit être possible d'obtenir pour chaque critère à la fois (i) une appréciation de son rôle dans le déclenchement des mouvements de terrain et (ii) une bonne représentation cartographique de sa répartition spatiale.

a) Où trouver les données ?

Dix critères (cf. figure 46) sont recherchés pour la qualification de l'aléa. Une même source de données pouvant informer efficacement sur plusieurs critères, les paragraphes ci-dessous s'organisent par type de source.

⁸ On pourra dans ce cadre rechercher les liens potentiels entre les mouvements de terrain et l'aménagement du territoire.

Les inventaires locaux et nationaux

Deux inventaires nationaux⁹ concernent les cavités (**BD Cavités**) et les mouvements de terrain (**BD MVT** incluant les affaissements et les effondrements).

La liste des **arrêtés de catastrophes naturelles** par commune et par type d'aléa (dossiers techniques souvent disponibles *via* la préfecture ou directement auprès des communes concernées) est disponible sur les sites www.georisques.gouv.fr et <https://infoterre.brgm.fr/>

Des inventaires locaux de mouvements de terrain existent, notamment *via* le **Dicrim** (dossier d'information communal sur les risques majeurs), le **DDRM** (dossier départemental sur les risques majeurs), les archives de la **DDT(M)** (Direction Départementale des Territoires et de la Mer) et/ou de la **Dreal** (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement).

Les archives et articles de presse

On retrouve dans les **archives communales** (auprès des services techniques) et **archives départementales** des cartes postales anciennes, des monographies, des levés spéléologiques, d'anciens cadastres, etc. mais aussi des **articles de presse** avec, le cas échéant, des comptes rendus d'accidents.

Les services et organismes spécialisés, les associations

Parmi les organismes nationaux, il est indispensable de se rapprocher des **établissements publics en charge de la gestion et de la prévention des risques naturels terrestres**, *a minima* du **BRGM**, du **Cerema**, de l'**ONF** (Office national des forêts - service Restauration des terrains en montagne dans les départements concernés) et de l'**INERIS** (Institut national de l'environnement industriel et des risques, davantage spécialisé dans les cavités anthropiques). Ils possèdent de nombreuses archives, données, cartes et rapports sur l'ensemble du territoire français. La plupart de ces archives sont publiques et accessibles à tous.

D'autre part, les environnements karstiques ont la chance de disposer, sur la majorité du territoire français, d'associations et de comités dédiés à l'exploration et à la valorisation des réseaux souterrains. Constituées de **spéléologues**, ces structures disposent souvent des connaissances les plus détaillées sur l'extension des réseaux mais aussi sur leur nature, leurs caractéristiques, leur profondeur et leur comportement (notamment leur capacité passée et actuelle à générer des instabilités de type mouvements de terrain) ; ainsi la **FFS** (Fédération française de spéléologie) et les **CDS** (comités départementaux de spéléologie) sont à consulter de manière systématique (<https://ffspeleo.fr/> et www.grottocenter.org). La base de données bibliographiques FFS du Centre national de documentation spéléologique regroupe également de nombreux documents. Des **services territoriaux spécialisés** peuvent aussi exister dans certains départements et communes ; plus souvent spécialisés en cavités anthropiques, ils peuvent néanmoins disposer d'informations utiles sur les altérations karstiques, par exemple, ou les niveaux d'eau ; on peut citer, entre autres, les inspections générales des carrières de Paris et de Versailles, les services spécifiques des carrières de Gironde, le syndicat intercommunal Cavités 37, etc.

En complément, l'**AFK** (Association française de karstologie) et l'**Ifreemis** (Institut de formation, de recherche et d'expertise sur les milieux Souterrains) constituent des centres de ressources (recherche, formation, expertise) réunissant différents acteurs concernés par les milieux souterrains et travaillant de concert à l'amélioration de la connaissance dans ce domaine spécifique (à consulter également *via* les sites internet dédiés).

De même, des **travaux de recherche** concernent parfois le secteur d'étude ou ses alentours proches ; il peut s'agir de thèses ou de travaux universitaires (articles scientifiques). Une collaboration avec les auteurs de ces travaux peut se révéler particulièrement efficace.

⁹ Les BD Cavités et BD MVT ont été initialement alimentées par des inventaires départementaux, *via* essentiellement une collecte documentaire et une sollicitation par courrier des communes. Des mises à jour sont également effectuées à intervalles plus ou moins réguliers (en fonction entre autres des nouvelles données collectées). Ces inventaires ne sont donc pas exhaustifs et, vu l'échelle de rendu proposée ici, ils nécessitent une analyse critique avant d'être utilisés tels quels. Lire les rapports d'inventaires (disponibles en ligne *via* le site Infoterre) constitue la première étape de cette compréhension de la donnée.

Enfin, des renseignements sont à chercher auprès des **bureaux d'études géotechniques**, des cabinets de **géomètres** et des **sapeurs-pompiers** (notamment le SDIS : service départemental d'incendie et de secours et/ou le GRIMP : groupe d'intervention en milieu périlleux).

L'**Inrap** (Institut national de recherches archéologiques préventives), réunissant notamment des géomorphologues concernés par l'étude de la forme des paysages et son évolution (impact des transformations naturelles ou humaines sur l'environnement physique), est également à consulter.

Les **associations naturalistes**, **d'histoire du patrimoine** ou certaines **personnes** ayant une bonne connaissance de la commune disposent parfois de témoignages de première main et peuvent servir de guides sur le terrain.

Les données physiographiques en ligne

Concernant les *connaissances géologiques* et *pédologiques* :

- le site **Infoterre** géré par le BRGM <https://infoterre.brgm.fr/> permet la consultation des cartes géologiques¹⁰ et des notices correspondantes et, depuis 2019, leur téléchargement (gratuit) au format SIG.

En plus des renseignements disponibles sur la géologie, la tectonique, les terrains de recouvrement, les nappes souterraines, etc., le site donne accès à (i) la **BSS** (Banque du sous-sol) qui collecte les données des forages, sondages, puits et sources, (ii) la localisation des cavités souterraines connues (base **BD Cavités**) et (iii) la localisation et certaines caractéristiques des mouvements de terrain de type affaissement et effondrement, en lien avec la présence de cavités (**BD MVT**) ;

- plus spécifiquement dédié aux risques, le site <https://www.georisques.gouv.fr/> rassemble également la plupart des données historiques et physiographiques disponibles pour chaque commune du territoire français (interface cartographique également disponible) ;

- le portail de l'IGN Géoportail (www.geoportail.gouv.fr) propose des données géologiques, topographiques et hydrographiques. D'une manière générale, L'IGN dispose d'un grand nombre de données sous forme de bases cartographiques (IGN BdTopo, IGN BdCarto, IGN BdCarthage, IGN BdAlti, RGEAlti...) accessibles en ligne ou disponibles le plus souvent auprès des services de l'État (<https://geoservices.ign.fr/>)

- les données pédologiques informent sur la nature des formations superficielles (www.gissol.fr) compilant notamment les données de l'Inrae.

Les *données hydro(géo)logiques* peuvent être, pour leur part, obtenues *via* de nombreuses sources, dont :

- les agences de l'eau qui gèrent des bassins versants dans leur globalité (<http://www.les-agencesdeleau.fr/>) ;

- le **Sandre** (Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau) qui constitue un référentiel de partage des connaissances sur l'eau et les milieux aquatiques (<http://www.sandre.eaufrance.fr/>) ;

- la **BDLISA** (base de donnée des limites des systèmes aquifères) qui est un référentiel cartographique (1/50 000) du système d'information sur l'eau (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>). Cette base classe le sous-sol en entités hydrogéologiques qui sont décrites selon différentes propriétés : aquifère ou imperméable, écoulements libres ou captifs, milieu poreux, fracturé, karstique, etc. ;

- **ADES** qui est le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer (<https://ades.eaufrance.fr/>). Il rassemble sur un site internet public des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux

¹⁰ Très souvent à l'échelle 1/50 000, les cartes géologiques ne sont pas toujours directement compatibles avec l'échelle de travail visée par la constitution d'une carte d'aléa (1/10 000 ou 1/5000 dans le meilleur des cas). Les formations superficielles ne sont par ailleurs pas toujours indiquées sur les cartes géologiques (en particulier sur les cartes les plus anciennes), alors qu'elles jouent un rôle important dans la dynamique des mouvements de terrain d'origine karstique. Dans la plupart des cas, un travail important d'investigation de terrain est donc nécessaire pour affiner, modifier et redessiner les limites des formations géologiques.

- souterraines ; de même, les agences régionales de santé (ARS) peuvent être sollicitées au titre de leur implication dans la surveillance de la qualité des eaux (y compris souterraines) ;
- Les **SIGES** (systèmes d'information pour la gestion des eaux souterraines) qui permettent la diffusion, la publication et la valorisation de l'information publique dans le domaine des eaux souterraines pour une région administrative ou selon un découpage géographique lié aux bassins versants (exemple du SIGES Aquitaine : <http://sigesaqi.brgm.fr/>) ;
- concernant les zones de concentration des eaux, elles peuvent être déduites des cartes d'aléa inondation (cadre **PPRN** ou non) ou de laisses des plus hautes eaux lorsque des études ont été menées sur le territoire étudié (documents disponibles sur les sites internet des DDT(M) et/ou des collectivités).

Concernant les *données d'occupation du sol actuelles et historiques* :

- les sites internet www.cadastre.gouv.fr et www.geoportail.gouv.fr permettent (i) de disposer de **référentiels cartographiques précis** et (ii) dans certains cas de connaître la position des entrées des cavités ;
- concernant le Géoportail, il propose, *via* sa déclinaison <https://remonterletemps.ign.fr/>, d'accéder et de télécharger d'**anciennes cartes et photographies aériennes**, très riches en informations, permettant d'appréhender l'évolution historique de l'occupation du sol et le plus souvent d'observer les territoires avant l'expansion récente de l'urbanisme : identification de bosquets ou d'arbres isolés, de zones humides, de dépressions topographiques, d'effondrements de surface, etc. ;
- depuis quelques années, les **images satellitaires** offrent aussi une qualité compatible avec l'analyse et le traitement des territoires. IGN Espace met à disposition notamment les images Spot (6-7) et Pléiades, sur son site Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/thematiques/territoires-et-transports>). De même, il est fortement conseillé de visiter le site www.applisat.fr qui constitue une porte d'entrée complète vers les données satellitaires en France¹¹. Peuvent également être citées les plateformes suivantes :
 - Geostore Airbus (images Spot 6, 7, Pléiades ; payant) : www.intelligence-airbusds.com/geostore/ ;
 - PEPS (images Sentinel ; gratuit sur inscription) : <https://peps.cnes.fr/rocket/#/home> ;
 - Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>) ;
- localement ou régionalement, des **plateformes et portails cartographiques** complets sont à consulter (par exemple Pigma en Nouvelle Aquitaine : <https://portail.pigma.org/>) ;
- les **sites Google Maps, Google Earth, Google streetView et Bing maps** offrent aussi une consultation rapide du territoire avec des vues, respectivement, en plan, en 3D et en immersion depuis le sol. Des **images satellites multitudes** y sont disponibles pour des périodes récentes ;
- l'**occupation du sol** (et son évolution) peut être obtenue à l'échelle du 1/100 000 par la base de données en ligne **Corine land Cover** (unité de base : 25 ha minimum).

On notera que dans le cas d'une **zone frontalière** avec un autre pays, les données de cet autre pays sont aussi à prendre en compte (exemple : la Belgique, proche de Maubeuge (59), dispose d'une base de données spécifique au karst).

b) Quelles investigations complémentaires peuvent être menées ?

Les éléments obtenus lors de la phase bibliographique révèlent généralement des **lacunes** (zones non couvertes, données insuffisantes ou présentant des incertitudes, etc.). L'acquisition de nouvelles données doit pallier ces manques. On cherchera avant tout à réaliser des visites de terrain approfondies mais aussi, si besoin, des analyses particulières, comme par exemple un traitement des images aériennes et des données topographiques.

¹¹ Le site est édité par le Cerema pour le compte du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. Il renvoie notamment vers le Dispositif institutionnel national d'approvisionnement mutualisé en imagerie satellitaire (Dinamis) correspondant à une plate-forme d'acquisition et de diffusion de données spatiales d'observation de la Terre dédiée aux utilisateurs institutionnels (<https://dinamis.data-terra.org/catalogue/>).

Le guide édité en 2021 par le Cerema et l'université Gustave Eiffel *Méthodes de reconnaissances des cavités – Synthèse des connaissances actuelles* présente un état de l'art global sur le sujet.

En complément, une attention particulière est à porter aux indications suivantes :

Les données de terrain

Le secteur d'étude doit faire l'objet de **plusieurs visites de terrain**, certaines en compagnie des acteurs ou référents locaux, afin d'obtenir des renseignements sur les caractéristiques du territoire mais aussi sur son évolution et sur les éléments, objets ou désordres éventuellement effacés par le temps. Ces référents locaux sont importants car ils permettent aussi d'obtenir les autorisations d'accès à la plupart des parcelles privées.

Ces visites permettent de **contrôler les données recensées lors de la phase de recueil**. Ce travail nécessite un **positionnement** précis *via* une carte topographique et/ou un GPS désormais disponibles facilement, y compris sur smartphone depuis lesquels des outils de collecte de données de terrain existent, comme par exemple SCOUT - Système de collecte universel de terrain (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/scout-systeme-collecte-universel-terrain-application>).

Dans la mesure du possible, il est aussi recommandé de procéder à des **inspections souterraines**. Lorsque les réseaux karstiques sont visitables, leur visite apporte en effet des **éléments fondamentaux** pour l'appréciation de nombreux critères de qualification de l'aléa : fracturation du massif calcaire, géométrie des vides, niveau de la nappe par rapport au(x) réseau(x), taux de colmatage et nature des remplissages (endogène ou exogène), profondeur du réseau par rapport à la surface (si puits d'accès), etc. Ces visites sont à réaliser en compagnie des organismes spéléologiques locaux ou départementaux, voire du Grimp qui, en plus de connaître le secteur, peuvent aussi en assurer la sécurité (possibilité de création de convention).

La photo-interprétation

L'évolution des territoires étant parfois rapide (aléa climatique, urbanisme...), il est utile de réaliser une analyse de l'évolution du territoire *via* l'analyse de **photographies aériennes ou d'images satellitaires** disponibles en ligne (géoportail.fr ou *Google Earth*® notamment) ou dans les archives locales. Selon les données analysées, des informations peuvent être obtenues sur (i) les désordres de surface (fontis, effondrement, doline d'affaissement remblayée...), (ii) les modifications de l'occupation du sol, (iii) les anciens accès aux cavités, (iv) les données hydrologiques de surface, etc. (exemple en figure 40).

Lorsque des traitements de l'image ont été appliqués, d'autres données peuvent aussi être obtenues. Par exemple, les clichés infrarouges couleur (IRC) révèlent les circulations d'eau de subsurface (sous-écoulements, anciens lits de rivières, fonds de thalweg, zone d'accumulation, etc.).

L'acquisition et/ou le traitement des données topographiques

- Certaines **données de surface** sont en ligne sur le site Géoportail (en consultation). Le MNT au pas de 25 ou 50 m permet d'apprécier la **géomorphologie globale** du secteur d'étude (visualisation en plan et possibilité de générer des profils topographiques). La **topographie fine** nécessite un MNT haute-résolution (obtenu par exemple par LIDAR) : au pas de 5 m ou mieux de 1 m (IGN RGE Alti – disponible dans de nombreux secteurs soumis à l'aléa inondation). Une analyse de ces fichiers à l'aide d'outils géomatiques (gratuits pour certains) renseigne précisément sur les (micro)-reliefs du territoire étudié, comme les ruptures de pentes ou variations topographiques peu marquées : dans certains cas, les dolines d'affaissement, les fontis (si diamètre > 5 m), l'axe des thalwegs, les limites et surfaces des bassins versants, les éventuels affleurements calcaires, etc. sont ainsi identifiables voire cartographiables (cf. exemples en figure 44).



Figure 40 : Exemple de photo-interprétation faite en Charente - Cerema

- La **topographie souterraine** est beaucoup plus rarement disponible et ne représente que la partie accessible des vides karstiques (qui peut être très faible par rapport à la totalité des vides présents). Les associations et comités départementaux de spéléologie disposent souvent de la topographie des réseaux¹².

L'acquisition de topographie est devenue plus aisée grâce aux scanners laser terrestres (technologie LiDAR-3D) ou la photogrammétrie (cf. figure 41). Selon l'accessibilité, ces outils permettent de numériser certaines portions de terrain (versant, entrée de cavité, front calcaire, etc.) et par exemple de repérer et/ou quantifier la densité de fracturation ou encore d'estimer précisément certains volumes.

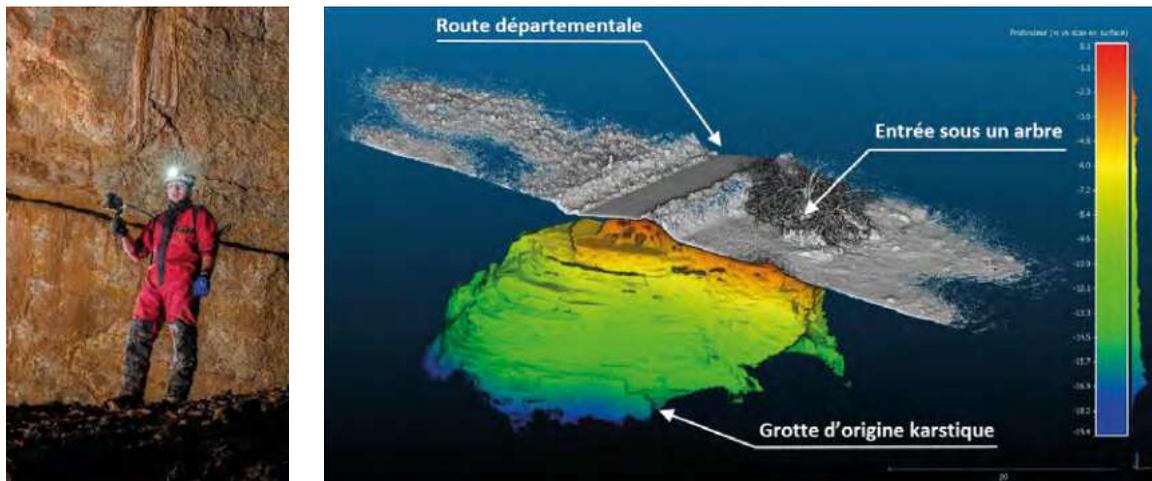
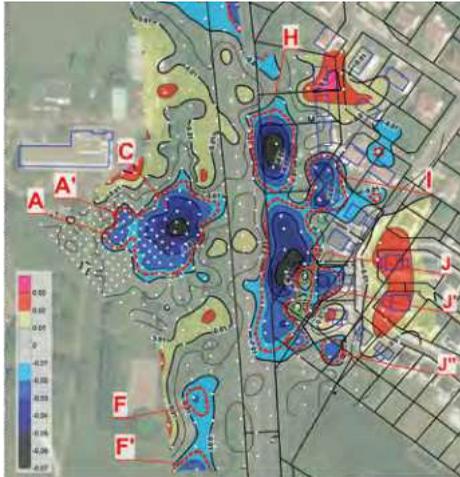


Figure 41 : Exemple d'acquisition et de rendu au scanner laser 3D portable (Reugney – 25) – BRGM

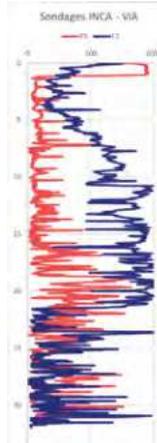
¹² La localisation des réseaux karstiques ne doit cependant pas automatiquement être traduite en aléa élevé (à l'aplomb) mais doit avant tout apporter des informations précieuses quant à la nature, aux caractéristiques et au fonctionnement du système karstique (qualification des critères de prédisposition et/ou d'intensité) : densité et rôle de la fracturation et de la stratification ; profondeur et taille des conduits, répartition altimétrique et type de colmatage/remplissage ; nature et stabilité des toits de cavités, position des niveaux d'eau et des mises en charge, caractéristiques des couvertures...

L'acquisition et/ou le traitement de données géotechniques et géophysiques

D'après les recommandations du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2016), la réalisation d'une cartographie de l'aléa mouvement de terrain doit pouvoir être menée sur la base des données existantes et sans engager d'études complémentaires spécifiques. Néanmoins, dans certains cas, par exemple lorsque les données sont insuffisantes ou obsolètes et/ou que des enjeux importants le justifient (route, voie ferrée, digue, etc.), l'étude d'aléa peut être complétée par des investigations spécifiques¹³ de type géophysique ou géotechnique (cf. figures 42, 43). Ces investigations ont pour objectif de préciser la connaissance du sous-sol. Elles peuvent ainsi détecter des anomalies de natures diverses, éventuellement liées à des



Extrait de la carte d'anomalie microgravimétrique résiduelle. Les points blancs localisent les points de mesure. Les anomalies négatives sont repérées par des lettres.



Logs des forages F2 et F5. Représentation de la VIA

Suite aux mesures microgravimétriques et à leur traitement, une série de sondages de contrôle ont été programmés. Les résultats de deux d'entre eux sont analysés ici :

- le forage F5, tracé en rouge, a été réalisé au niveau d'un apex d'anomalie positive (en rouge sur la carte) ;
- le forage F2, tracé en bleu, a été réalisé au niveau de l'apex de l'anomalie négative « C » (en bleu foncé sur la carte).

La comparaison des vitesses instantanées d'avancement (VIA) confirme la forte décompression des terrains pressentie par la mesure gravimétrique au niveau de l'anomalie C. Elle en précise par ailleurs la configuration : les terrains sont décomprimés à cet endroit jusque 22 mètres de profondeur environ.

Figure 42 : Exemple de mesures géophysiques et géotechniques à Orléans (45) - BRGM

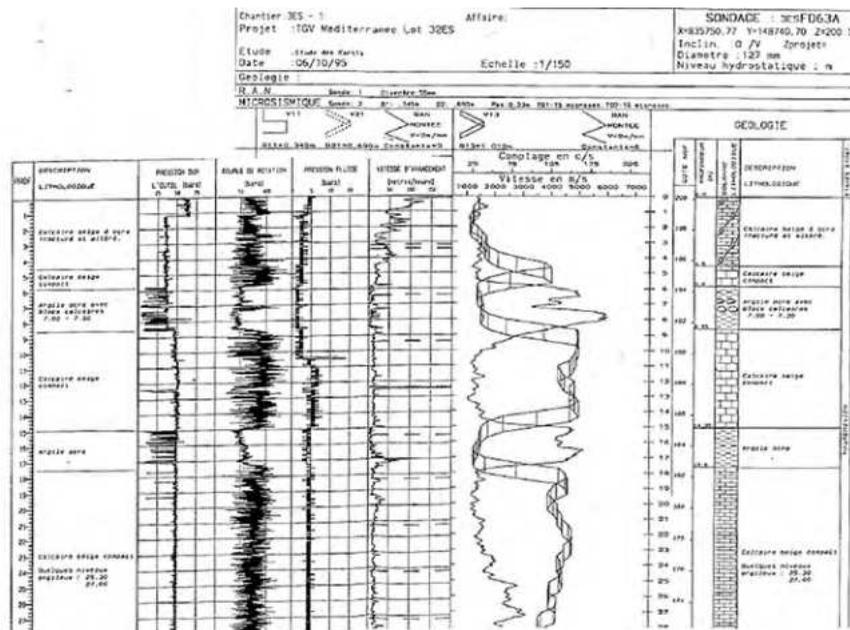


Figure 43 : Exemple de diagaphies en forages sur un secteur à risque karstique (voie ferrée) – Cerema

¹³ Différentes méthodes possibles selon les contextes, cf. guides dédiés.

perturbations souterraines. Ces perturbations peuvent être des vides francs, mais pas seulement : il peut s'agir de vides plus ou moins remplis d'eau, d'anciennes cavités plus ou moins colmatées, de passages plus ou moins décomprimés, etc. En fonction des premiers résultats obtenus, les anomalies détectées peuvent ensuite faire l'objet de mesures plus fines, telles que des inspections instrumentées (diagraphies gamma-ray, vidéo, sonar, etc.). Les méthodes d'investigation doivent donc être adaptées : tout d'abord à ce qui est *a priori* recherché, puis, au fur et à mesure de l'avancement, à ce qui est réellement observé. La définition d'un tel programme d'investigations, puis l'interprétation des résultats doivent donc se faire en fonction de la configuration géologique du site et des processus pouvant s'y produire (cf guide Cerema 2021. Méthodes de reconnaissances des cavités)..

4.2.3. Conseils pour l'analyse des formes en surface

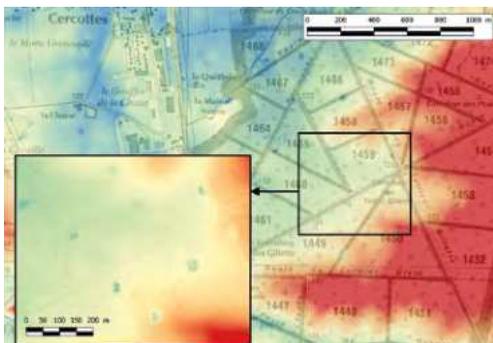
Comprendre les phénomènes et permettre une évaluation correcte de l'aléa passent par un tri des formes repérées en surface du sol. Il s'agit de distinguer :

- les **mouvements de terrain « incontestables »** (s'étant produits à l'échelle humaine) : effondrements, affaissements, glissements/coulées ;
- les **formes *a priori* « stables » à l'échelle humaine**, liées au karst : dolines, vallées sèches, gouffres, etc. ;
- des formes dont l'origine peut rester incertaine, qu'on qualifiera ici d'**indices**.

Faire ce tri paraît facile lorsque le désordre vient de se produire ou qu'un témoignage fiable existe, mais devient plus délicat en l'absence de ce type d'information. Une visite sur le terrain, voire des investigations approfondies, peuvent permettre d'en apprendre davantage. Cependant, il est souvent nécessaire de conserver le caractère incertain de la forme étudiée. Les clés principales d'identification se basent sur la configuration topographique et la nature des matériaux à l'affleurement. Quelques exemples d'analyse sont donnés en figure 44.

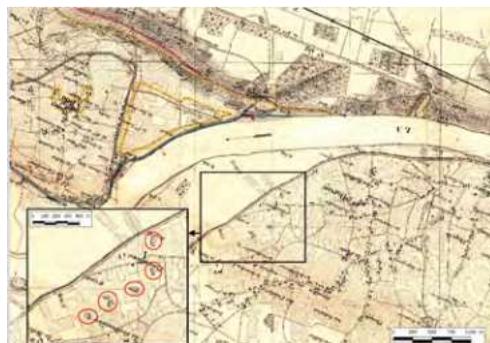
- Toute dépression d'apparence naturelle est *a priori* un **indice**. Le caractère naturel est à relier avec :
 - un contour globalement circulaire ou pouvant être issu de la coalescence de formes circulaires ;
 - l'absence de rebord entre la forme et la surface du terrain naturel (des rebords sont plutôt le signe d'une action anthropique, de type terrassement).
- Des dépressions telles que décrites précédemment et dans lesquelles le calcaire est visible et/ou qui présentent des signes manifestement karstiques (pertes, entrée d'un réseau souterrain, figures de dissolutions ou d'altération, etc.) constituent des **formes karstiques**.

Extrait du MNT 1 m de la forêt d'Orléans (45) - BRGM



Les dépressions, circulaires à elliptiques, sans rebord, sont des dolines (origine karstique). Celles au relief chaotique, aux rebords marqués, sont liées à des emprunts de matériaux.

Extrait de la carte d'état-major de 1850 à Jargeau (45) - BRGM



Les mares entourées en rouge (la plupart aujourd'hui disparues) peuvent correspondre soit à des creusements anthropiques, soit à des dolines. Elles sont ici à considérer comme des indices.

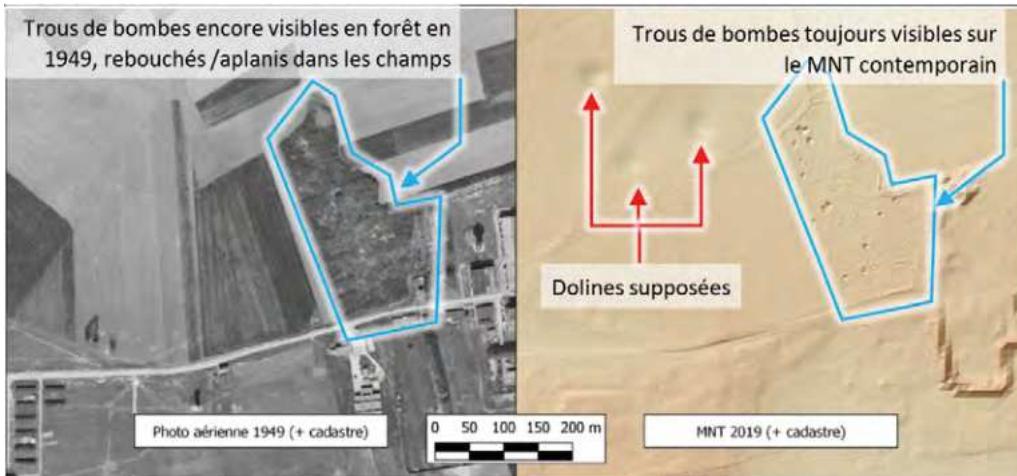


Figure 44 : Exemples d'analyse critique de données, tri entre formes karstiques, indices et « artefacts »

4.2.4. Restitution cartographique

Une fois analysées, les données recueillies doivent être capitalisées sous la forme d'une **base de données de préférence géoréférencée**. Cela permet notamment de produire une ou plusieurs cartes pour (i) de partager le travail réalisé avec le maître d'ouvrage et les collectivités pour communiquer sur les spécificités du territoire étudié et (ii) préparer efficacement la phase de construction de l'aléa, qui nécessite de disposer de cartes de répartition spatiale des critères impliqués dans la caractérisation de l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique.

Une **carte synthétique (dite « informative »)** contribue à la bonne concertation avec les utilisateurs de l'étude. Le fond de plan est à définir au cas par cas (scan topographique, ortho-photo, MNT, cadastre, etc.). Le document produit rassemble les informations relatives aux événements historiques (affaissements et effondrements passés ou actuels) et celles concernant les traits géomorphologiques essentiels du territoire (formations géologiques et pédologiques avec affleurements visibles, par exemple en falaises et zones d'emprunt comme les carrières/gravières, réseau karstique connu et indices topographiques recalés, réseau hydrographique avec limites de bassin versant ou de plaine alluviale, données hydrogéologiques de type source et zone humide, etc.).

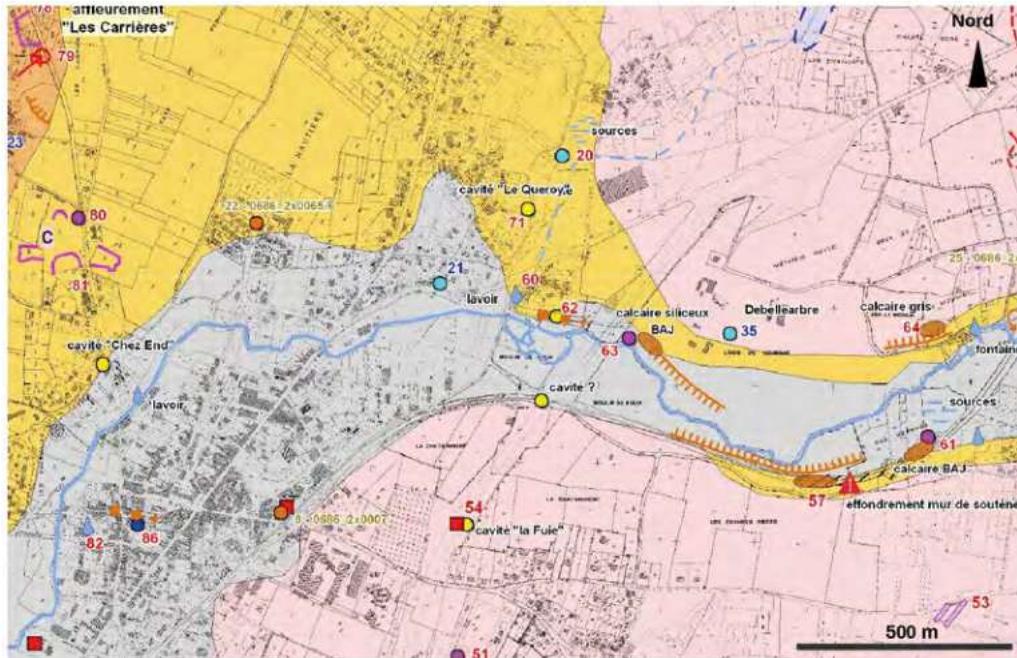
L'**échelle de rendu** est fonction des attentes du donneur d'ordre et des possibilités techniques. Pour des études concernant une ou plusieurs communes, l'échelle habituellement visée est le 1/10 000 ou, dans le meilleur des cas, le 1/5 000. Pour d'éventuelles études plus précises (cas des diagnostics géotechniques), à l'échelle du site, voire de la parcelle, l'échelle peut encore être affinée.

Une approche par « **zone homogène** » (même niveau de qualification de critères) permet d'obtenir un document lisible (et d'aboutir efficacement au zonage de l'aléa).

Si des **incertitudes** subsistent sur des données, elles doivent apparaître par l'intermédiaire d'une symbologie dédiée (par exemple : des lignes en pointillés, des points d'interrogation).

En parallèle, il est conseillé de produire des couches SIG pour chaque critère étudié ou famille de critères (couverture, substratum, hydrodynamisme) afin de préparer le travail ultérieur de croisement des critères.

Un extrait de carte informative est donné à titre d'exemple dans la figure suivante (cf. figure 45).



LEGENDE :

10 N° de référence d'événement (voir fiche rapport)

Désordres d'origine karstique (naturels) :

- Doline / fosse (dépression localisée)
- Méga - doline (dépression de grande taille)
- Effondrement / foris
- Cavité connue, visitable - grotte

Détails hydrologiques :

- Cours d'eau
- Écoulement (cours d'eau temporaire)
- Source
- Puits (observation de terrain)
- Captage / puits (irrigation) - Source info-Terre (BRGM) + n° réf.
- Zone de pertes - point d'absorption des eaux superficielles
- Zone humide (écoulement temporaire)
- Moulière (végétation hygrophile)

Désordres de surface (non naturels) :

- Surface remblayée - Dépôt de blocs (ancienne fosse)
D : décharge sauvage
- Zone de piétinement de bovins - dépression localisée
- Ancien fossé
- Zone d'emprunt / Exploitation / Ancienne carrière
C : calcaire & chaux
All : graves alluvionnaires
A : Argile (briques - tuiles)
- Exploitation minière de fer

Détails topographiques :

- Ressaut topographique (rocher sub-affleurant - géomorphologie)
- Gissement

Détails géologiques :

- Affleurement rocheux naturel
- Caillouillis (rochers sub-affleurant)
- Forage - Source info-Terre (BRGM) + n° réf.

Détails historiques :

- Souterrain (ancien refuge)

Géologie :

- Alluvions (postglaciaire à Actuel)
- Altérites : argiles rouges et argiles à silex
- Calcaires du Bajocien
- Calcaires du Bathonien
- Limite communale

Figure 45 : Exemple de carte informative - Cerema

4.3. Évaluation de la prédisposition (ou probabilité d'occurrence)

4.3.1. Rappel : qualification de la prédisposition

Le guide PPR *Cavités souterraines abandonnées* (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012 - page 41) précise que :

« La détermination de la probabilité d'occurrence de mouvements de terrain renvoie au problème de la prévision dans le temps de la rupture des massifs rocheux. Si une approche probabiliste semble adaptée aux séismes et aux inondations qui restent des phénomènes récurrents, les mouvements de terrain sont, au contraire, des phénomènes non périodiques qui évoluent de manière quasi imperceptible durant de longues périodes avant de subir une accélération soudaine. Ils sont donc très difficilement prévisibles.

Plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période de retour donnée (annuelle, décennale, centennale...), qui laisserait une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en terme de prédisposition du site vis-à-vis d'un type de rupture. »

Ce principe est conservé tel quel pour le présent guide : la **probabilité d'occurrence** est qualifiée sous la forme d'une **prédisposition**. Le terme « prédisposition » est par la suite préféré à celui de « probabilité d'occurrence ».

Dans certains cas, quand on dispose d'une population significative de désordres par zone homogène, on peut calculer une **fréquence d'apparition théorique**. Une méthode est proposée en Annexe 8.2.3.

4.3.2. Méthode d'évaluation de la prédisposition

Une fois caractérisé le périmètre étudié et son secteur karstique délimité, l'évaluation de la prédisposition consiste à **passer en revue, pour chaque processus retenu, les critères concourant à la survenue d'un mouvement de terrain**. Chaque critère est caractérisé/noté en fonction de son influence sur le processus étudié. Certains critères étant plus sensibles que d'autres, il convient d'appliquer une **pondération**. On peut à ce stade aboutir à un zonage par prédisposition (déclic-naison des zones homogènes). Les prédispositions obtenues sont à comparer avec l'historique des événements connus. Si besoin, l'évaluation peut alors être ajustée de manière à se caler sur la réalité.

Cette démarche est **davantage prédictive** qu'une méthode qui ne prendrait en compte que les événements connus (typiquement en entourant ces zones) car, comme on l'a vu, la complexité des systèmes karstiques, la non-exhaustivité des inventaires préexistants et l'effacement progressif de la mémoire contribuent à l'apparition possible d'événements sur des secteurs *a priori* inattendus (parfois sans événement historique).

Dans le détail, les critères à analyser pour chacun des processus sont ici regroupés en **trois pôles** (cf. figure 46) : la sensibilité du substratum carbonaté, le comportement de la couverture (si présente) et le rôle de l'hydrodynamisme.

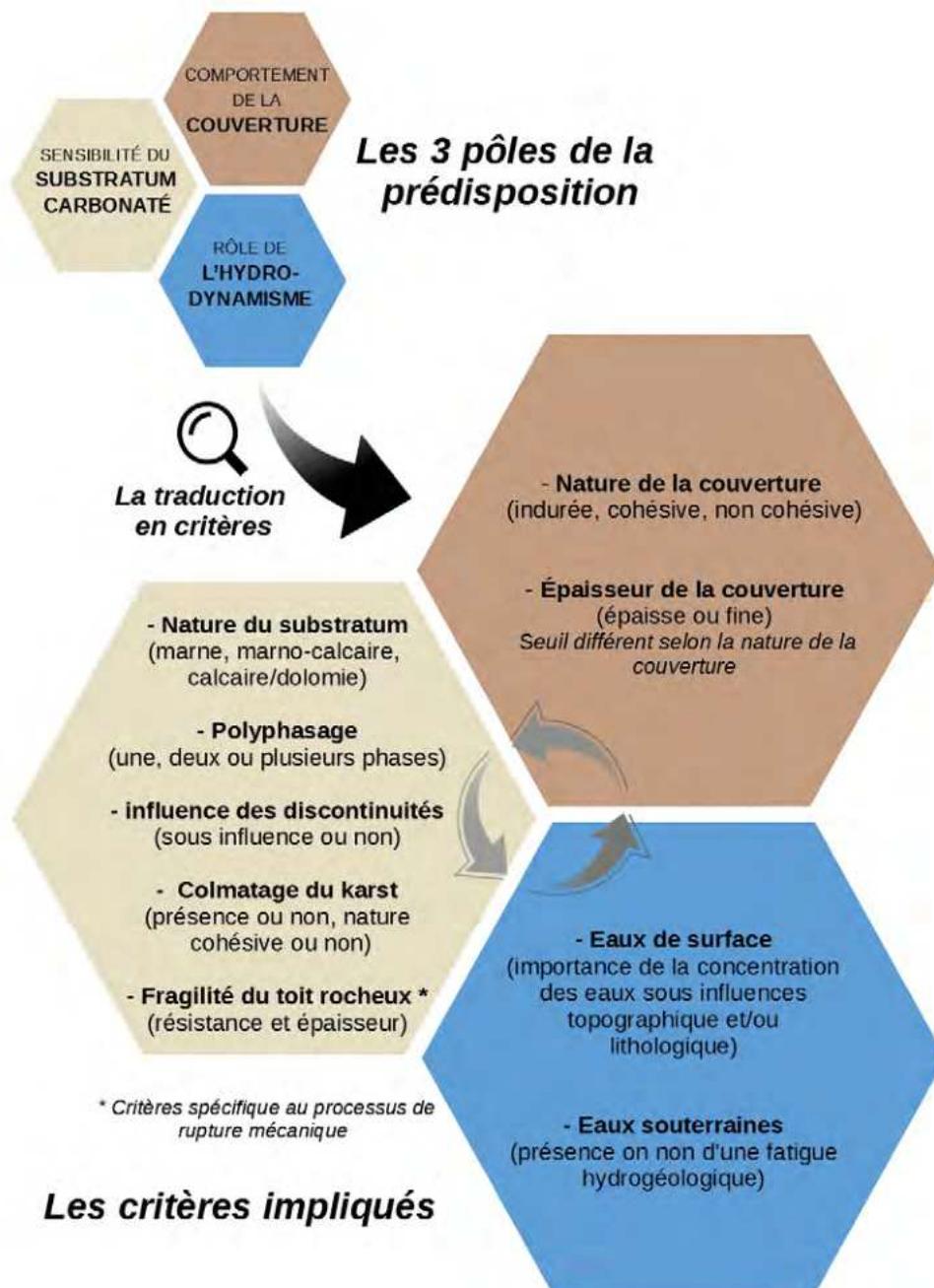


Figure 46 : Prédisposition – Les critères à analyser, regroupés par « pôles »

La plupart de ces critères sont communs à l'ensemble des processus. La figure 47 détaille la grille traitant le processus du suffosion/soutirage. Des illustrations similaires sont disponibles en Annexe 8.2.1 pour les autres processus.

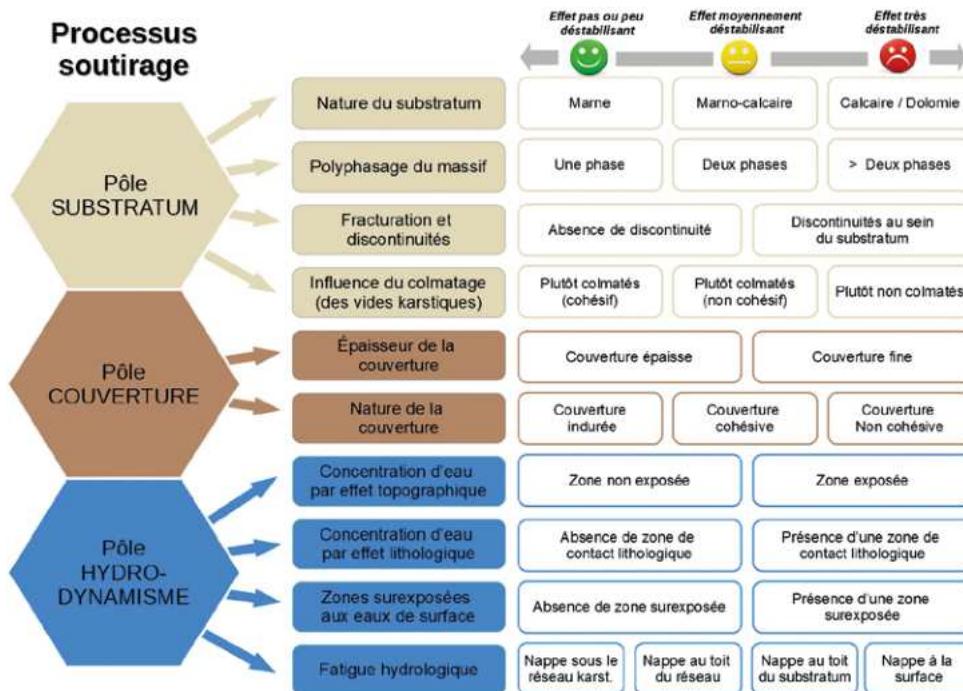


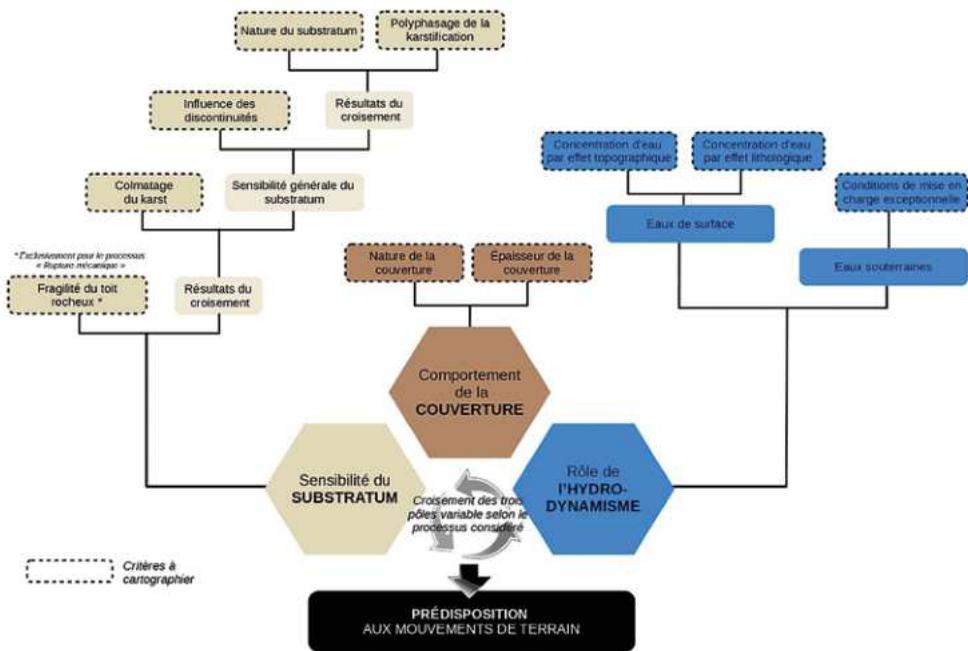
Figure 47 : Prédiposition – Grille d'analyse pour le processus soutirage

Il est possible qu'un ou plusieurs de ces critères ne puissent être caractérisé(s) de manière satisfaisante. Cela conduit soit à écarter ce(s) critère(s) de l'évaluation, soit à ne prendre en compte que le critère le plus sécuritaire, soit à envisager des investigations complémentaires pour le préciser. Dans tous les cas, les incertitudes résiduelles à l'issue de l'analyse devront être listées et argumentées ; les moyens pour les réduire ultérieurement pourront faire l'objet de recommandations en fin du rapport.

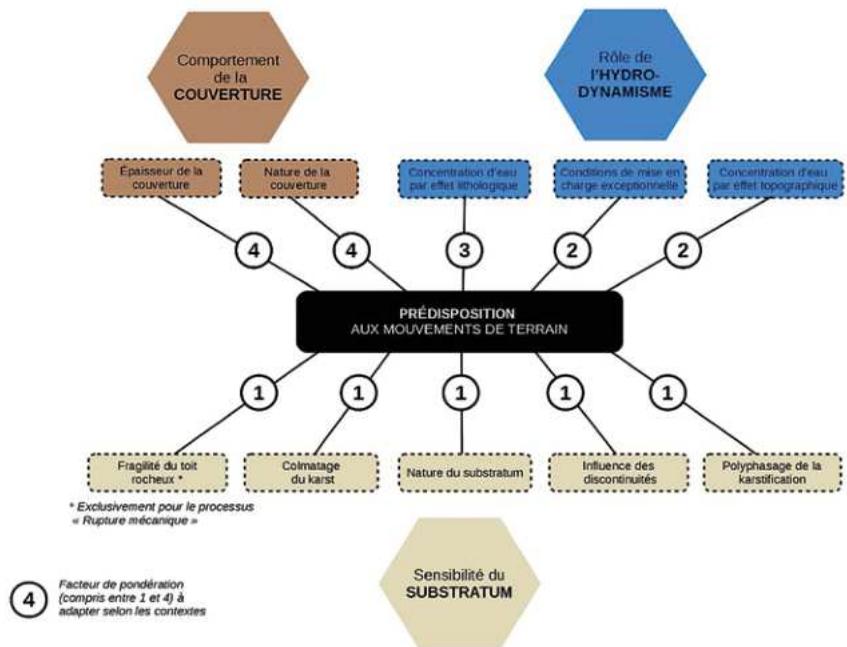
Une fois passé en revue et caractérisé/noté chaque critère, la prédiposition est obtenue par leur **combinaison**, qui peut se faire de deux manières différentes (cf. figure 48) :

- soit par le **croisement successif** des critères : ces croisements se font du critère le moins influent au plus influent (car de cette manière les derniers croisements ont un plus grand poids que les premiers) ;
- soit par un **calcul global** de l'ensemble des critères : la pondération se fait *via* des coefficients. Même si une pondération des critères valable à l'échelle nationale est impossible en l'état actuel des connaissances, un exemple est donné en figure 48. Seule une étude approfondie du périmètre investigué permet de déterminer de manière précise de telles valeurs : Perrin *et al.* (2013, 2014a, 2014b) ont ainsi mené des études statistiques du type poids des évidences sur plusieurs territoires en France. À défaut, des pondérations à dire d'expert sont possibles, qui, pour être comprises par le lecteur, doivent être accompagnées d'explications.

Deux exemples, un pour chacune de ces approches, sont détaillés en Annexe 8.3.



Combinaison par croisements successifs

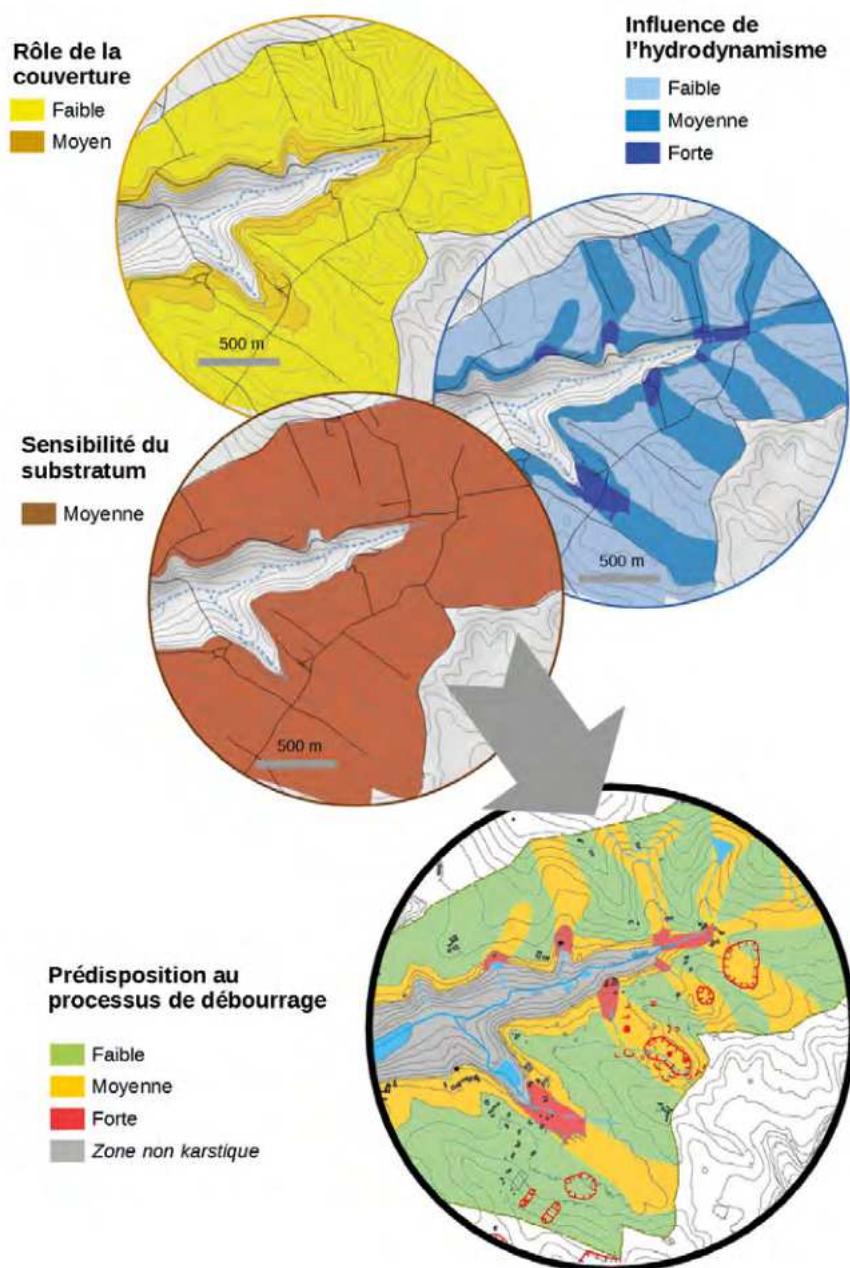


Suffosion/soutirage - Combinaison par calcul pondéré (les chiffres 1-2-3-4 sont les poids donnés aux critères)

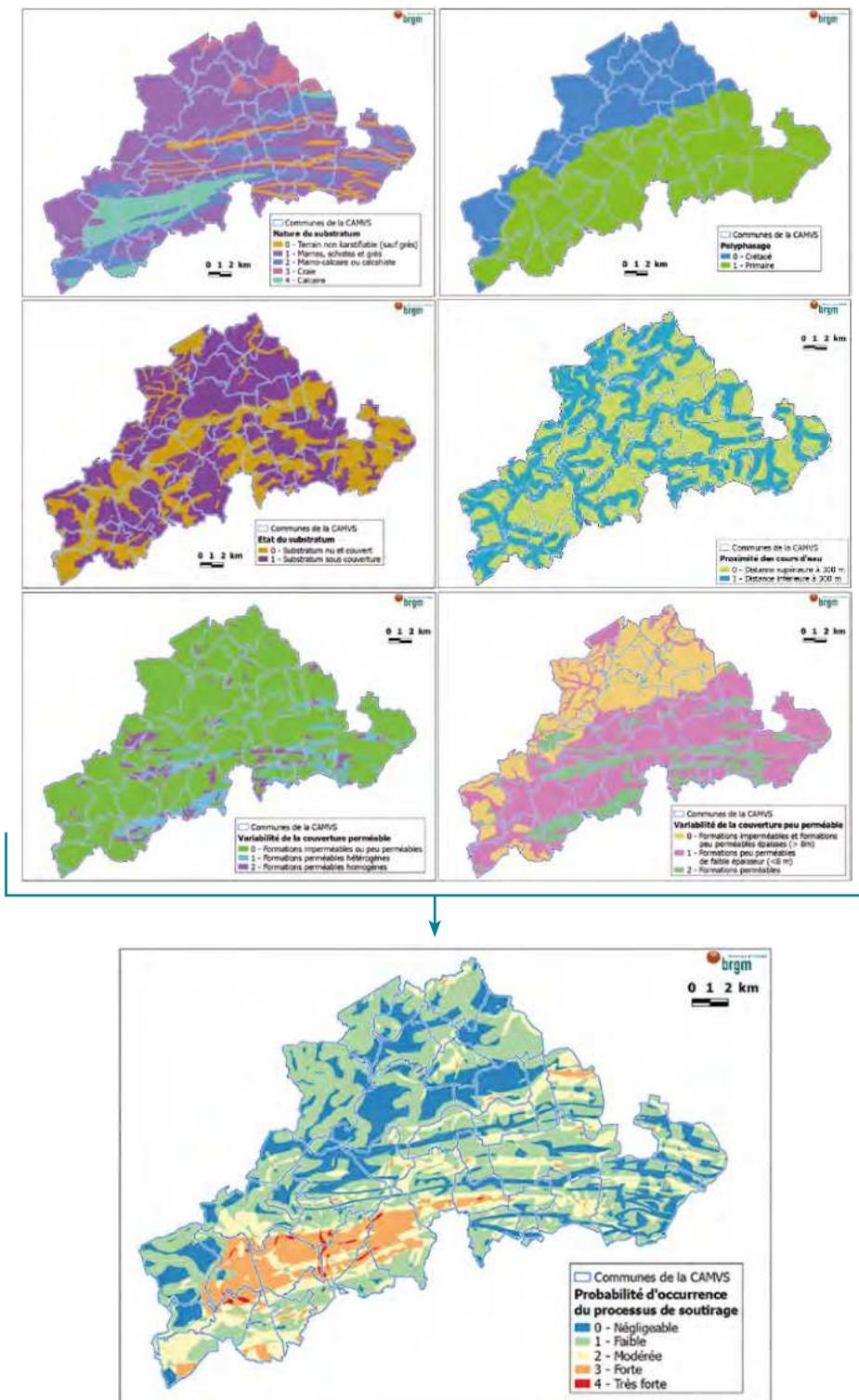
Figure 48 : Prédiposition – Les deux démarches possibles pour la combinaison des critères

À titre d'exemples, deux traitements sont illustrés en figure 49 :

- le premier correspond à un site d'environ 2 km² situé dans le Sud-Ouest de la France (Nouvelle Aquitaine) ;
- le second a été réalisé à l'échelle pluricommunale (344 km²) pour la communauté d'agglomération Maubeuge – Val de Sambre (Abad *et al.*, 2018).



Ex. 1 : Test réalisé sur un secteur du Sud-Ouest de la France - Prédiction au débouillage



Ex. 2 : Étude pour la com. d'aggl. de Maubeuge Val de Sambre - Prédiposition au soutirage (rapport BRGM RP-68045-FR)
 Figure 49 : Prédiposition – Exemples de cartes finales

4.3.3. Critères influençant la prédisposition

Les éléments suivants guident la caractérisation des critères et leur pondération. Ils sont bien sûr à confronter avec la réalité du terrain et à adapter le cas échéant.

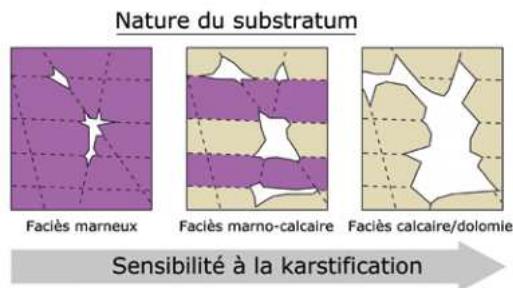
a) Influence du substratum carbonaté (PÔLE « SENSIBILITÉ DU SUBSTRATUM CARBONATÉ »)

L'influence du substratum sur les processus d'instabilités karstiques dépend du degré de karstification de la roche (critère nature du substratum et polyphasage de la karstification), de la fracturation de l'encaissant rocheux (critère fractures et discontinuité) et de la configuration des cavités (critère fragilité du toit et critère colmatage). Trois de ces critères fonctionnent de la même manière pour l'ensemble des processus (critères communs) alors que deux autres jouent différemment suivant le processus considéré (critères spécifiques).

Substratum – Critères communs

- La **nature du substratum** (lithologie) : plus la fraction carbonatée est importante, plus la possibilité de karstification est élevée. Trois classes sont proposées en fonction des faciès rencontrés : marneux, marno-calcaire ou calcaire/dolomitique.

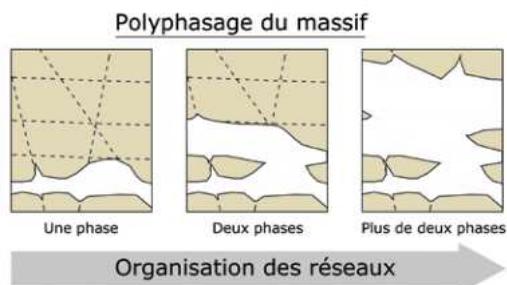
→ Ce critère joue de la même manière pour les quatre processus.



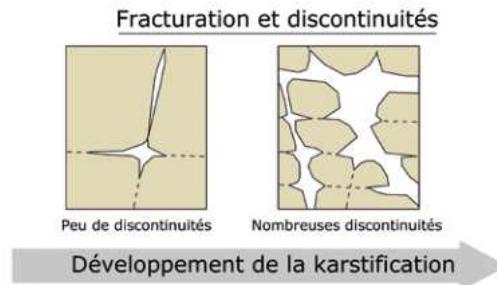
Le faciès marno-calcaire peut parfois être davantage sensible à la karstification du fait d'une circulation d'eau bloquée au niveau des bancs marneux. Il conviendra alors d'adapter la classification proposée ci-dessus.

- Le **polyphasage** : plus le massif a subi de phases de karstification, plus celui-ci a eu l'occasion de se structurer (avec davantage de vides et d'interconnexions). Trois classes sont retenues : une, deux ou plus de deux phases de karstification.

→ Ce critère joue de la même manière pour les quatre processus.



- Les **fractures et discontinuités** : la littérature scientifique indique que la karstification est plus intense là où se concentrent les eaux, ce qui, à l'échelle d'un massif, a généralement lieu au niveau des fractures et des discontinuités. Deux classes relatives sont proposées : discontinuités peu ou très nombreuses. D'un point de vue purement tectonique, cela revient à considérer l'éloignement des terrains aux failles. Les autres types de discontinuités, telles que les limites de bancs ou les diaclases, peuvent également être prises en compte mais l'expérience montre que cela est généralement complexe.
- Ce critère joue de la même manière pour les quatre processus.



Remarque 1 : Les failles représentées sur les cartes géologiques sont valables à l'échelle de ces documents. La caractérisation structurale d'une ou plusieurs communes nécessite donc de compléter la connaissance en procédant à des analyses spécifiques, notamment des levés de terrain.

Remarque 2 : Plusieurs études se sont intéressées à la densité des formes karstiques à proximité des failles. On citera notamment :

- sur deux communes de Haute-Saône, l'influence des failles sur la densité des formes karstiques à cette échelle et à cet endroit n'est plus visible à 100 m de distance (Vallet *et al.*, 2021) ;
- à l'échelle métropolitaine, cette distance d'influence est évaluée à 2 500 mètres suite à une analyse croisée de la BD Cavités et des failles cartographiées à 1/50 000 (Vanoudheusden *et al.*, 2022).

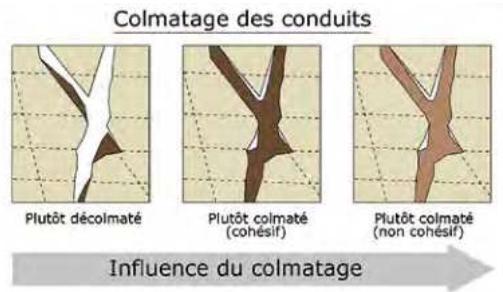
Substratum – Critères spécifiques

- Le **colmatage du karst** : les conduits peuvent être colmatés soit par les matériaux issus de la karstification (résidus d'altération en place ou remaniés - cf. Annexe 8.1.4), soit par ceux venus combler les conduits après leur évidement (exemple des remplissages exogènes). Ce colmatage a par ailleurs pu être évacué lors d'une purge ultérieure du système. Le karst est donc plus ou moins colmaté voire « purgé ». Dans le cas d'un karst non purgé, plus le colmatage est érodable (matériaux non cohésifs), plus la situation est instable. Trois classes sont ainsi distinguées : karst purgé, karst en partie colmaté avec des matériaux cohésifs ou en partie colmaté avec des matériaux non cohésifs.

→ Ce critère joue différemment selon les processus :

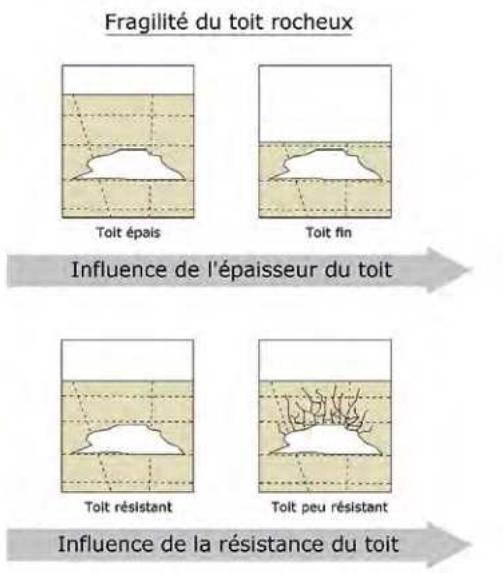
- pour le processus de rupture de toit, l'influence de ce critère est considérée comme négligeable par rapport à celle de la fragilité du toit rocheux (cf. ci-dessous). On peut toutefois imaginer dans certains cas la présence d'un colmatage suffisamment résistant pour au moins limiter ce processus ;
- le soutirage est facilité dans le cas d'un karst purgé ;
- à l'inverse, les processus de débouillage et d'extrusion ne se produiront pas si le karst est

purgé ; si le karst est au moins en partie colmaté, ils se produiront davantage si les matériaux de colmatage sont non cohésifs plutôt que cohésifs.



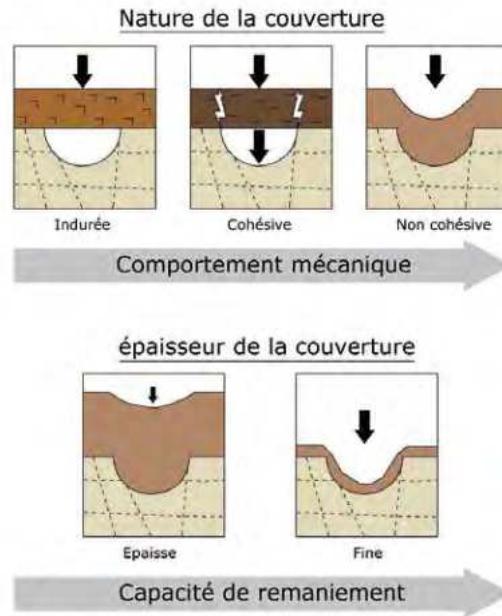
- La fragilité du toit rocheux

→ Ce critère ne concerne que le processus de rupture de toit. Cette rupture est favorisée dans le cas d'un toit peu épais et peu résistant (deux sous-critères relatifs). La rupture est surtout gouvernée par ce critère plutôt que par les interactions hydrodynamiques ou le comportement de la couverture.



b) Influence de la couverture (PÔLE « COMPORTEMENT DE LA COUVERTURE »)

L'influence de la couverture sur les processus d'instabilités karstiques dépend de son épaisseur et de sa nature. Ces deux critères fonctionnent de la même manière pour l'ensemble des processus : plus la couverture est épaisse et plus elle est cohésive, plus il est difficile de la mobiliser.



ENCART 4 : ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE

> Une analyse par typologie de karst, réalisée dans une étude préliminaire à ce guide (Perrin *et al.*, 2013 et 2014 a et b) fournit une tendance nationale (cf. figure 50). Une large majorité des 825 désordres décrits en métropole sont rencontrés en contexte de karst sous couverture perméable et de karst de contact (cf. § 2.3.3). En considérant les surfaces globales concernées sur le territoire métropolitain (karsts sous couverture $\approx 170\,000\text{ km}^2$; karsts nus $\approx 40\,000\text{ km}^2$), **les karsts sous couverture présentent ainsi, à l'échelle nationale et sans tenir compte des évidentes disparités régionales, une densité de désordres quatre fois plus forte que les karsts nus.**

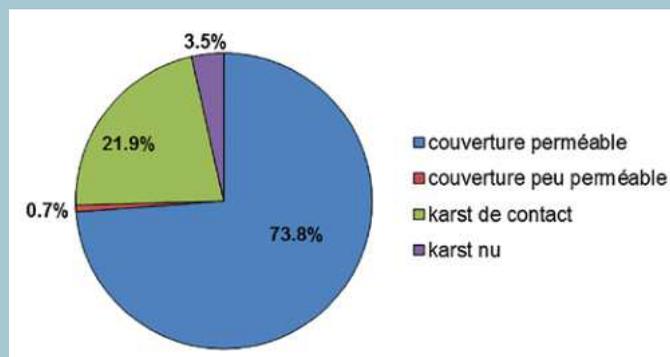


Figure 50 : Répartition des désordres d'origine karstique en France métropolitaine en fonction de la nature de la couverture (Perrin *et al.* 2013 & 2014).

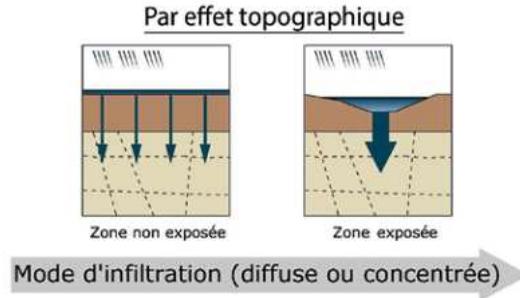
> à titre d'exemple, il a été montré que la présence de plus de 8 m d'une couverture argileuse expliquerait l'absence d'indices et de désordres karstiques dans le cas du karst sous couverture du val d'Orléans (Perrin *et al.*, 2014b).

c) Influence de l'hydrodynamisme (PÔLE « RÔLE DE L'HYDRODYNAMISME »)

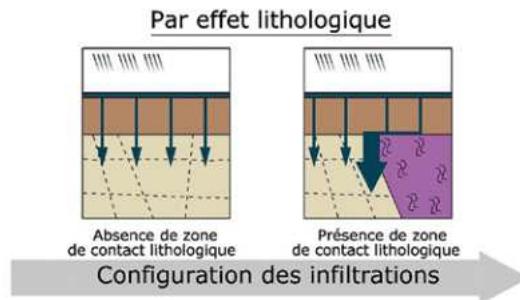
L'influence de l'hydrodynamisme sur les processus d'instabilités karstiques concerne les eaux de surface (hydrologie de surface) et les eaux souterraines (hydrogéologie).

Le critère **hydrologie** (eaux de surface) joue selon trois effets :

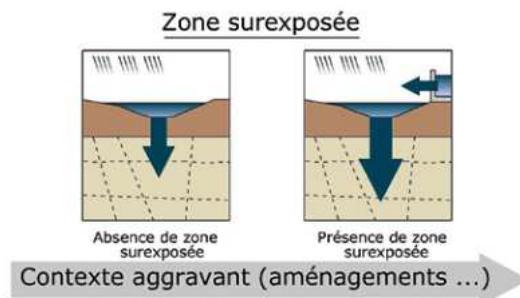
- **l'effet topographique** : les eaux superficielles ont naturellement tendance à s'accumuler dans les zones basses : ces dernières sont plus exposées aux phénomènes karstiques que les zones plates par concentration des eaux et mise en place de gradients hydrauliques.



- **l'effet lithologique** : les circulations d'eaux se concentrent également au niveau d'obstacles géologiques peu perméables, par exemple au contact entre des calcaires et des marnes. Cette configuration géologique correspond à celle du karst de contact décrite précédemment au § 2.3.3 ;



- la **surexposition** de certaines zones est enfin à considérer. Il s'agit entre autres des confluences de cours d'eau, des zones inondables, des zones incluant un aménagement hydraulique imparfaitement étanche (réseau enterré, fossé, bassin de rétention, canal, etc.). Par souci de simplification et même s'il s'agit d'eaux en réalité souterraines, les secteurs concernés par des nappes perchées sont également incluses dans ce classement.



ENCART 5 : LE RÔLE DE L'HYDROLOGIE SELON LE PROCESSUS CONSIDÉRÉ

- elle joue peu sur la rupture du toit d'une cavité car les sollicitations générées restent en surface, sans atteindre le réseau souterrain (à l'exception du cas où le substratum est tendre et/ou fortement fracturé et que l'eau apporte ainsi (i) une surcharge et (ii) une perte de cohésion au niveau des épontes et des colmatages argileux) ;
- elle influence en revanche particulièrement le débouffrage et le mécanisme de suffosion/soutirage, car les matériaux susceptibles d'être mobilisés se trouvent en surface et sont sensibles à l'eau (entraînement par infiltrations localisées/concentrées) ;
- elle constitue un préalable à l'extrusion (entrée massive d'eau en amont du système karstique).

À titre d'illustration, on peut rappeler ici la recrudescence d'effondrements karstiques qui a suivi l'inondation de certains secteurs dans le Loiret après les fortes précipitations de mai-juin 2016 (remaniement de la couverture alluviale par modification/amplification du gradient hydraulique cf. § 2.2.2).

Concernant l'**hydrogéologie** (eaux souterraines) :

La position du toit de la **nappe karstique** (battements inclus, en les considérant comme faibles), prise ici comme la position la plus représentative pour chaque zone homogène, peut s'établir de manière simplifiée à **quatre niveaux différents** (cf. figure 51). En cas de grands battements, un choix devra être fait, il pourra être celui de la position la plus courante de la zone homogène.

Positions de la nappe souterraine :

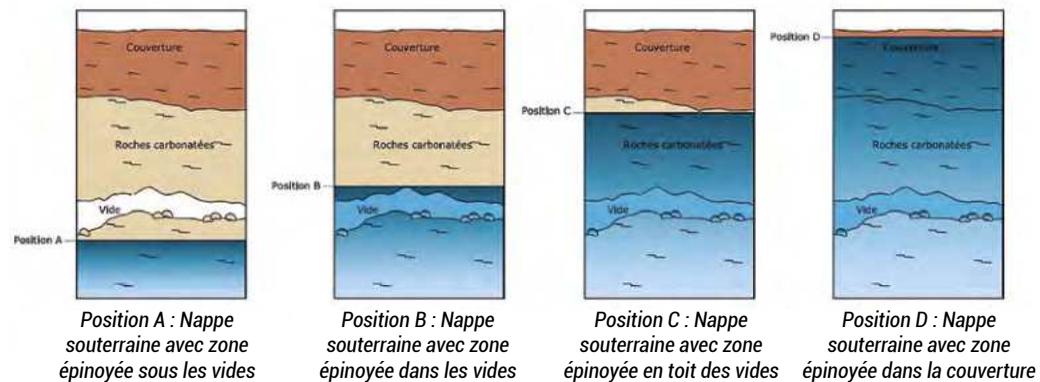


Figure 51 : Prédiposition – Les quatre positions à considérer pour la nappe karstique

Cette configuration joue plus ou moins différemment selon le processus considéré : les influences extrêmes et quelques indications intermédiaires sont données dans le tableau de la figure 52. L'ensemble du classement est fourni pour chaque processus dans les grilles d'analyse en Annexe 8.2.1.

Suffosion / Soutirage	Position de la nappe la plus défavorable : D <i>La fluctuation d'une nappe dans cette configuration (fatigue hydro-géologique) est la plus à même de déclencher le mécanisme de suffosion/soutirage car ces circulations contribuent à évacuer les matériaux de la couverture dans le réseau.</i>
Débouillage	Position de la nappe la plus défavorable : C <i>Cette configuration est la plus sensible pour le débouillage car elle fragilise les colmatages.</i>
Rupture mécanique	Position de la nappe la plus défavorable : B <i>Cette configuration est la plus sensible pour la rupture du toit d'une cavité car elle le fragilise.</i>
Extrusion	Position de la nappe la plus défavorable : D <i>La fluctuation d'une nappe dans cette configuration est la plus à même de déclencher le mécanisme d'extrusion car ces circulations contribuent à évacuer les matériaux de colmatage du réseau.</i>

Figure 52 : prédisposition – Influence de la position de la nappe (battements inclus, en les considérant comme faibles)

4.4. Évaluation de l'intensité

4.4.1. Rappel : définition de l'intensité

L'intensité des mouvements de terrain en lien avec la présence de cavités souterraines est classiquement approchée par la prise en compte de l'**ampleur physique des désordres en surface**, que ces derniers soient observés ou potentiels. Ce sont généralement le diamètre des désordres (dans le cas des effondrements) et la mise en pente (affaissement) qui sont recherchés, car considérés comme les caractéristiques les plus déstabilisatrices (cf. tableau ci-après et cf. guide PPRN *Cavités souterraines abandonnées*, 2012 ; guide *Dissolution naturelle du Gypse dans le sous-sol*, 2018). Pour ce qui concerne l'extrusion, le retour d'expérience est encore insuffisant pour bâtir une classification dédiée, mais vu les phénomènes en cause, on pourra lier d'une part cette intensité à la taille des conduits de restitution et d'autre part aux caractéristiques des terrains mis en mouvement à l'aval.

Pour les effondrements et affaissements, il est préconisé de ne tenir compte que du **diamètre** en surface des désordres potentiels sur les biens (affaissements et effondrements confondus), indépendamment de la profondeur du mouvement. Le diamètre considéré est celui constaté ou prédit au moment de son apparition (effet sablier compris) et non celui pouvant être lentement atteint suite à l'évolution post-effondrement (mise en pente progressive des terrains par érosion). Dans un contexte karstique affectant un substratum carbonaté, et dans un souci d'harmonisation avec les guides existants (cités précédemment), l'intensité des phénomènes peut **en première approche** être définie selon **trois classes : limitée, modérée et élevée**, avec des **seuils** de diamètre à **3 et 10 mètres** (cf. figure 53). On renverra également aux illustrations fournies au § 3.1.1. Au regard, entre autres, de la configuration spécifique des vides naturels et de la dimension, généralement inférieure, des effondrements d'origine karstique par rapport à ceux liés à la présence de cavités anthropiques (cadre initial utilisé pour la définition des seuils), une marge d'appréciation est possible pour cette classification. Cette souplesse doit être utilisée avec parcimonie et pertinence. On pourra par exemple ajouter ici une classe « **très limitée** » pour les mouvements présentant un **diamètre inférieur à 1 m**.

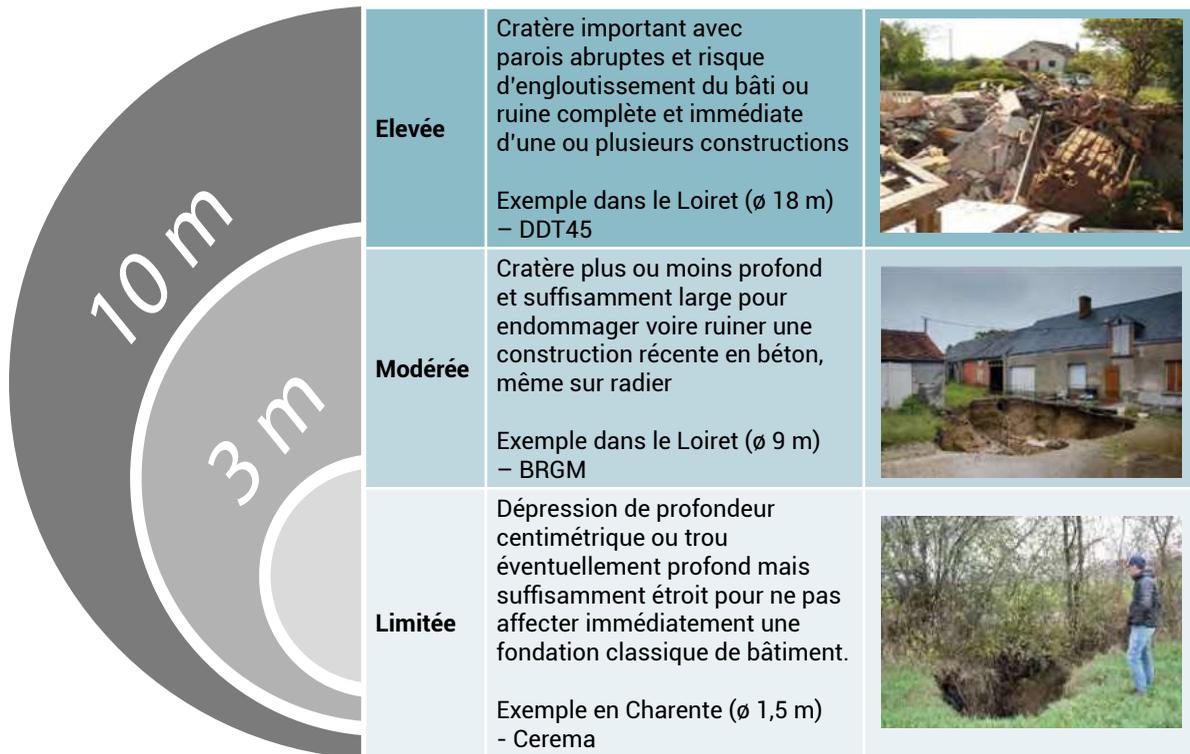


Figure 53 : Intensité – Classification habituellement utilisée liée au diamètre de surface (des ajustements sont possibles – voir texte)

Par ailleurs, les désordres en surface présentent des dynamiques variées, allant de déclenchements relativement soudains (le plus souvent) à des apparitions progressives traduisant une évolution longue et continue des matériaux (plus rarement observable). De même, l'apparition soudaine en surface peut être le résultat d'une phase de maturation plus ou moins longue en profondeur ayant généré, par suffosion/soutirage par exemple, une cavité aveugle en subsurface (sans signe précurseur) s'effondrant de manière brutale (une fois le toit ou la couverture devenu(e) trop fragile). Ces différentes dynamiques étant très difficiles à appréhender et prédire, seul le diamètre des mouvements de terrain est retenu.

De même, les informations relatives à la profondeur de l'effondrement, ainsi qu'à la cinétique (brutalité) des phénomènes (importants pour le risque humain) ne sont pas retenues ici comme critère de qualification de l'intensité. Néanmoins, si les informations nécessaires pour cela sont disponibles sur un site donné, il n'est pas exclu de les considérer pour caractériser et/ou justifier l'intensité retenue/affichée.

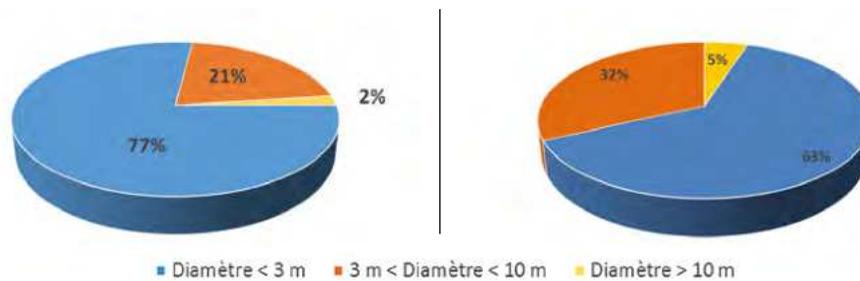
4.4.2. Les intensités classiquement rencontrées en contexte karstique

Le diamètre des mouvements de terrain de type affaissement/effondrement rencontrés en contexte de massif carbonaté karstique est assez variables. Il dépend étroitement des caractéristiques géomorphologiques locales et de l'intensité des facteurs déclenchants, ainsi que du processus impliqué.

Pour les processus de **suffosion/soutirage** et de **débouillage**, les effondrements prennent en surface la forme de fontis ouverts dont le diamètre varie, en général, entre 0,5 / 1 m et 10 / 15 m pour les cas les plus spectaculaires (exemples en contexte de couverture alluviale épaisse à Saint-Pryvé-Saint Mesmin (45) et dans la plaine alluviale du Bandiat -16). Néanmoins, le plus souvent, le diamètre atteint en moyenne entre 1 et 3 m, tous contextes confondus.

Dans les cas, plus rares, d'**effondrement par rupture du toit d'une cavité**, le diamètre en surface peut être plus significatif. Il dépend de plusieurs paramètres dont les dimensions du vide et suivant le comportement des terrains le surmontant, en particulier le possible foisonnement des éboulis et l'éventuel effet sablier dans la couverture. À titre d'exemples (cf. figure 54) :

- dans le Sud-Ouest de la France (formations secondaires et tertiaires du bassin d'Aquitaine), les désordres constatés récemment présentent pour près de 80 % d'entre eux un diamètre inférieur à 3 m (tous processus confondus). Seuls quelques cas isolés (moins de 2 %) concernent des fontis d'intensité élevée, notamment survenus dans des conditions hydrodynamiques défavorables. Quant aux mouvements de terrain d'intensité modérée, ils atteignent parfois cette classe par évolution du désordre, c'est-à-dire par agrandissement progressif des bordures de l'effondrement, le plus souvent au sein d'une couverture peu cohésive (effet sablier) ;
- sur les 160 km² du val d'Orléans (lit majeur inondable de la Loire), les désordres constatés se répartissent suivant des ordres de grandeurs similaires, avec une proportion légèrement plus importante pour les intensités modérées et élevées.



En Nouvelle-Aquitaine

Dans le val d'Orléans

Figure 54 : Intensité – Exemples de répartition statistique

4.4.3. La méthode de caractérisation de l'intensité

La qualification de l'intensité des mouvements de terrain d'origine karstique paraît plus difficile que celle de la prédisposition, car elle dépend davantage de critères paraissant difficiles à préciser (notamment dans le cas d'absence de connaissances sur la taille des vides impliqués par les mouvements de terrain). L'analyse d'évènements historiques peut ici servir de recours, à condition bien sûr de disposer d'une population représentative par zone homogène (cf. figure 55) ; une intensité historique est alors obtenue. Dans le cas contraire, l'intensité sera évaluée de manière déterministe, en considérant la configuration du terrain et les processus en cause ; il s'agira alors d'une intensité théorique.

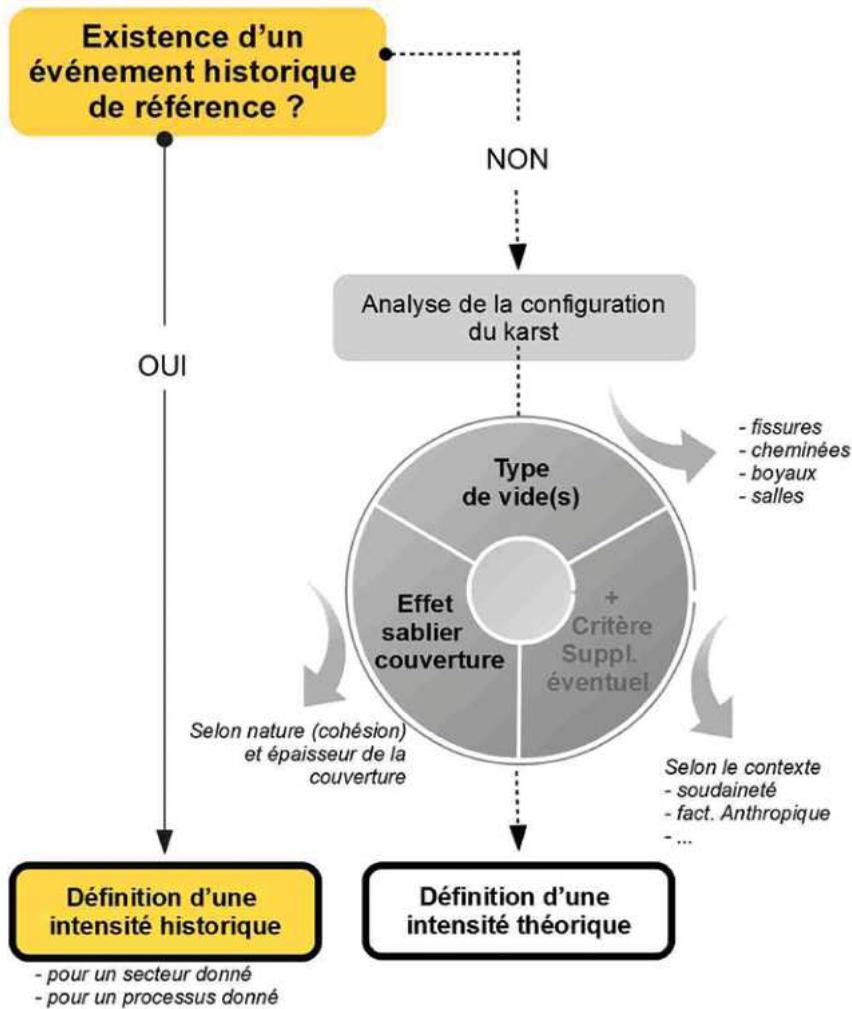


Figure 55 : Intensité – Principe général de la démarche

Dans le détail, la démarche est la suivante :

a) Privilégier les événements historiques bien documentés

À l'image de la démarche employée pour l'étude des phénomènes de type glissements de terrain ou chutes de bloc, on identifiera pour chaque zone homogène un **événement de référence historique ou prévisible** ; dans les deux cas, l'échéance visée est de l'ordre de **100 ans (échelle humaine)**, ce qui exclut les événements d'occurrence géologique. Cela implique le recensement et la caractérisation des désordres existants (à reporter sur la carte informative). Cet événement de référence doit être représentatif :

- de la zone homogène considérée ;
- et du processus considéré ; c'est-à-dire rattaché à la suffosion/soutirage et au débouillage, à la rupture du toit d'une cavité ou à l'extrusion.

En cas de **rupture du toit de salles et lorsque celles-ci sont visitables**, l'intensité sera évaluée en fonction de la configuration des secteurs connus, via le volume des vides, les caractéristiques

géotechniques des roches et les conditions de propagation de la rupture vers la surface. On pourra pour cela se servir d'abaques ou de règles éprouvées (par exemple Waltham et Lu, 2007). Les calculs développés pour l'aléa minier (Géoderis, 2012) permettent de vérifier par ailleurs si l'effondrement atteint la surface ou si celui-ci se bloque lors de sa remontée (autocomblement par foisonnement des matériaux éboulés). On peut aussi rappeler les travaux de Gilli (1984) qui comparent et analysent la stabilité de grandes cavités.

b) À défaut, définir une intensité théorique

En l'absence de données historiques exploitables, l'intensité peut être évaluée suivant les notions suivantes :

- la **configuration des vides présents** ou pressentis (volume notamment). Bien que le lien direct entre le volume des vides souterrains et la taille des désordres en surface ne soit pas clairement mis en évidence dans la littérature, ce critère peut être discriminant. Dans cette optique, deux alternatives sont possibles : en priorité, choisir la taille de vide selon la connaissance du sous-sol du site (souvent en lien avec l'activité spéléologique du site) ou par défaut et en cas de mauvaise connaissance du sous-sol, affecter un type de vide par processus étudié : la **fissure** pour la suffosion/soutirage ; la **cheminée/boyau** pour le débouillage et l'extrusion ; la **salle** pour la rupture du toit d'une cavité ;
- **pour le cas du karst nu**, l'intensité est directement dépendante de la taille des vides. Dans ce cas, les désordres sont potentiellement d'autant plus grands que les vides sous-jacents (mais proches de la surface) sont volumineux (salles dont la largeur est supérieure à 2 m > boyaux/cheminées dont la largeur est comprise entre 0,5 m et 2 m > fissures dont la largeur est inférieure à 0,5 m) ;
- **pour le karst sous couverture**, le **comportement de la couverture** : la couverture est considérée comme pouvant influencer le diamètre des désordres en surface en lien avec la manière dont le vide progresse du substratum vers la surface. Plus concrètement, c'est le phénomène d'effet sablier qui est pris en compte. Il s'agit de considérer le mécanisme qui contribue à l'élargissement du désordre en surface lors de « l'absorption » des matériaux de la couverture vers les vides sous-jacents : il faut pour cela retenir que plus la couverture est épaisse et peu cohésive (sableuse par exemple), plus le diamètre du désordre, en surface, sera grand, et donc plus l'intensité sera élevée. Cet effet est illustré par le tableau et par l'encart fournis ci-dessous.

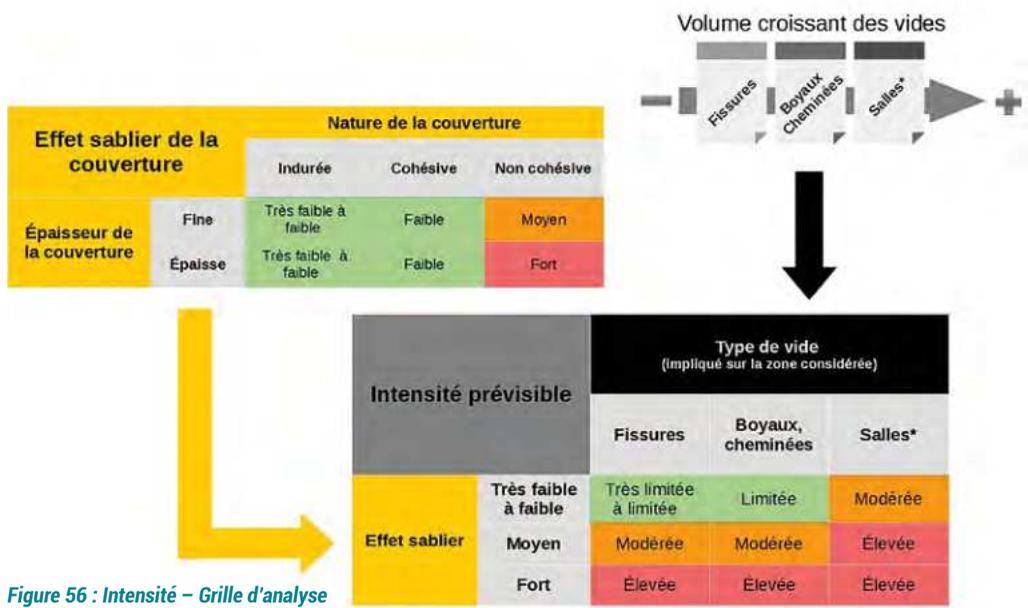


Figure 56 : Intensité – Grille d'analyse de l'effet sablier pour le karst sous couverture

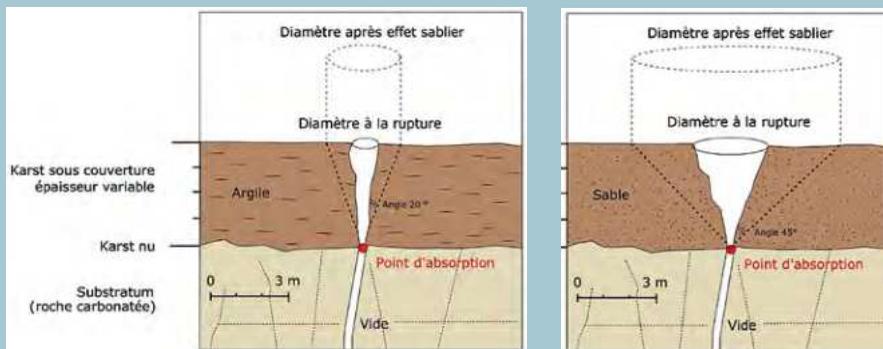
* Seules sont considérées ici les salles proches de la surface et dont l'épaisseur du toit calcaire est inférieure à 5 m
 * Cela concerne principalement le processus de rupture

ENCART 6 : INFLUENCE DE L'EFFET SABLIER SUR LE DIAMÈTRE DE L'EFFONDREMENT

Le diamètre en surface des mouvements de terrain définit classiquement leur intensité. Il dépend non seulement des vides sous-jacents (dont la taille varie entre la fissure, le boyau/cheminée et la salle) mais aussi du comportement des terrains recouvrant le substratum. À l'intérieur de cette couverture a en effet lieu un « effet sablier » : ces terrains sont déstabilisés à plus ou moins court terme après la survenue de l'effondrement et finissent par s'équilibrer suivant une pente qui dépend de leur cohésion et de leur angle de frottement interne (caractéristiques géotechniques de cisaillement). La vitesse avec laquelle cet effet se met en place dépend de l'érodabilité des matériaux et des sollicitations les mobilisant, notamment les eaux arrivant dans l'effondrement. Cette évolution peut se faire sur plusieurs jours/mois, voire plusieurs années. Le diamètre résultant de cet effet est celui à déterminer pour établir l'intensité du mouvement. Pour l'estimer, il est proposé ici d'ajouter au diamètre « D » correspondant à l'ouverture originelle au toit du substratum, la distance « 2d » liée à l'effet sablier de part et d'autre de cette ouverture. D'autres méthodes existent (Sowers, 1996), elles sont équivalentes à celle présentée ici.

Sans disposer des caractéristiques géotechniques de cisaillement de la couverture, cet effet sablier peut être approché sur la base de relations géométriques simples. Les schémas théoriques ci-après (figures x1, x2), présentent deux lithologies différentes ; les valeurs données ici pour l'argile (20°) et le sable (45°) sont issues de retours d'expérience mais peuvent faire l'objet d'ajustements selon la connaissance locale des matériaux. Pour des matériaux limoneux, on pourra retenir également la valeur de 28°. Dans le cas d'un vide de 10 cm (fracture servant de point d'absorption) situé à la base :

- d'une couverture argileuse de 4 m d'épaisseur, le diamètre est d'environ 3 m ($0,1 + 2 \times 4 \times \tan(20^\circ)$)
- d'une couverture sableuse de 4 m d'épaisseur, le diamètre est d'environ 8 m ($0,1 + 2 \times 4 \times \tan(45^\circ)$)



Effet sablier théorique dans deux types de couverture (argile cohésive / sable non cohésif)

NB1 : Dans le cas de sollicitations exceptionnelles, telles que des inondations, les désordres ont tendance à être plus volumineux, ce qui peut s'expliquer non seulement par un soutirage plus important (gradient hydraulique modifié), mais aussi par un effet sablier accéléré du fait des écoulements (érosion).

NB2 : L'évolution à très long terme (plusieurs centaines d'années) du cratère d'effondrement (par exemple la formation d'une large dépression topographique de type doline/fosse au droit d'anciens effondrements), peut être abordée dans le cadre de la connaissance et de la compréhension des phénomènes mais n'a pas vocation à être traduite pour l'évaluation de l'intensité de l'effondrement.

4.5. Évaluation finale de l'aléa

L'aléa est obtenu, pour chaque zone homogène et par processus, en croisant la prédisposition et l'intensité (cf figure 57).

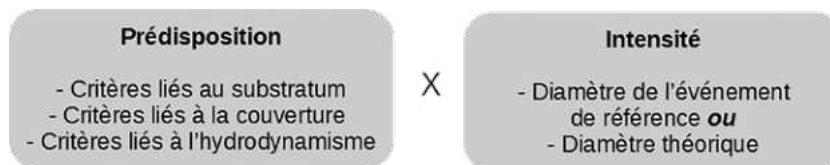


Figure 57 : Aléa – Principe général de la démarche

L'aléa obtenu est ensuite classé par niveaux : faible, moyen, fort, très fort (selon le modèle des autres guides traitant des risques naturels). Des ajustements sur le nombre de classes et leur dénomination sont possibles.

Ces classes découlent d'une matrice de croisement, dans laquelle le niveau d'aléa s'accroît avec les niveaux d'intensité et de prédisposition. Le tableau proposé (cf. figure 58) est homogène, c'est-à-dire qu'il ne privilégie pas l'intensité ou la prédisposition dans le croisement pour déterminer le niveau d'aléa.

ALEA		PRÉDISPOSITION			
		Très faible à Faible	Moyenne	Forte	Très forte
INTENSITÉ	Limitée	Faible	Moyen	Moyen à Fort	Fort
	Modérée	Moyen	Moyen à Fort	Fort	Fort à très fort
	Élevée	Moyen à Fort	Fort	Fort à très fort	Très fort

Figure 58 : Aléa – Matrice de croisement

Une carte d'aléa unique est ainsi proposée; elle traduit l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique en s'appuyant sur l'analyse multi-aléa décrite au paragraphe 4-1-3.

5.

Conclusion

Les instabilités souterraines en contexte karstique sont susceptibles de générer des mouvements de terrain pouvant remettre en cause la sécurité des enjeux en surface. Ces phénomènes sont complexes à prédire car les processus sont variés et rarement accessibles à une observation directe. Afin de mieux appréhender cet aléa, le BRGM et le Cerema ont mutualisé leurs expériences respectives en proposant une méthodologie d'évaluation et de cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique.

Cette méthodologie est avant tout dédiée à des études communales à pluricommunales, avec des rendus à l'échelle 1/10 000 ou, dans le meilleur des cas, au 1/5 000, de type PPR ou porter à connaissance. En fonction des attentes du donneur d'ordre et des moyens disponibles, elle peut aussi être plus précise, à l'échelle du site, voire de la parcelle (diagnostic ponctuel) ou de l'infrastructure de transport (itinéraire de risque par exemple).

La mise en œuvre de cette méthodologie nécessite en premier lieu de comprendre les phénomènes géologiques et géomécaniques en jeu. Tous sont avant tout liés à la karstification naturelle des roches carbonatées : le **Chapitre 2** du guide offre un aperçu de cette genèse, de l'organisation et du fonctionnement des systèmes karstiques. Les désordres survenant en surface sont essentiellement des effondrements et des affaissements mais aussi, pour un contexte particulier, des glissements et coulées de boue. Les processus qui en sont à l'origine sont : la suffosion/soutirage, le débouillage, l'extrusion et la rupture du toit. Le **Chapitre 3** décrit ensuite ces désordres et les quatre processus associés. Le **Chapitre 4** développe enfin la méthodologie proposée. Il s'agit en premier lieu de caractériser aussi précisément que possible le milieu étudié : une liste des sources à interroger et des données à acquérir est proposée. Comme pour tout aléa naturel, certaines données seront parfois rares ou incertaines, ce qui imposera des choix (à argumenter dans l'étude). Le résultat de cette caractérisation est présenté sous la forme d'une cartographie informative. Sur cette base, l'évaluation de l'aléa suit le croisement classique entre la prédisposition et l'intensité des désordres attendus. L'obtention de la prédisposition suit une méthode multicritère : elle prend en compte tous les critères *a priori* responsables des instabilités. Les dix critères proposés sont répartis en trois pôles : la sensibilité du substratum carbonaté, le comportement de la couverture et le rôle de l'hydrodynamisme. La détermination de l'intensité peut se faire de manière multicritère mais l'expérience montre que cela n'est pas toujours satisfaisant ; la prise en compte des événements historiquement connus peut s'avérer plus pertinente/aisée à mettre en œuvre (spécifique à chaque zone homogène). Cette démarche (prédisposition x intensité = aléa) est à réaliser pour chacun des processus pouvant se produire sur la zone étudiée. Pour être facilement lisible, le résultat final doit proposer une simplification, avec par exemple une unique carte d'aléa.

Avec ce guide, donneurs d'ordres et prestataires (bureaux d'études spécialisés) disposent dorénavant de clés de compréhension et d'une méthodologie permettant de cartographier cet aléa mouvements de terrain à l'échelle des territoires. Cette méthode peut également contribuer à définir des solutions de réduction de la vulnérabilité des enjeux en adaptant des mesures de traitement et de sécurisation aux critères d'instabilité caractérisés.

6.

Glossaire

La plupart des termes scientifiques utilisés dans ce guide sont définis au fil du texte, à l'exception des termes suivants (signalés par une * dans le texte). Le lecteur pourra également consulter les lexiques existants sur le sujet (Waters, 2002).

Allochtone et autochtone

Les formations géologiques superficielles (affleurantes à subaffleurantes) dont la genèse ou les propriétés actuelles résultent de processus supergènes (interaction entre la lithosphère et l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère) sont classées suivant leur localisation par rapport à leur situation initiale. On distingue ainsi :

- les formations autochtones, issues de processus d'altération supergènes (terrains meubles ou consolidés), situés dans la frange supérieure de l'écorce terrestre (200 premiers mètres) ;
- les formations allochtones, qui regroupent l'ensemble des dépôts sédimentaires issus de processus de remaniement et de transport et n'ayant pas subi de diagenèse d'enfouissement.

Doline

Dépression fermée d'origine karstique, de dimensions métriques à hectométriques. Au fond, les pentes du remplissage sont généralement orientées vers le ou les points de disparition des eaux. Dans la littérature anglo-saxonne, deux vocables sont utilisés en fonction du type d'étude : « doline » (géomorphologie) et « sinkhole » (géotechnique, ingénierie). Les types de doline peuvent être classés selon des critères morphologiques (doline en entonnoir, en cuvette, en baquet, à fond plat, etc.) ou génétiques (doline de dissolution, d'effondrement, de soutirage, etc.).

Émergence

Sortie d'eau. Plusieurs type d'émergences existent en domaine karstique. Les définitions varient suivant les sources consultées. On peut retenir ici qu'une exurgence est l'exutoire d'écoulements souterrains sans distinction d'origine pour les eaux considérées, alors qu'une résurgence implique une alimentation au moins partielle par un cours d'eau (de surface). Un puits artésien consiste en une exurgence jaillissant de manière plus ou moins haute car sous pression. Exemples : Le Bouillon, source du Loiret, est une résurgence partielle de la Loire ; idem pour la Loue vis-à-vis du Doubs ; la fontaine du Vaucluse est la plus importante exurgence de France ; etc.

Exutoire

Ouverture ou conduit permettant de collecter et d'évacuer des eaux.

Foisonnement

Capacité d'un sol ou d'une roche à augmenter de volume lors du déplacement du matériau (exemple d'un effondrement).

Gouffre

Puits s'ouvrant en surface ou cavité pénétrable débutant par un orifice vertical.

Grotte

Cavité pénétrable débutant par un conduit à la pente peu marquée.

Lapiaz

Surface rocheuse parcourue de rigoles de dissolution plus ou moins marquées (aussi appelé lapiés, lapiiez).

Niveau de base

De façon schématique, surface théorique qui répartit au-dessus principalement l'érosion et en dessous principalement le transport et le dépôt. Pour le système karstique, en fonction de l'échelle : pour certains : exutoire ; pour d'autres : toit de la zone noyée / niveau altimétrique de la zone de restitution.

Ouvala

Terme d'origine slave désignant une vaste dépression résultant de la coalescence de plusieurs dolines.

Perte

Enfouissement d'une circulation d'eau de surface et, par extension, lieu où se produit cet enfouissement.

Poljé

Terme d'origine slave décrivant une vaste dépression à fond plat, généralement large de quelques centaines de mètres et longue de plusieurs kilomètres, souvent parcourue par une rivière se perdant dans une perte (ponor).

Reculée

Échancrure prononcée dans un plateau calcaire constituant une vallée en cul-de-sac aux parois abruptes.

Relief ruiniforme

Relief ayant un aspect de ruine suite à l'altération de l'encaissant rocheux.

Spéléogénèse

Le processus de formation des cavités souterraines (grottes, avens, gouffres, abris sous roche), pénétrables ou non par l'homme et plus spécifiquement l'étude de la formation de ces cavités.

Vallée sèche

Vallée abandonnée par la circulation d'eau qui l'a creusée.

7.

Bibliographie

La plupart des références sont disponibles en version numérique sur les sites Internet des organismes cités (BRGM, Cerema, INERIS, etc.) ou via les moteurs de recherche habituels ou scientifiques.

7.1. Références sur les mouvements de terrain, les cavités et les risques associés

- Cerema (2017). *La gestion du risque cavités souterraines – Guide à l'usage des collectivités*.
- Cerema (2015). *Photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines*.
- Ineris, Cerema (2019). Guide. Aléa versant rocheux sous-cavés - Caractérisation et évaluation. INERIS 17-164712-08773A
- Cerema (2021). *Méthodes de reconnaissances des cavités. Synthèse des connaissances actuelles*.
- Géodéris (2012). *Guide pratique pour l'homogénéisation des études détaillées des aléas miniers – Volet « effondrement localisé »*. Rapport N2012/010DE – 12NAT2210. 64 pages
- IFSTAR (2014). *Guide technique – Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées*.
- Ineris, Cerema (2018). Guide - *Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol – Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement*. Ineris 17-164710-03375A
- LCPC (2000). *Guide technique pour la caractérisation et la cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*.
- LCPC (2004). *Guide technique « Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques »*.
- LCPC (1999). *Guide technique « Utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des PPR liés aux Mvt »*.
- LCPC (2002). *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines – Guide technique*. Collection Environnement Risques naturels, 130 pages.
- Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement & Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1999). *Plan de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrain – Guide Méthodologique*.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2012). *Guide méthodologique – Plan de Prévention des Risques Naturels – Cavités souterraines abandonnées*.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2016). *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) - Guide général*. 179 pages.
- Sesil Can, Leconte Steve, Vanoudheusden Emilie (2022) – *Réalisation d'une cartographie nationale de susceptibilité de présence de cavité*. Rapport final V0. BRGM/RP-72581 -FR.

7.2. Références sur le karst et les risques associés

- Audra P. (Dir.) 2010. *Grottes et karsts de France*. Association française de karstologie. Karstologia Mémoires 19 : 360 p.
- Audra, P., Palmer, A.N., (2013). *The vertical dimension of karst: controls of vertical cave pattern*. In: J.E.i.c. Shroder, A.E. Frumkin (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, 186- 206.
- Audra, P., D'Antoni-Nobécourt, J. C., Bigot, J. Y., (2010). *Hypogenic caves in France. Speleogenesis and morphology of the cave systems*. Bulletin De La Societe Geologique De France, 181(4), 327-335.
- BRGM (1998). *Mission française de retour d'expérience à Sarno (Italie)*. Rapp. BRGM, R 40235, 44 p., 12 fig., 3 tabl., 7 photos.
- Bruxelles, L., Quinif, Y., Wienin, M., (2009). *How can ghost rocks help in karst development?*, International Congress of Speleology, Kerrville, pp. 814-818.
- Camus, H. (2003). *Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole : Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats* (Doctoral dissertation, Bordeaux 3).
- Combes, P.J., (1998). *Geologic and paleomorphological observations of the Neogene and the Pleistocene of the Parnass Zone (Greece); application to the exploration for and exploitation of bauxites*. Acta Carsologica, 41(4), 401-411.
- Cornet, J., Lelong, F. (2006). Bourgogne. In : J.C. Roux (Editor), *Aquifères et eaux souterraines en France*, Éditions BRGM et CFH-AIH, Orléans, pp. 309-314.
- Courrèges, M., (1997). *Le Crypto-karst de la péninsule du Médoc : crypto-alteration, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire*. Quaternaire, 8(2-3), 289-304
- Dandurand, G. (2011). *Cavités et remplissages de la nappe karstique de Charente (bassin de la Touvre, La Rochefoucauld)*. Spéléogénèse par fantômisat[i]on, archives pléistocène et holocène, rôle de l'effet de site (Doctoral dissertation, université Michel de Montaigne-Bordeaux III).
- Dörfli N., Plagnes V. (2009) : *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa*. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin ; BRGM RP- 57527-FR, 105pp., 55 ill., 4 ann.
- Dreybrodt, W., Siemers, J., (2000). *Cave evolution on twodimensional networks of primary fractures in limestone*. In: A. Klimchouk, D.C. Ford, A.N. Palmer, W. Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis : Evolution of karst aquifers*. Nat. Speleol. Soc., Huntsville, Alabama, USA.
- Dubois C., Lans, B., Kaufmann O., Maire R., Quinif Y. (2011) - *Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France) : Implications en karstogénèse et morphologie karstique*. Karstologia, 57, 19-27.
- Dubois, C., Quinif, Y., Baele, J.M., Barriquand, L., Bini, A., Bruxelles, L., Dandurand, G., Havron, C., Kaufmann, O., Lans, B., Maire, R., Martin, J., Rodet, J., Rowberry, M.D., Tognini, P., Vergari, A., (2014). *The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems*. Earth-Science Reviews, 131, 116-148.
- Dupuis, C., (1992). *Mesozoic kaolinised giant regoliths and Neogene halloysitic cryptokarst: two striking paleoweathering types in Belgium*. In: M. Schmitt, Q. Gall (Eds.), *Mineralogical and geochemical records of paleoweathering*. Mem. Sci. de la Terre. ENSMP, pp. 61-68.
- Filipponi M., Parriaux A., Schmassmann S., Jeannin P.-Y. (2012) : *KarstALEA : Instructions pratiques pour la prévision des dangers liés au karst lors de travaux souterrains*.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1989). *Karst geomorphology and hydrology* (Vol. 601). London : Unwin Hyman.
- Ford, D.C. & Williams, P.W. (2007) - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons., Chichester. DOI : 10.1002/9781118684986
- Gilli, E. (1984). *Recherches sur le creusement et la stabilité des grands volumes karstiques souterrains*. Université de Provence Aix, Marseille, Laboratoire de Géologie appliquée.

- Gombert P, 1997. *Quantification du rôle des paramètres climatiques dans la dissolution karstique*. CRAS, 324/IIa : 17-23.
- Gombert, P., Orsat, J., Mathon, D., Alboresha R., Al Heib M., Deck O. (2014) – *Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val D'Orléans (France)*. Bull Eng Geol Environ 74, 125–140.
- Gombert Ph., Colette A., Malherbe L. (2019). *Rôle des paramètres hydroclimatiques dans l'occurrence de fontis dans le Val d'Orléans (Loiret) et essai de projection dans le cadre du changement climatique attendu*. Rapport INERIS référence DRS-19-179206-03140A. 84 p.
- Jaillet S. (2005). *Le Barrois et son karst couvert*. Karstologia mémoires n°12 : 335 p.
- Jaillet S. (2010). *Des karsts sans affleurement calcaire : les karsts sous couverture*. In : Audra P. (Eds), Grottes & Karsts de France. Karstologia Mémoire, 48-49.
- Jouves J. (2018) - *Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques : de la karstologie aux modèles numériques 3D*. Thèse de doctorat, Univ. Aix-Marseille, 256pp.
- Klimchouk, A., & Ford, D. (2000). 3.1. *Types of karst and evolution of hydrogeologic setting. Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: National Speleological Society, 47-53.
- Klimchouk A.B. (2013) - *Hypogene Speleogenesis*. In: J.E.i.c. Shroder, A.E. Frumkin (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, pp. 220-240.
- Mangin, A., (1975). *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. PhD, Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique, Annales de Spéléologie 49 pp.
- Nicod, J., (1975). *Corrosion de type crypto-karstique dans les karsts méditerranéens*. Bull. Assos. Géog. Fr., 428, 284-297.
- Nicod J. (1995). Carte géomorphologique des karsts de France. Notice d'une maquette au 1/3 000 000 environ. In: *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, n°25, 1^{er} semestre 1995. Carte en couleurs des karsts de France à l'intérieur. pp. 21-34.
- Nicod J., Maire R., Salomon J.N., (2010). *Panorama des Karsts de France : types et répartition*. In : Audra P. (Eds), Grottes & Karsts de France. Karstologia Mémoire, 144-147.
- Noury G., Perrin Je, Gourdièr S., Raucoules D., avec la collaboration de : Dewez T., Masson F., Greffé C., Negulescu C., Peter M., Langlois D., Munerot J., Cantaloube O., Mathon D., Ksibi I., Dejardin S., Eugène S. (2017) – *Retour d'expérience sur les mouvements de terrains liés à des cavités survenues dans le Loiret suite à la crise météo du printemps 2016*. Rapport final. BRGM/RP-66462-FR, 317 p., 107 fig., 6 ann.
- Palmer, A.N., (1991). *Origin and morphology of limestone caves*. *Geological Society of America Bulletin*, 103(1), 1-21.
- Palmer, A. N., Palmer, M.V., (2000). *Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico*. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62(2), 91-108.
- Perrin Je., Noury G. (2015) – *Évaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique. Phase 1 : bibliographie et retours d'expérience*. Rapport final. BRGM/RP-65280-FR, 52 p., 29 ill., 4 ann.
- Perrin J., Noury G. avec la collaboration de Rzycka E. (2016) - *Évaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique. Phase 2 : Retours d'expérience, conceptualisation, recommandations*. Rapport final. BRGM/RP-66446-FR, 96 p., 48 ill., 3 ann.
- Quinif, Y., (1999). *Fantômisations, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification*. Actes du colloque européen Karst 99, pp. 159-164.
- Quinif, Y., Bruxelles, L., (2011). *L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification*. *Géomorphologie*, 17(4).
- Renault, P., (1970). *La formation des cavernes*. coll. « Que sais-je ? », 1400. Armand Colin, Paris.
- Rodet J. (1992). *La craie et ses karsts*. Cnek et Groupe Manche, CNRS, Caen : 560 p.
- Sablons D. *Relief karstique*. Archives Larousse. Encyclopédie en ligne.

- Salomon, J.N., Pomel, S., Nicod, J., (1995). *L'évolution des cryptokarsts : comparaison entre le Périgord-Quercy (France) et le Franken Alb (Allemagne)*. Zeitschrift für Geomorphologie, 39(381-409).
- Sowers G. F. (1996). *Building on sinkholes*. ASCE Press, New York.
- Treffot M, 2015. *Analyse et modélisation des facteurs de prédisposition à l'effondrement karstique des terrains du Val d'Orléans*. Rapport de stage de Master 2, université de Strasbourg.
- Vergari, A., Quinif, Y., (1997). *Les paléokarsts du Hainaut (Belgique)*. Geodinamica acta, 10(4), 175-187.
- Waltham A.C. & Fookes P.G. (2003). *Engineering classification of karst ground conditions*. Quarterly Journal Engineering Geology Hydrogeology, **36**, 101-118.
- Waltham T., Bell F., Culshaw M. (2005). *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*.
- Waters, K. (2002). *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*. Environmental Protection.

7.3. Références antérieures du groupe de travail

Rapports annuels d'avancement d'élaboration du présent guide (par ordre chronologique) :

- Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Van Laere A. (2013), *ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques*. Année 1 : bibliographie et étude de sites - Rapport BRGM/RP-62595-FR
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C. (2014a). *ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire*. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. (2014 b). *ALEA-Karst : vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire*. Volume 2 : étude de sites - Rapport BRGM/RP-63771-FR, 119 p.
- Perrin, J., Cartannaz, C., Noury, G., & Vanoudheusden, E. (2015). *A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis*. Engineering Geology, 197, 296-305.
- Perrin J., Noury G., Azémard P., Clément F., Mathon D., Haussard S., Respaud C., Védie E., Zergaoui N. (2016), *Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique*. Rapport BRGM/RP-66508-FR.
- Noury G., Husson E., Azémard P., Clément F., Mathon D., Dore L., Haussard S., Respaud C., Védie E., (2018), *Elaboration d'une trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique*. Rapport BRGM/RP-68269-FR, 122 pages.
- Noury G., Husson E., Azémard P., Clément F., Mathon D., Dore L., Haussard S., Respaud C., Védie E., (2019), *Elaboration d'une trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique – Action 2018*. Rapport BRGM/RP-68828-FR, 28 pages.
- Védie E., Clément F., Respaud R. (2017). *Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa « mouvement de terrain d'origine karstique (contexte calcaire) »* - Rapport d'avancement n°1 (C16NR0086-Affaire 14.75.G465)
- Védie E., Clément F., Respaud R. (2018). *Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa « mouvement de terrain d'origine karstique (contexte calcaire) : cas du site-test de Fontirou (47) »* - Rapport d'avancement n°2 (C17NR0206-Affaire 14.75.G551)

Quelques études de cas du Groupe de Travail

- Clément F., Flouest N., Dubreucq T. (2008) - Caractérisation du risque karstique sur l'ouvrage d'art non courant de la Tardoire - RN 141. Dossier Cerema n° 14.16.G022

- Clément F., Flouest N., Berche V. (2012) - Conception des fondations de bâtiments sur des cavités développées dans les roches carbonatées du bassin aquitain - Document d'information et de sensibilisation aux risques karstiques. Dossier Cerema n°14.33.G188
- Clément F. (2012) - Caractérisation des paramètres mécaniques et géochimiques par instrumentation et télémétrie d'un système karstique. Dossier Cerema n°14.75.G284
- Clément F., Respaud C. (2013) - Élaboration d'une carte d'information sur les mouvements de terrain liés à la présence de cavités karstiques à Chasseneuil-sur-Bonnieure. Rapport Cerema ISRN : EQ-CT33-13-195-FR
- Clément F., Gardet S., Nedelec Y. (2014) - Vulgarisation du rôle des circulations d'eaux superficielles et souterraines dans l'apparition de mouvements de terrain d'origine karstique. Dreal Aquitaine. Dossier Cerema 14.33.G1888a
- Respaud C. Flouest N. (2014) - Caractérisation de l'aléa mouvement de terrain, y compris karstique sur la commune de Pont-du-Casse (47). Dossier Cerema n°14.47.G256
- Clément F., Respaud C. (2014) - Elaboration d'une carte informative mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines - Cavité de Camelot. ISRN : EQ-CT33-14-69-FR
- Clément F., Valdeyron G. (2015) - Analyse de la stabilité de la cavité de la Fuie à Chasseneuil-sur-Bonnieure. Opération nationale PRECAS RP3 S 12004. Dossier Cerema n° 14.75.G284D
- Clément F., Valdeyron G.(2016) - Traitement des zones karstiques de la RN 21 - Projet d'aménagement d'itinéraire thématique. Rapport Cerema
- Clément F., Valdeyron G. (2016) - Cavité de Camelot (16) - Méthode de reconnaissance superficielles et profondes d'une cavité karstique de grande ampleur. Opération nationale PRECAS. Dossier Cerema n° 14.75.G465
- Clément F., Valdeyron G. (2017) - Etude géotechnique projet sur la RN 21 à Agen/Villeneuve sur Lot - Dispositions particulières vis à vis du risque karstique. Dreal Nouvelle-Aquitaine. Rapport Cerema
- Garnier C. et Bourbon P. (2021) - Appui scientifique et technique au Département des Landes. Evaluation des risques d'effondrement de terrain au droit de la RD932N à Roquefort (40). BRGM/RP-71039-FR, 47 p., 32 ill., 3 ann.
- Haussard S. et Zergaoui N. (2014). Carte d'Aléa karstique de la commune de Bonnevent-Velloreille (70) - DDT de la Haute-Saône. Rapport Cerema.
- Haussard S. et Zergaoui N. (2014). Carte d'Aléa karstique de la commune de Cordonnet (70) - DDT de la Haute-Saône. Rapport Cerema.
- Haussard S. et Zergaoui N. (2015). Carte d'aléa karstique de la commune de Saint-Vit (25) - DDT du Doubs. Rapport Cerema.
- Jacob T., Yart S., Closset L., Ardito L., Masson F. (2021) – Recherche de cavité par couplage de microgravimétrie et scan laser 3D au droit de l'église Notre-Dame de Montmorillon (86), BRGM/RP-70958-FR, 63 p.,18 ill., 3 tab., 3 ann.
- Mathon D., Dore L., Boschel R. (2017). Aléa karstique dans le Val de Bou. DDT du Loiret. Rapport Cerema C17RB0016
- Mathon D. (2016). Quartier Favignolles à Romorantin : Effondrements de surface et étude hydrogéologique de synthèse. DDT du loir-et-Cher. Rapport Cerema C15RB0128.
- Myr C. (2021) – Avis et recommandations du BRGM à la suite d'un effondrement survenu sur la commune du Petit-Quevilly (76). Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-71196-FR. 27 p., 11 ill., 2 ann.
- Noury G. (2019) - Synthèse des connaissances et évaluation préliminaire des risques de mouvements de terrain d'origine karstique sur le site du CNRS d'Orléans (45) Rapport d'expertise. BRGM/RC-68057-FR, 48 p., 33 fig.
- Noury G., Buscarlet E., Jacob T., Baltassat J.M., Kessouri P., Coppo N., Salquèbre D., Boularas S. avec la collaboration de Asfirane-Haddadj F., Maurice B., Ardito L., Deparis J., Smal F. (2020) – Projet de franchissement de la Loire à Jargeau, aléas géologiques liés au karst – Rapport final. BRGM/RP-69472-FR, 218 p., 110 fig., dont 4 Ann., avec 3 planches hors texte.

Noury G., en collaboration avec Dugrillon D. (2020) – Avis complémentaire concernant le diagnostic géologique et les travaux prévus à l'église Saint-Sulpice à Charroux (86) - BRGM/RP-69820-FR, 20 p., 8 fig., 2 ann.

Noury G. (2021) – Demande d'autorisation environnementale d'un projet de plateforme logistique à Gidy (45) - Avis sur la prise en compte des risques karstiques – BRGM/RP-70889-FR, 27 p., 11 fig., 2 ann.

Noury G., Gutierrez A., Masson F. (2021) – Etude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève. 1. Inventaire et analyse des indices karstiques.. Rapport BRGM/RP-71330-FR. Version 0, 91 p.1 carte, 3 annexes

Vallet A., G. Noury (2021) – Diagnostic de risques sur une partie de la grotte de la Crétagne (Côte d'Or). Rapport d'expertise. Rapport BRGM/ RP-70570-FR. 31 p., 9 ill., 4 ann.

Yart S. (2020) – Cavité de la Baume des Charnaux, commune de Reugney (25). Évaluation des risques d'effondrement pour la route départementale n°32. Rapport final. BRGM/RP-69519-FR, 35 p., 18 ill., 2 tabl., 1 ann.

7.4. Exemple d'études de cas s'inspirant de la présente méthodologie

Abad J., Husson E., Louart J., Noury G., Martin A. (2018) – *Étude des phénomènes d'effondrements karstiques et évaluation de l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique dans la Communauté d'Agglomération Maubeuge-Val de Sambre* (59). Rapport final. BRGM/RP-68045-FR, 90 p., 37 fig., 3 ann., 5 cartes.

Clément F., Haussard S., Védie E. (2018) - *Analyse des enjeux communaux et étude du risque Karstique sur les communes de Rivières et Saint-Projet*. Dossier n° 14.16.G452

Clément F., Valdeyron G. (2020) - RN 141 - *Chasseneuil Roumazières - Étude géotechnique projet du tracé et des OA et problématique karstique*. Dossier n° 14.16.G487

Clément F., Védie E., Respaud C., Valdeyron G. (2021) - *Déviations du Taillan-Médoc (33) - Assistance technique «gestion de la problématique karstique» (caractérisation du risque et mesures de sécurisation géotechnique)*. Dossier n° 14.33.G701

Noury G. (2021) – *Orléans, avenue Gaston Galloux –mouvements de terrain d'origine karstique : évaluation de l'aléa, pistes pour l'amélioration des connaissances et éléments pour la gestion de crise*. Rapport final. BRGM/RP-70463-FR, 154 p., 45 fig., 3 ann.

Vallet A., Noury G., Rabin M., Husson E. (2019) – *Cartographie des aléas effondrement/ affaissement lié au karst, glissement de terrain et chute de blocs sur la commune de Belfort (90)*. Rapport final. BRGM/ RP-69009-FR, 200 p., 66 ill., 8 ann., 1 USB.

Vallet A., Beltramo M., Noury G., Husson E. (2021) – *Cartographie de l'aléa effondrement/ affaissement karstique sur les communes de Boulot et Etuz (Haute-Saône)*. Rapport final. BRGM/ RP-71205-FR, 151 p.

Vignerot B. (2018) – *Cartographie de l'Aléa Affaissement - Effondrement de cavités souterraines sur la commune de Nîmes (Gard)*. Rapport final. BRGM/RP-67858-FR, 60 p., 24 ill., 2 ann. 2 cartes hors texte.

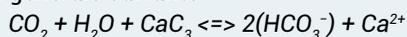
8.

Annexes

8.1. Compléments sur les systèmes karstiques

8.1.1. Compléments sur la dissolution

Dans les roches carbonatées comme les calcaires (constitués essentiellement de CaCO_3) et les dolomies ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) les systèmes karstiques se développent par dissolution de la roche encaissante. Le processus de dissolution « classique » des systèmes carbonatés (ici la calcite), est représenté par l'équation générale suivante :



L'eau enrichie en CO_2 s'infiltré au travers des discontinuités et dissout rapidement les roches encaissantes carbonatées, jusqu'à atteindre une quasi-saturation en carbonate dissous (60 à 90 % dans la zone d'infiltration). Au-delà de ce point, l'eau ne parvient pas à saturation complète et reste sous-saturée, la karstification est alors très lente. Lors de la dissolution, le carbonate de calcium CaCO_3 est solubilisé par les eaux acides (acide carbonique H_2CO_3^*) en bicarbonate de calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ qui est évacué par l'eau circulant dans le massif. Le calcium Ca^{2+} peut aussi précipiter sous la forme de spéléothèmes (concrétions calcitiques de type stalactite/stalagmite par exemple).

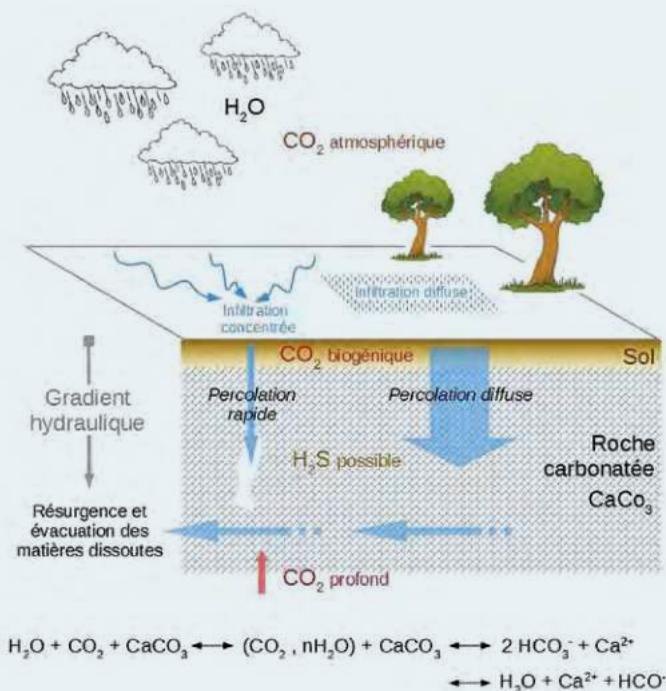


Figure 60 : Schéma de dissolution des roches carbonatées

Ainsi, l'acidité des fluides peut provenir de l'atmosphère, du sol ou de sources terrestres plus profondes. L'agressivité du fluide à l'origine de phénomènes de karstification permet de distinguer la karstification **épigène** (acidité venant de la surface) de la karstification **hypogène**, où l'acidité est profonde ou indirectement liée aux zones de recharge environnantes.

Gombert (1997) a par ailleurs montré que la vitesse de dissolution karstique pouvait être modélisée en se basant sur les caractéristiques climatiques d'une zone donnée (température et précipitations moyennes).

8.1.2. Compléments sur la karstification hypogène

Du fait de la diversité des processus, des morphologies et des structures hypogènes, la définition de la spéléogénèse hypogène a été fortement débattue. Les différentes définitions (Klimchouk & Ford, 2000 ; Palmer & Palmer, 2000 ; Ford & Williams, 2007) s'accordent néanmoins sur des circulations profondes remontantes, indépendantes de l'influence de la recharge de surface, et ayant acquis leur agressivité en profondeur (CO_2 , H_2S) indépendamment du CO_2 de surface ou du sol (Palmer & Palmer, 2000). Ainsi, par opposition à la karstification épigène, la karstification hypogène concerne tous les processus de dissolution qui impliquent un fluide dont l'acidité ne vient pas directement de la surface.

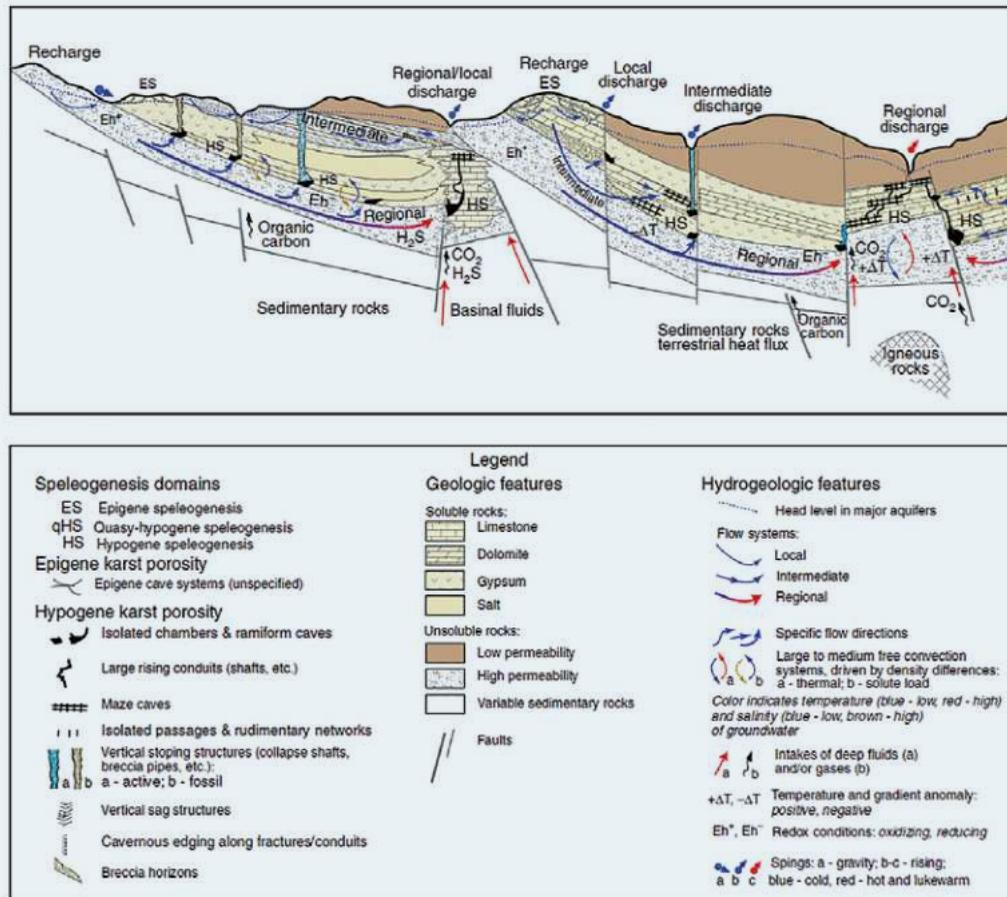
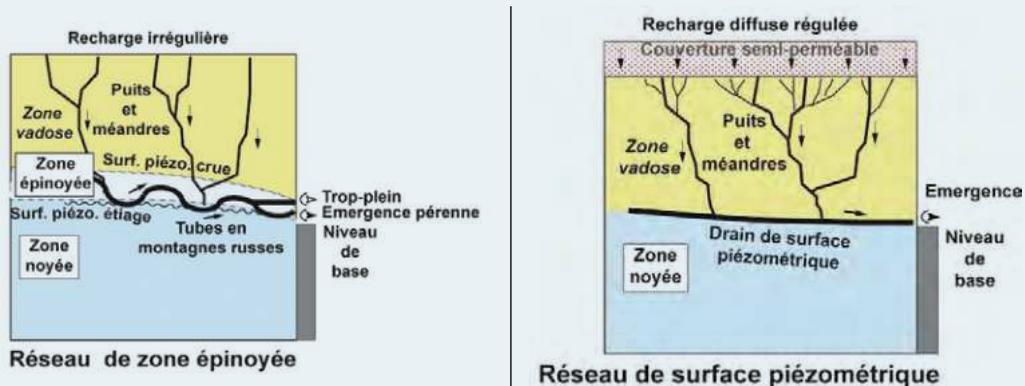


Figure 61 : Schéma de contextes spéléogénétiques hypogènes (Klimchouk, 2013).

Ces fluides peuvent être de différentes origines, telles que des eaux relâchées par l'encaissement suite à l'enfouissement sédimentaire et/ou tectonique et à la compaction/déshydratation des roches, des eaux d'infiltration météorique à grande profondeur avec un temps de transit long leur permettant d'acquiescer un faciès physico-chimique spécifique, ou un mélange des deux types (cf. figure 61). La karstification hypogène s'exprime dans les zones de mélange mettant en contact des eaux d'origines différentes et donc de caractéristiques physico-chimiques différentes. Dans ces conditions, le mélange crée des déséquilibres chimiques favorables à la dissolution, en particulier en présence de teneurs différentes en CO_2 ou H_2S . Ce type de spéléogénèse ne doit pas être confondu avec les réseaux épigènes profonds tels que la fontaine de Vaucluse, qui résultent d'une variation du niveau de base de grande ampleur et dont l'hydrogéologie présente des débits en relation directe avec la recharge.

8.1.3. Compléments sur l'hydrodynamisme

Concernant l'**entrée des eaux** dans le système karstique, comme évoqué au § 2.2.2, l'infiltration peut être diffuse ou concentrée (par une perte* par exemple). Selon les cas, l'apport d'eau au système karstique est régulier ou irrégulier. Cette régulation est principalement fonction de la présence ou non d'un sol ou d'une couverture sédimentaire (résiduelle ou géologique). Ce contrôle influe sur la morphologie en surface (épikarst) ainsi que sur la morphologie dans la zone épinoyée (cf. figure 62).



Cas de la recharge irrégulière et soudaine : ces mises en charge provoquent l'engorgement de la zone épinoyée suivi de la vidange des drains, ce qui aboutit à la formation de boucles (ou « tubes en montagnes russes ») calées sur les discontinuités litho-structurales.

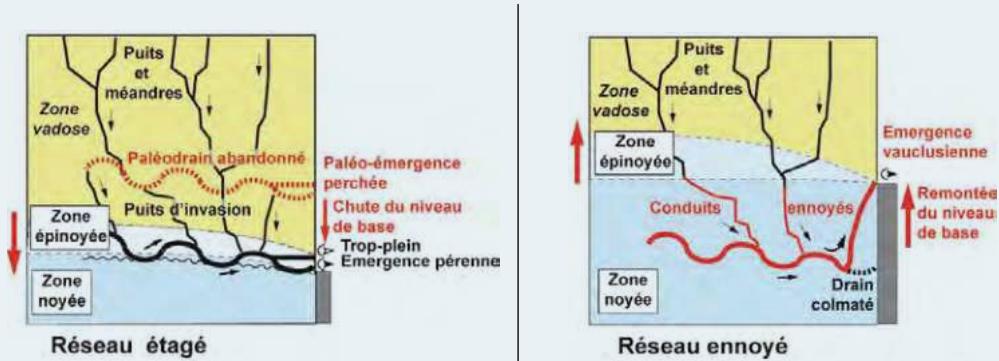
Cas de la recharge régulière : la recharge est régulée à travers une couverture peu perméable, la surface piézométrique reste stable et les drains se développent au niveau de cette surface.

Figure 62 : Contrôle de la karstification par le mode de recharge (Audra et Palmer, 2013).

Concernant la **sortie des eaux** du système karstique, comme évoqué également au § 2.2.2, ses modalités sont contrôlées par le **niveau de base**. Selon les auteurs et les thématiques abordées, le niveau de base a de multiples définitions. Il est considéré ici comme la position topographique des points de restitution (sources et résurgences). Toute variation de ce niveau affecte la piézométrie et induit une réorganisation du système (cf. figure 63) :

- si le niveau de base s'enfoncé, les conduits noyés préalablement formés sont alors abandonnés. Une telle évolution peut conduire à l'approfondissement de la zone épinoyée, à l'augmentation des gradients hydrauliques dans la zone vadose et au déjaugage local des sols ;

- à l'inverse, la remontée du niveau de base provoque l'ennoyement des niveaux supérieurs et la remontée de la zone épinoyée (vers une position plus proche de la surface). Certains conduits colmatés par des sédiments peuvent alors être évités (remaniement interne ou extrusion à l'extérieur du système).



Une chute du niveau de base provoque l'abaissement du drainage karstique. Les anciens drains sont abandonnés et restent perchés.

Une remontée du niveau de base provoque un ennoyement des conduits karstiques profonds. Les principaux restent actifs et seul l'aval du système se réadapte via un puits-cheminée aboutissant à une source « vaclusienne ».

Figure 63 : Contrôle de la karstification par changement de niveau de base (Audra et Palmer, 2013).

8.1.4. Compléments sur les types d'altération karstique

Les processus de karstification sont dominés par trois types d'altération aboutissant à des structures de drainage spécifiques : la corrosion sur roche nue, la crypto-altération et la fantô-misation (Quinif, 1999 – Dandurand, 2011).

a) La corrosion

La corrosion est un processus d'altération avec évacuation directe du matériel dissous et des résidus et qui permet d'aboutir aux formes sur roches nues, en surface ou dans l'endokarst, au contact de l'eau agressive (cf. figure 64). La corrosion constitue le processus de karstification



Cannelure de ruissellement



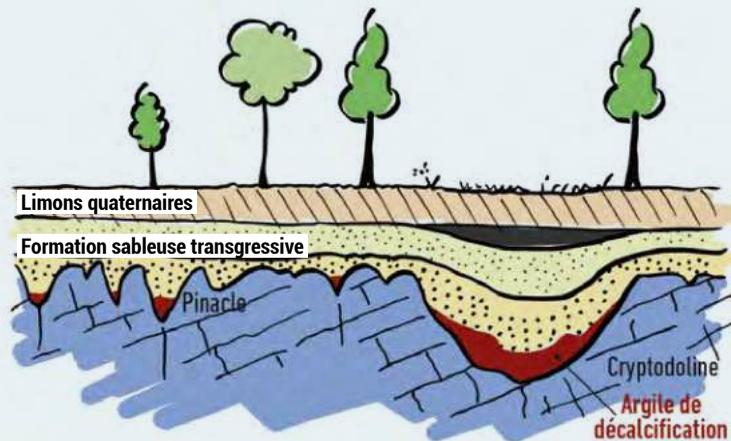
Lapiaz de montagne

Figure 64 : Exemples de formes de corrosion sur roche nue (Pyrénées espagnoles). Clichés E. Husson

le plus commun. On distingue deux types de systèmes karstiques résultant de ce processus de corrosion : les systèmes épigènes (ou gravitaires (Mangin, 1975)), formés sous l'action de l'eau météorique et d'un gradient d'écoulement entre la zone de recharge et celle de décharge, et les systèmes hypogènes, formés par des remontées d'eaux hydrothermales ou de fluides profonds (Ford & Williams, 2007 ; Audra *et al.*, 2010). Il s'agit de formes se développant à l'échelle de plusieurs dizaines de milliers d'années (Palmer, 1991 ; Dreybrodt et Siemers, 2000). Les formes en résultant se traduisent en souterrain par les cavités et réseaux karstiques, et en surface par des lapiés, des cannelures, des canyons...

b) La crypto-altération

La crypto-altération (ou cryptokarstification) correspond à l'altération du toit d'une roche karstifiable sous une couverture perméable à semi-perméable (Renault, 1970 ; Vergari et Quinif, 1997 ; Combes, 1998). Elle est rendue possible grâce à la présence d'un aquifère épidermique dans la couverture, cette dernière agissant ainsi comme une compresse humide (cf. figure 65). Cette couverture peut être d'origine pédologique, détritique ou alluviale (Nicod, 1975 ; Dupuis, 1992 ; Salomon *et al.*, 1995 ; Courrèges, 1997). L'échelle de temps pour former un karst sous couverture évolue d'une centaine de milliers d'années à plusieurs millions d'années (Quinif, 1999).



Le toit du calcaire est modelé en cryptolapiaz et cryptodoline sous la couverture perméable sableuse. L'altération du sable glauconifère a provoqué la libération du fer qui a enrichi le toit du calcaire en minéral de fer.

Figure 65 : Coupe schématisée d'un cryptokarst (Quinif & Bruxelles, 2011).

Ce phénomène génère des formes à la surface du substratum (crypto-lapiaz, crypto-dolines, pinacles, aspect ruiniforme), qui peuvent être révélées suite au déblaiement de la couverture (cf. figure 66). La dissolution du toit des carbonates entraîne par ailleurs un enfouissement progressif de la couverture non karstifiable, accentué à deux niveaux : dans les points « bas » du crypto-lapiaz et au niveau des crypto-dolines. Cette dissolution et la transformation minéralogique associée peuvent par ailleurs contribuer à la formation d'un aquifère captif au sein des carbonates et générer un écoulement lent sous couverture.

Au niveau des fractures de la roche, la dissolution peut être entretenue jusqu'à des profondeurs importantes. La crypto-altération est alors remplacée par le phénomène de « fantômisation » (cf. figure 66).



Cryptokarst sous couverture bauxitique, carrière de bauxite à Villeveyrac (34). Cliché E. Husson



Cryptokarsts dans le Sarladais (24) : Carsac, la couverture d'altérites a été évacuée (Astruc, 2010 ; cliché F. Guichard).



Aspect ruiniforme des formations calcaires du Maastrichtien à Saint-Georges-de-Didonne (17) - Cliché E. Védie



Cryptokarsts dans le Sarladais (24) : Vitrac, résultat de la crypto-corrosion sous couverture siliceuse (Astruc & Bruxelles, 2010) - Cliché F. Guichard

Figure 66 : Exemples de formes associées à la cryptokarstification

c) La fantômisation

La karstification par « fantômisation » décrit une spéléogénèse en deux phases (Dubois *et al.*, 2014 - cf. figure 67) :

- La première phase consiste en une dissolution partielle dans des conditions de faible gradient hydraulique¹⁴ et aboutit à la formation de fantômes de roche (Vergari et Quinif, 1997 ; Dubois *et al.*, 2014). Le massif fantômisé peut, au premier abord, présenter un aspect intact : la stratification, les fractures, les accidents siliceux et les fossiles sont préservés. Cependant, la roche est devenue localement très poreuse, perméable et peu cohérente. L'organisation de ces réseaux « fantômisés » suit généralement les discontinuités naturelles de la roche (fracturation, stratification), plus favorables à la karstification. L'établissement de tels systèmes nécessite de longues périodes de temps (peut-être de l'ordre de plusieurs millions d'années) et des conditions géodynamiques stables (Dubois *et al.*, 2014) ;
- dans la seconde phase, l'augmentation du gradient hydrodynamique (par surrection ou par enfouissement des vallées), voire par une action anthropique (déblaiement par exemple), aboutit à une érosion mécanique régressive et à l'évacuation de l'altérite au sein du système. Sur le réseau fantômisé préexistant se superpose un réseau épigène évacuant l'altérite. Cette phase d'évolution peut être extrêmement rapide – ramenée à quelques années seulement (Bruxelles *et al.*, 2009), voire quelques heures dans des cas exceptionnels.

¹⁴ De manière plus détaillée, les produits d'altération de cette première phase (décalcification ou dédolomitisation) sont évacués en solution, par circulation lente des eaux ou diffusion ionique, tandis que les résidus persistent. Cette phase d'altération peut être liée soit à l'infiltration épigène, soit à l'écoulement hypogène, en particulier dans les zones marginales des bassins sédimentaires par expulsion des fluides de bassin. Dans le cas d'une spéléogénèse par fantômisation épigène (*per descensum*), la présence d'une couverture contenant des minéraux siliceux, sulfureux ou sulfatés sera nécessaire à la libération d'ions H⁺ ou de H₂SO₄ pour que l'eau acquière un caractère agressif (également le cas pour des bancs de chaille dans le calcaire).

Les formes résultant de la fantômisation se traduisent typiquement en surface par des pinacles, des paysages ruiniformes, des crypto-lapiaz (cf. figure 67).

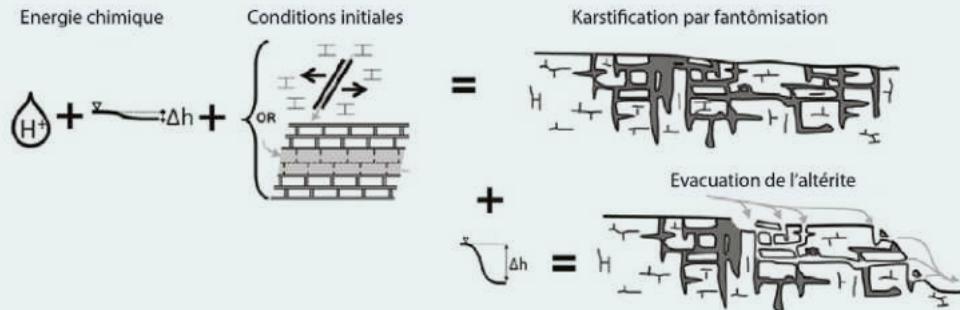
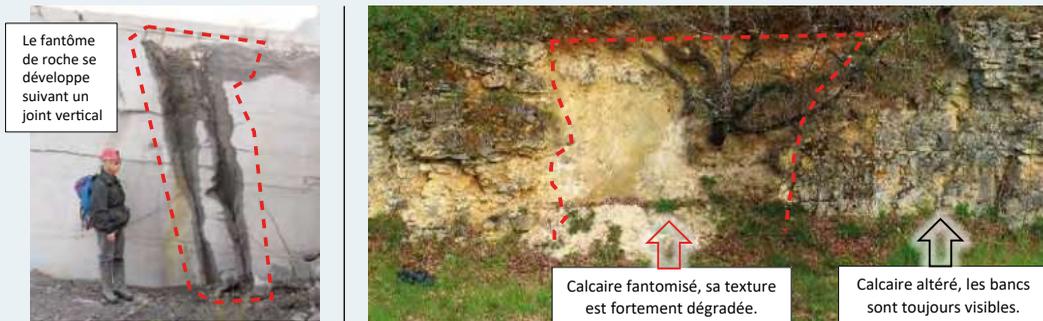


Figure 67 : Schéma de la fantômisation (Jouves, 2018, modifié d'après Dubois et al., 2014).

Ce processus requiert une quantité considérable d'énergie chimique pour dissoudre le carbonate de calcium mais très peu d'énergie hydrodynamique pour évacuer les éléments en solution et laisser l'altérite en place. Les chemins préférentiels sont les zones les plus transmissives de l'encaissant. L'altérite est évacuée ultérieurement par les écoulements si l'énergie hydraulique augmente suffisamment.



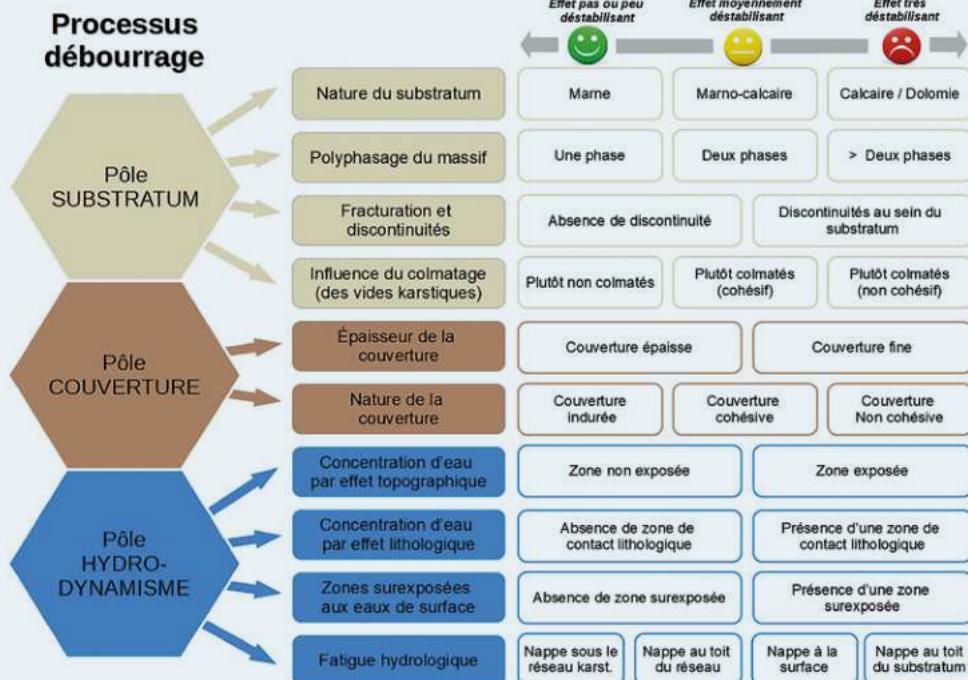
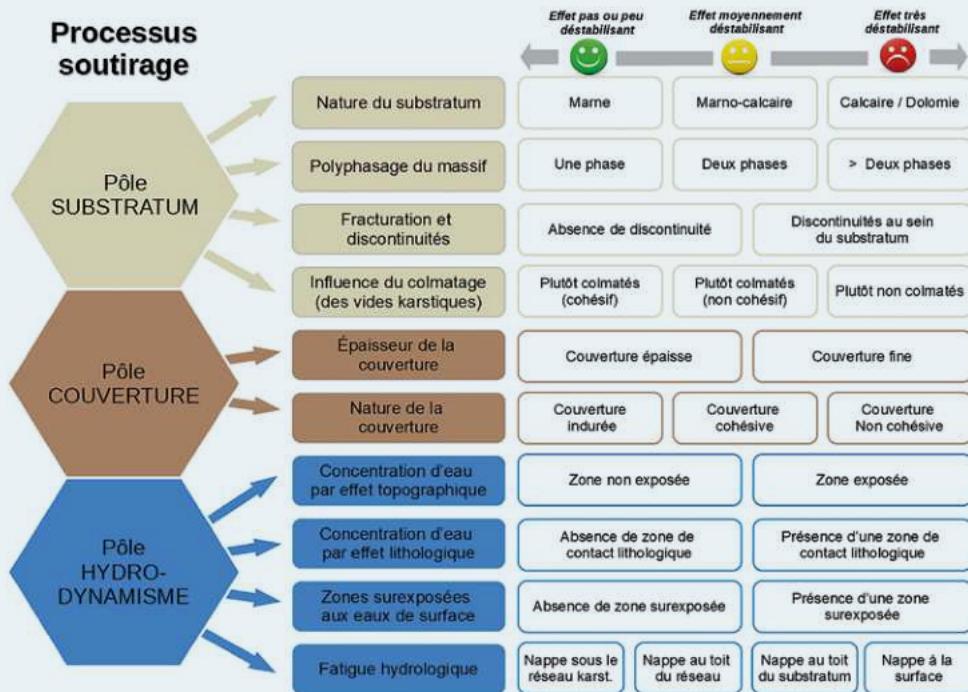
Fantôme de roche dans la carrière du Clypot (Neufvilles, Hainaut, Belgique). (Dubois et al., 2011)

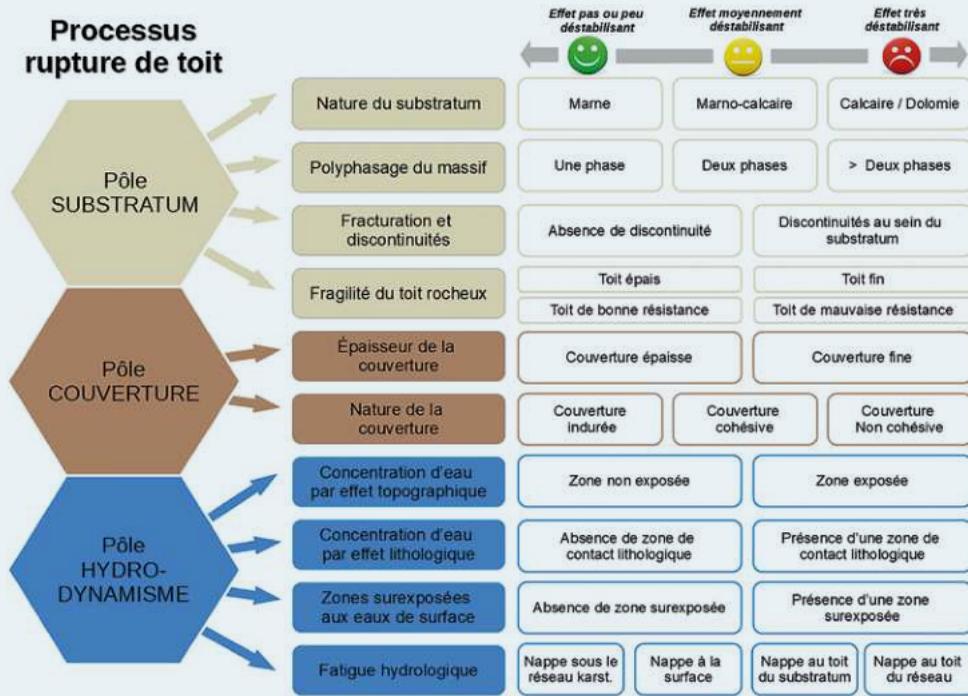
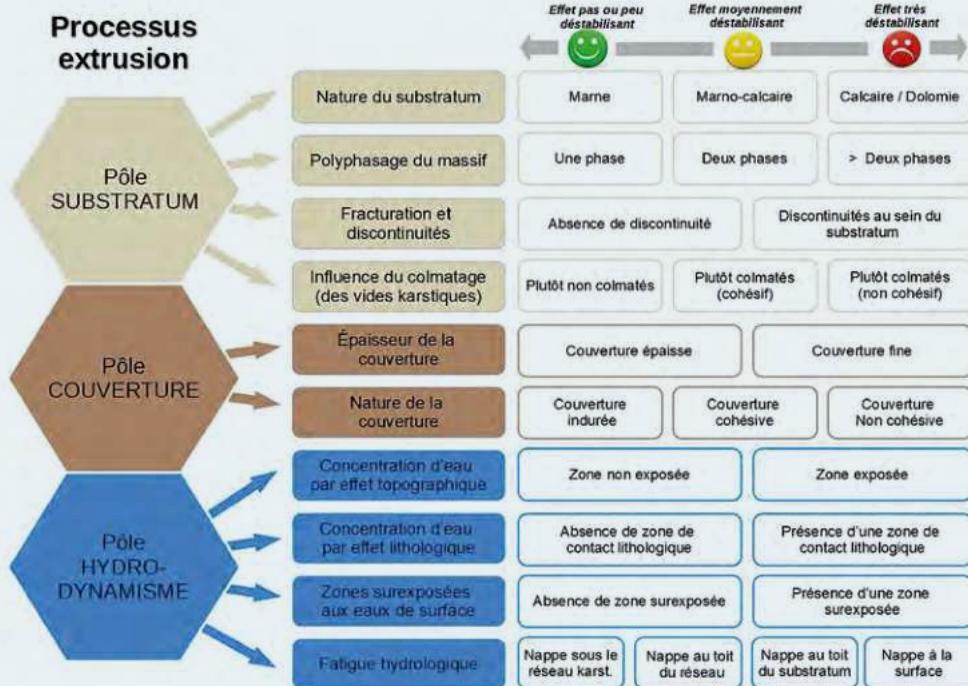
Fantôme de roche en bordure de RD29 à Cussac (24). Cliché E. Husson

Figure 68 : Exemples de formes associées à la fantômisation

8.2. Compléments pour l'évaluation de l'aléa

8.2.1. Prédiposition - Grilles d'analyse





8.2.2. Prédiposition – Cheminements

Deux cheminements sont possibles pour obtenir la prédiposition, chacun avec ses avantages et ses limites :

- le premier cheminement consiste en une **série de croisements successifs**. Cette méthode suit ce qui est classiquement proposé dans les guides techniques traitant les aléas gravitaires (ceux édités par exemple par le ministère de l'Environnement, comme les guides PPR mouvements de terrain, PPR cavités souterraines abandonnées, etc.) ;
- le second cheminement procède à une **unique combinaison qui pondère les éléments évalués**. Cette méthode est originellement issue d'autres thématiques géologiques (méthode Paprika pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques – Dörfliger et Plagnes, 2009) et est aussi utilisée pour traiter des aléas gravitaires tels que les glissements de terrain.

Quel que soit le cheminement choisi, il convient dans tous les cas que l'analyse soit faite de manière rigoureuse et critique. Le secteur d'étude doit en particulier être bien connu pour adapter au besoin les matrices (cheminement 1) ou les notations et pondérations (cheminement 2). Cela implique notamment de comparer les résultats obtenus avec la « réalité », à savoir la répartition des événements connus. Ces ajustements doivent *a priori* être marginaux pour respecter le principe général de la méthode et maintenir une homogénéité des résultats à l'échelle nationale. On cherchera enfin à procéder de manière transparente et pédagogique pour faciliter les phases de concertation (avec le commanditaire, les élus et/ou les citoyens). La présentation de l'influence des trois pôles est par exemple à prévoir.

a) Prédiposition obtenue par croisements successifs

À l'image de ce qui est classiquement proposé pour le traitement de l'aléa de la majorité des phénomènes de mouvements de terrain, des tableaux de croisement ont été conçus et testés sur plusieurs sites d'étude (cf. exemple relatif au département du Lot-et-Garonne – Annexe 8.3.1). Les tableaux de croisement proposés ci-dessous sont donnés à titre d'exemple. Les résultats matriciels proposés ont fait l'objet de discussions et de validations au sein d'un comité de spécialistes, mais peuvent être le cas échéant adaptés à la marge, pour prendre en compte un contexte spécifique ou une demande spéciale du commanditaire de l'étude.

Sensibilité du substratum

Concernant la sensibilité du substratum, elle est en premier lieu définie en prenant en compte sa nature (plus ou moins carbonatée), son histoire (plus ou moins longue et complexe ; traduction en phases de karstification) et l'influence de ses discontinuités originelles ou héritées (failles, fractures, stratification, bréchification...). Cela permet, pour l'ensemble des processus, de définir une sensibilité générale du substratum.

Sensibilité générale du substratum (socle de critères communs)		Nature du substratum		
		Marne	Marno-calcaire	Calcaire/Dolomie
Polyphasage du massif	Une phase	Faible	Faible	Moyenne
			Moyenne *	Forte *
	Deux phases	Faible	Moyenne	Forte
			Forte *	Très forte *
	> deux phases	Faible	Moyenne	Très forte
			Forte *	Très forte *

* Cas des substratums fracturés (hors marnes) : zones de failles identifiées ou affectées par des discontinuités à l'échelle de la formation ou d'un secteur

Cette sensibilité générale est ensuite déclinée selon le processus considéré (cf. tableaux ci-dessous).

Pour les cas du soutirage et du débouillage, c'est ensuite le critère se rapportant au colmatage, ou non, des réseaux karstiques, qui est considéré ; en effet lorsque le réseau est plutôt colmaté, la prédisposition au débouillage est forte (probabilité que le matériau débouille), alors que celle liée au soutirage est faible (faible capacité à soutirer si absence de vides). À l'inverse, lorsque le réseau est plutôt décolmaté, c'est la prédisposition au soutirage qui sera plus forte (forte capacité à soutirer du fait de la présence de vides sous-jacents) et celle au débouillage plus faible (conduit plutôt décolmaté).

De même, la nature du colmatage doit être considérée car elle conditionne la facilité (non cohésif) ou non (cohésif) du matériau à migrer vers le réseau karstique.

Enfin, si le processus d'extrusion doit être traité, la démarche (pour le pôle substratum) doit suivre celle du débouillage (mêmes critères impliqués et mêmes croisements).

Concernant la prédisposition au processus de rupture mécanique, elle est étroitement liée à la fragilité du toit calcaire, qui dépend de sa résistance et de son épaisseur ; ainsi, intuitivement, plus le toit sera fin et de mauvaise résistance, plus sa fragilité sera élevée et plus la sensibilité du substratum (à la rupture) sera forte.

Sensibilité du substratum dans le cas du SOUTIRAGE		Sensibilité générale du substratum			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence du colmatage	Substratum plutôt colmaté (matériau cohésif)	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne à Forte
	Substratum plutôt colmaté (matériau non cohésif)	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	Substratum plutôt décolmaté	Moyenne	Forte	Très forte	Très forte

Sensibilité du substratum dans le cas du DEBOUILLAGE		Sensibilité générale du substratum			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence du colmatage	Substratum plutôt colmaté (matériau non cohésif)	Moyenne	Forte	Très forte	Très forte
	Substratum plutôt colmaté (matériau cohésif)	Faible	Moyenne	Moyenne à Forte	Forte
	Substratum plutôt décolmaté	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne

Sensibilité du substratum dans le cas de la RUPTURE MÉCANIQUE		Sensibilité générale du substratum			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de la fragilité du toit **	Limitée	Très faible à faible	Très faible à faible	Très faible à faible	Très faible à faible
	Modérée	Faible *	Faible *	Moyenne *	Forte *
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	Élevée	Faible *	Moyenne *	Forte *	Forte *
Moyenne		Forte	Très forte	Très forte	

* Cas des karst (pluôt) colmatés

** Influence de la fragilité du toit		Épaisseur du toit	
		Toit épais	Toit fin
Résistance du toit	Bonne résistance	Limitée	Modérée
	Mauvaise résistance	Modérée	Élevée

Par ailleurs, quelle que soit la sensibilité générale du substratum, lorsque le toit ne présente pas de fragilité avérée, la sensibilité reste très faible à faible, voire nulle selon les cas.

Comportement de la couverture

Concernant le comportement de la couverture, il est défini assez intuitivement par ses caractéristiques intrinsèques et géométriques ; en effet, plus la couverture sera de nature granulaire (non ou peu cohésive) et de faible épaisseur, plus elle contribuera à augmenter la prédisposition aux mouvements de terrain.

Influence de la couverture		Nature de la couverture		
		Indurée	Cohésive	Non cohésive
Épaisseur de la couverture *	Épaisse	Faible	Moyenne	Forte
	Fine	Moyenne	Forte	Très forte

* Seuils d'épaisseur différents selon la nature de la couverture : de l'ordre de 5 m pour les couvertures indurées, 8 m pour les couvertures cohésives et 10 m pour les couvertures non cohésives (à adapter selon les connaissances locales)

Il est important de noter que les seuils d'épaisseur à considérer diffèrent selon la nature de la couverture. Un retour d'expérience national permet de proposer des seuils de l'ordre de 5 mètres pour les couvertures indurées, 8 mètres pour les couvertures cohésives et d'environ 10 mètres (*a minima*) pour les couvertures non cohésives. Ces seuils sont à adapter, si nécessaire, aux connaissances et contextes et locaux.

Rôle de l'hydrodynamisme

L'eau est un facteur essentiel aussi bien dans la genèse des réseaux karstiques que dans le déclenchement des instabilités gravitaires (en lien avec les interactions hydrodynamiques entre la surface et le vide sous-jacent – notion de gradient hydraulique). Pour ce qui concerne la prédisposition aux mouvements de terrain, les eaux de surface sont distinguées de celles circulant, en profondeur, dans les conduits souterrains.

L'infiltration localisée des **eaux de surface** contribue au déclenchement des mouvements de

terrain. Ainsi sont prises en compte les concentrations d'eaux liées à des effets topographiques (cuvettes, talwegs...) et celles liées à des effets lithologiques (différences de perméabilité notamment).

Eaux de surface		Concentration d'eau par effet topographique	
		Non	Oui
Concentration d'eau par effet lithologique	Non	Faible	Moyenne
		Très forte *	Très forte *
	Oui	Moyenne	Forte
		Très forte *	Très forte *

* Cas des secteurs surexposés aux eaux de surface (origines naturelles ou anthropiques)

Lorsque les effets se combinent, l'impact des eaux de surface devient plus important. Enfin, il est proposé de prendre en compte de manière spécifique le cas des secteurs surexposés aux eaux de surface et donc particulièrement sensibles aux mouvements de terrain d'origine karstique (* au sein du tableau). Cas dans lesquels l'impact des eaux de surface est considéré comme très fort (par défaut). Cela correspond aussi bien aux secteurs naturels de type exutoire* de bassin versant ou doline de dimension significative par exemple, qu'aux secteurs aménagés pour recevoir des eaux en excès (bassins d'orage, de décantation, rejets routiers, assainissements...).

Eaux souterraines		Conditions de mise en charge exceptionnelle (fatigue hydrologique)			
		Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
					
Processus considéré	Soutirage	Faible	Faible	Moyenne	Forte
	Débouillage	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne à forte
	Rupture	Faible	Forte	Moyenne à forte	Moyenne
	Extrusion	Faible	Faible à moyenne	Moyenne	Forte

Les **eaux souterraines** jouent bien sûr également un rôle important dans le déclenchement des instabilités. L'information qui est recherchée concerne les conditions de mise en charge de la nappe et plus précisément encore les conditions exceptionnelles qui entraînent une fatigue hydrogéologique des terrains, que ce soit du substratum et/ou de la couverture si elle est présente. Les impacts de ces conditions exceptionnelles seront évidemment différents selon le processus concerné. La notion d'exceptionnalité est importante ici car elle s'oppose aux cas de situations courantes qui sont considérés comme non influents.

Pour le cas du processus d'extrusion, seuls les effets des eaux souterraines sont à considérer. Enfin, pour connaître le rôle de l'hydrodynamisme (de façon globale) dans la prédisposition d'un secteur donné à un mouvement de terrain d'origine karstique, il est nécessaire de combiner les effets à la fois des eaux de surface et des eaux souterraines.

Influence de l'hydrodynamisme		Eaux de surface			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Eaux souterraines	Faible	Faible	Faible à moyenne	Forte	Très forte
	Moyenne	Faible à moyenne	Moyenne	Forte	Très forte
	Forte	Moyenne	Forte	Très forte	Très forte

Qualification finale de la prédisposition

Une fois cette étape terminée, la qualification de la prédisposition peut être obtenue pour chaque processus en croisant les données relatives à chacun des pôles. Pour cela sont proposés les tableaux ci-dessous. Le remplissage matriciel de ces tableaux est laissé à l'initiative de chacun avec néanmoins l'idée de proposer une pondération différente (par un critère spécifique) selon le processus considéré.

Pour le **soutirage**, l'idée est de prendre particulièrement en compte l'influence de la couverture dans le croisement des trois pôles afin de lui donner un poids plus fort ; les résultats de la deuxième matrice de croisement doivent donc tendre vers une majoration du rôle de cette couverture.

Sensibilité du substratum X Influence de l'hydrodynamisme		Sensibilité du substratum			
		Très faible à Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de l'hydrodynamisme	Faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

PRÉDISPOSITION AU SOUTIRAGE		Sensibilité du substratum X Influence de l'hydrodynamisme			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de la couverture	Faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

Rôle prépondérant du « pôle » couverture

Pour les **débouillage et extrusion**, l'objectif est de prendre particulièrement en compte l'influence de l'hydrodynamisme dans un deuxième temps afin de lui donner un poids plus important ; dans ce cas, les résultats de la deuxième matrice de croisement doivent tendre vers une majoration du rôle de l'hydrodynamisme.

Sensibilité du substratum X Influence de La couverture		Sensibilité du substratum			
		Très faible à Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de la couverture	Faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

PRÉDISPOSITION AU DEBOURRAGE		Sensibilité du substratum X Influence de La couverture			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de l'hydrodynamisme	Faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

Rôle prépondérant du « pôle » hydrodynamisme

Pour le processus de **rupture mécanique**, la démarche consiste à prendre particulièrement en compte la sensibilité du substratum dans un deuxième temps afin de lui donner un poids plus grand ; dans ce cas, les résultats de la deuxième matrice de croisement doivent tendre vers une majoration du rôle de cette sensibilité du substratum (fragilité des roches).

Influence de la couverture X Influence de l'hydrodynamisme		Influence de la couverture			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Influence de l'hydrodynamisme	Faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

PRÉDISPOSITION A LA RUPTURE		Influence de la couverture X Influence de l'hydrodynamisme			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Sensibilité du substratum	Très faible à faible	Faible			
	Moyenne		Moyenne		
	Forte			Forte	
	Très forte				Très forte

Rôle prépondérant du « pôle » substratum

b) Prédiction obtenue par calcul global

Une alternative à l'approche par croisements successifs consiste à conserver les évaluations unitaires de chaque critère jusqu'à un unique calcul final. Celui-ci pondère chacun des critères en fonction de son influence relative vis-à-vis du processus étudié. La note finale obtenue quantifie la prédisposition au processus étudié.

Cette approche est bien adaptée à un travail sous SIG (via par exemple les logiciels QGIS ou ArcGIS), car la zone étudiée est traitée de manière progressive, critère après critère. Cela peut être fait :

- via une unique couche au format polygonal, contenant l'ensemble de l'analyse effectuée sous la forme d'une colonne par critère. Le calcul final de la prédisposition se fait alors dans une dernière colonne : la formule est directement entrée dans le SIG et le calcul est opéré de manière automatique pour l'ensemble des polygones créés ;
- ou via un ensemble de rasters. Chaque critère est traité sous la forme d'un raster, auquel cas l'analyse finale est faite en surimposant les rasters unitaires. Les outils le permettant sont naturellement inclus dans les logiciels SIG courants.

Cette approche est par ailleurs robuste : l'ensemble de l'analyse est traçable car toutes les étapes sont explicites. Cela permet si besoin de reprendre facilement l'analyse (par exemple pour une mise à jour) en corrigeant le ou les critères modifiés et en relançant le calcul final.

Dans la pratique :

- chaque critère est noté sur un intervalle allant de 0 à 1 (sans inclure forcément le 0). Par exemple :
 - pour la nature du substratum, les trois possibilités proposées (marne / marno-calcaire / calcaire-dolomie) prennent respectivement les notes 1/3, 2/3 et 1 ;
 - pour la concentration des eaux par effet topographique, le choix proposé est binaire (il y a ou non la concentration des eaux), la note est donc de 0 ou 1 ;
- la pondération de chaque critère pour le calcul de la note finale concentre les réflexions de cette approche. Des analyses statistiques (par exemple par le poids des évidences) permettent de la déterminer de manière mathématique, mais cela nécessite un travail à part entière et une population significative de mouvements de terrain. Un exemple est fourni par Perrin *et al.* (2014 b : étude en français ; 2015 : article en anglais). La plupart du temps, la subjectivité de l'expert réalisant l'étude peut donc rester forte. À titre d'exemple, le tableau suivant présente les pondérations effectuées pour trois études récentes ;

Communes exemples		Belfort (90)	Orléans - av. Galloux (45)		Boulot et Etuz (70)		
Date		2019	2021		2021		
Référence rapport BRGM		RP-69009-FR	RP-70463-FR		RP-71205-FR		
Processus étudié		Soutirage	Soutirage	Rupture toit	Soutirage	Débouillage	Rupture toit
Pôle Substratum	Nature du substratum	1	1	1	20	20	20
	Polyphasage du massif	1	1	1	-	10	10
	Fracturation et discontinuité	1	1	1	10	20	15
	Influence du colmatage	1	1	1	10	15	-
	Fragilité du toit	-	-	4	-	-	15
Pôle Couverture	Épaisseur de la couverture	4	4	1	20	10	2.5
	Nature de la couverture	4	4	1	15	5	2.5
Pôle Hydro-dynamisme	Concentration d'eau par effet topo.	2	2	2	20	15	5
	Concentration d'eau par effet litho.	3	3	3			
	Surexposition aux eaux de surface	2	2	2	5	5	10
	Fatigue hydrologique	2	2	2			
Note maximale possible		21	21	19	100	100	80

- la note finale brute ($Note_{finale\ brute}$) est la somme des n notes des critères ($note_{critère\ i}$) pondérées par les poids associés ($poids_{critère\ i}$) :

$$Note_{finale\ brute} = \sum_{i=1}^n poids_{critère\ i} \times note_{critère\ i}$$

- la note maximale possible dépend des pondérations effectuées (voir tableau précédent) ; c'est pourquoi cette note peut ensuite être ramenée à un intervalle [0 ; 1] en la divisant par ce maximum : cela permet de comparer plus facilement les différents processus sur un même territoire et de comparer des territoires entre eux ;

$$Note_{finale\ nette} = \frac{Note_{finale\ brute}}{Note_{maximale}}$$

- cette note finale fournit une prédisposition chiffrée qui peut être qualifiée en découpant l'intervalle [0 ; 1] en autant de classes recherchées, comme par exemple (1+4 classes) :
 - Note finale nette = 0,00 → prédisposition nulle
 - 0,00 < Note finale nette < 0,25 → prédisposition faible
 - 0,25 ≤ Note finale nette < 0,50 → prédisposition moyenne
 - 0,50 ≤ Note finale nette < 0,75 → prédisposition forte
 - 0,75 ≤ Note finale nette < 1,00 → prédisposition très forte

8.2.3. Fréquence d'apparition théorique

Peu utilisée, l'approche quantitative est une méthode d'exploitation des fréquences expérimentales basée sur une série statistique des événements passés. Elle s'apparente à la méthode utilisée pour les calculs de périodes de retour des crues, associée au fonctionnement du karst par le rôle significatif de la mise en place de gradients hydrauliques et d'interactions hydrodynamiques entre la surface et le karst (facteurs participant activement aux processus de suffosion/soutirage et débouillage).

Le recensement des événements (notamment par enquête de terrain et recherche de la date d'apparition du phénomène) permet de calculer la probabilité d'apparition d'un événement sur une **zone homogène** (contexte d'exposition identique).

Ce calcul est le suivant :

- pour une surface homogène de superficie S_1 , avec $e_{(d)}$ = nombre d'événements apparus dans les d dernières années, la fréquence d'apparition annuelle d'un tel phénomène vaut :

$$F(S_1) = \frac{e_{(d)}}{d} \text{ soit 1 événement tous les } \frac{1}{F(S_1)} \text{ ans dans la zone de superficie } S_1.$$

Pour déterminer F sur un secteur homogène de superficie S_2 (incluse dans S_1), on prend :

$$\frac{S_1}{S_2} = a \text{ et } F(S_2) = \frac{F(S_1)}{a}$$

Exemple d'application

Sur une surface de 10 000 m², 13 fontis sont apparus dans les 20 dernières années, soit :

$$S_1 = 10\,000 \text{ m}^2$$

$$e_{(20)} = 13$$

$$d = 20 \text{ ans}$$

$$\text{Fréquence d'apparition annuelle d'un fontis } F(10\,000 \text{ m}^2) = \frac{13}{20} = 0,65$$

soit 1 événement tous les $\frac{1}{0,65} = 1 \text{ à } 2$ ans

Sur une parcelle de 500 m² (S_2), la fréquence d'apparition annuelle d'un fontis vaut :

$$F(500 \text{ m}^2) = 0,65 \times \frac{S_2}{S_1} = 0,0325$$

soit 1 événement tous les 30 à 31 ans.

(Ces résultats doivent être cohérents avec les analyses du site).

Cette approche statistique est sujette à caution car elle est particulièrement sensible aux données historiques disponibles et à leurs représentativités. Il est très difficile d'extrapoler ce résultat à un secteur spécifique de la zone d'étude. Cette analyse doit considérer au mieux l'ensemble des paramètres de la zone homogène, parfois complexe à définir (hétérogénéité du milieu naturel et complexité des mécanismes, caractère partiel des informations disponibles, zone d'extension possible du réseau karstique), ce qui rend difficile l'interprétation du calcul statistique.

8.3. Deux cas d'application

8.3.1. Application n° 1 - Site du Pays de Serres (47) - Cerema

A- Contexte physiographique général

A-1 Situation et géomorphologie

Le périmètre d'étude, d'une superficie d'environ 3 km², se situe en rive droite de la plaine de la Garonne, au niveau de la bordure d'un vaste plateau d'assise calcaire appartenant au **Pays de Serres**, non loin de la ville d'Agen, dans le département du Lot-et-Garonne. Les serres désignent des plateaux étroits, en forme de lanières, résultant de la dissection opérée par un réseau hydrographique qui draine les eaux de ce territoire vers la vallée de la Garonne (au sud) et vers la vallée du Lot (au nord).

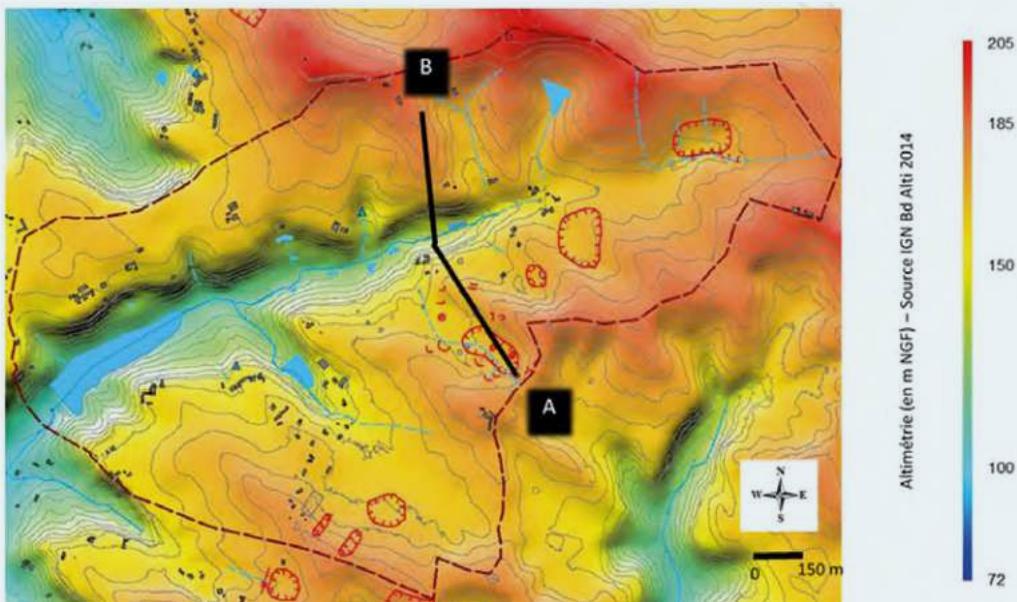


Figure 69 : Géomorphologie du secteur d'étude et position de la coupe géologique 'AB'

Le plateau étudié (figures 69 et 70), d'assise **calcaire** légèrement inclinée, forme de longues échines ondulées, dont l'altitude moyenne est comprise entre 160 et 190 NGF (sur la zone d'étude). Il est entaillé sur plusieurs kilomètres par une **série de vallons parallèles** qui s'encaissent jusqu'à la cote altimétrique de 140 NGF environ. Ces vallons permettent le drainage hydrographique du plateau de Serres, par l'intermédiaire de thalwegs qui rejoignent ensuite la **vallée de la Garonne**.

La vallée de la Garonne est ainsi couronnée par de nombreuses ruptures topographiques franches, que l'on appelle les **corniches calcaires de la Garonne**, correspondant à des parois subverticales comprises entre 5 et 10 m de hauteur.

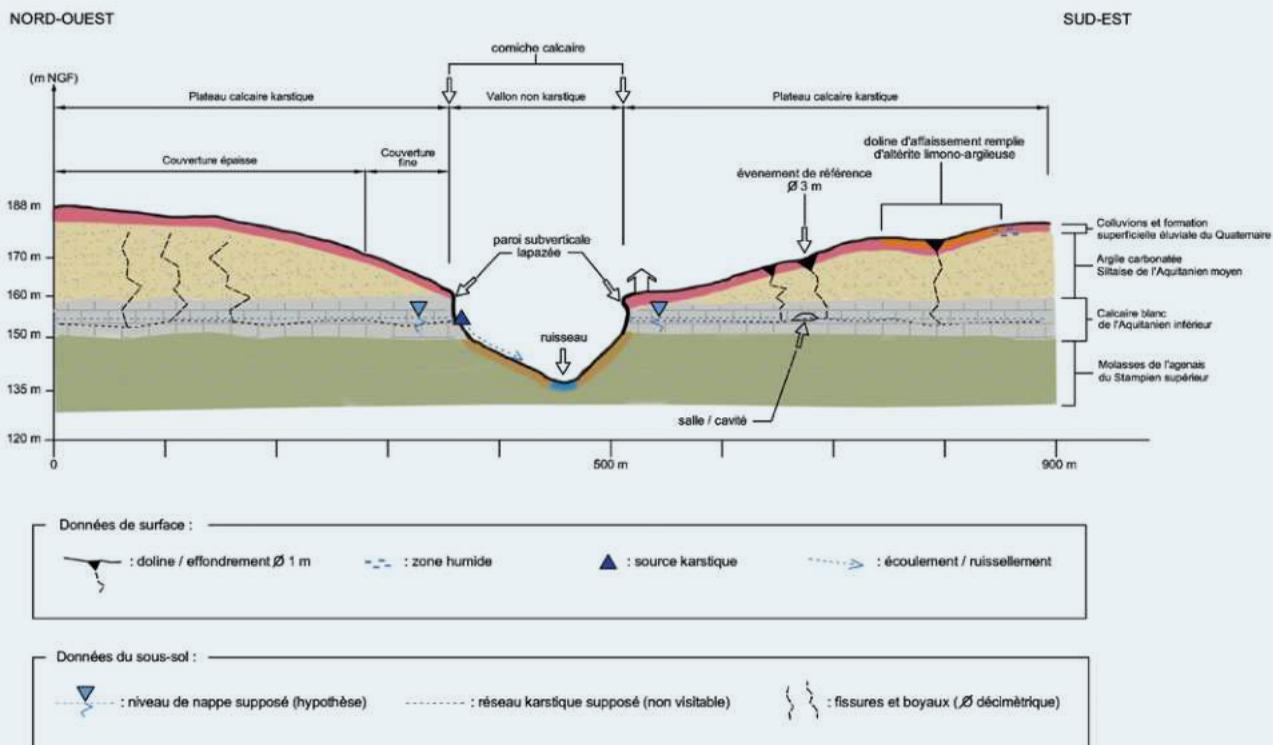


Figure 70 : Coupe géologique AB

A-2 Formations géologiques impliquées

Les formations géologiques en jeu correspondent à des **dépôts continentaux fluvio-lacustres tertiaires** appartenant aux étages géologiques de l'Oligocène (34 à 23 Ma) et du Miocène (23 à 20 Ma). Il s'agit d'un **dispositif tabulaire** qui a été globalement érodé puis localement **entaillé par le réseau hydrographique** durant le Pliocène (entre 6 à 2 Ma) puis pendant la période du Quaternaire (2 derniers Ma).

Cette érosion a localement mis à nu les strates subhorizontales carbonatées du plateau de Serres sous forme de corniches et initié la mise en place d'un **réseau hydrographique souterrain** à l'origine du développement du réseau karstique actuel.

Plus précisément, les étages géologiques rencontrés sont :

	Nom et âge de la formation	Description
Formations superficielles	<i>Altérites limono-argileuses brun-marron foncé</i> (Holocène)	Remplissage des appareils karstiques aériens de type doline (jusqu'à 8 m d'épaisseur) correspondant à des dépôts de recouvrement.
	<i>Formations superficielles colluviales et éluviales</i> (Holocène- Quaternaire)	Horizons argilo-silteux de couleur beige-marron (jusqu'à 1,5 m d'épaisseur) recouvrant les formations tertiaires
Couverture	<i>Argiles carbonatées silteuses,</i> (Aquitainien moyen)	Beiges à jaunes, elles renferment des nodules carbonatés centimétriques pulvérulents (épaisseurs pouvant aller jusqu'à 30 m).

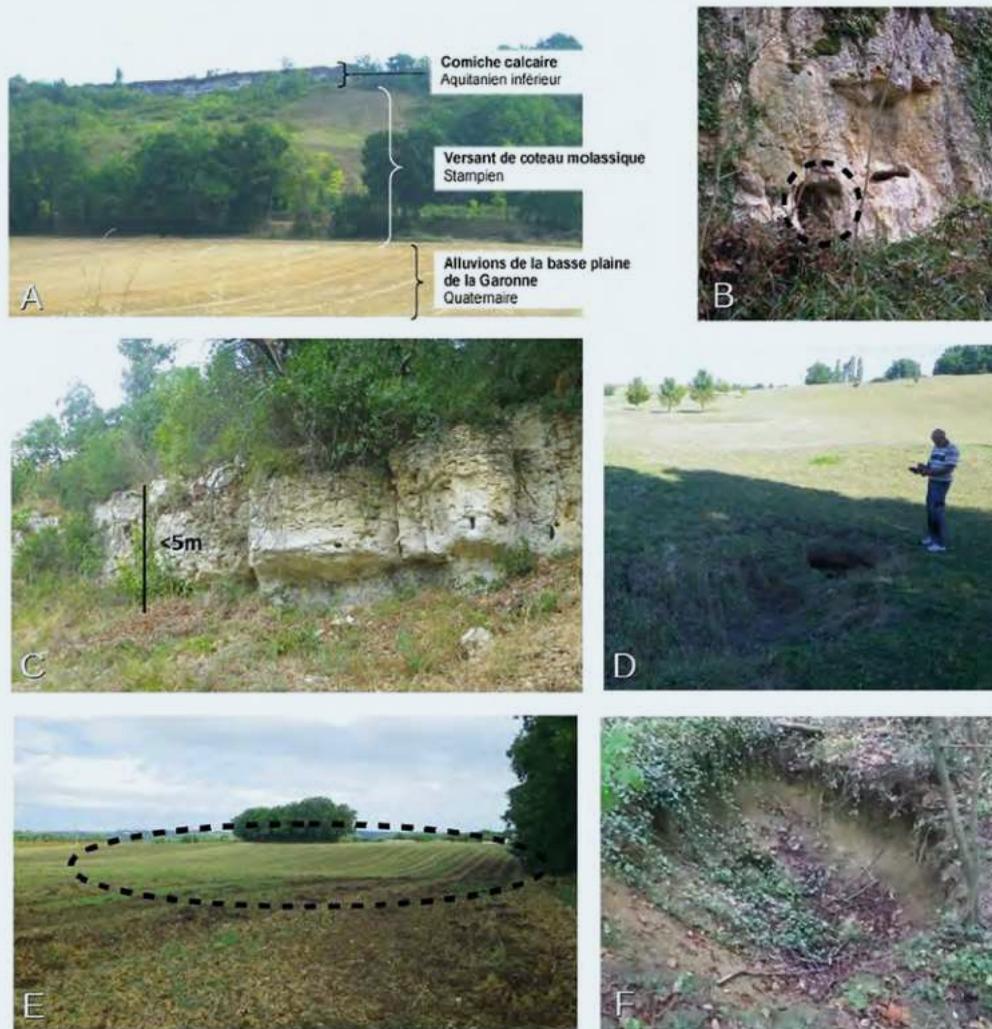
Substratum carbonaté (corniche calcaire et assise du plateau du Pays de Serres)	Calcaires blancs lacustres micritiques (Aquitaniens inférieurs)	Épaisseur maximale de 15 m avec à la base de la formation 2 à 3 m de marno-calcaires blanchâtres à nodules carbonatés blancs indurés. Les calcaires sont composés d'un carbonate blanc à beige clair, micritique, dur, à cassure esquilleuse. Dans ces calcaires se développe une porosité fine allongée (3 à 4 mm) subhorizontale et légèrement sinueuse, des recristallisations calcitiques translucides cristallines à macrocristallines (géodiques ou en filonnets), des altérations subverticales de type karstique.
Formation non karstique (À la base des coteaux de la Garonne)	Molasses de l'Agenais supérieur (Stampien supérieur)	Argiles carbonatées à passage plus ou moins induré de grès tendres, sur une épaisseur de 10 à 25 mètres.

A-3 Réseaux karstiques et eaux souterraines

Les bancs calcaires fluvio-lacustres de l'Aquitaniens inférieurs (assise du plateau du Pays de Serres) sont soumis à des processus de **karstification**. Sur le secteur d'étude, le réseau karstique souterrain, **non visitable**, possède de la **fissuration** et **des conduits subhorizontaux de diamètre décimétrique**, qui ont la capacité d'emmagasiner une ressource en eau non négligeable (malgré la faible puissance de la formation carbonatée).

Cet **aquifère perché** contribue à l'apparition de sources (exurgences) en base des bancs calcaires (sur la bordure du plateau), qui alimentent des fontaines aménagées dont les débits sont de l'ordre de 10 à 30 m³/h, ainsi que les nombreux ruisseaux qui s'écoulent dans les fonds de vallons.

La figure 71 illustre les différentes formes karstiques observées sur le site d'étude.



- A- Profil topographique depuis le plateau calcaire jusqu'à la plaine alluviale de la Garonne
- B- Exurgence karstique au sein de la corniche calcaire
- C- Corniche calcaire sous-cavée à sa base (nature marneuse)
- D- Effondrement localisé (1 m de diamètre) et affaissement associé
- E- Large doline d'affaissement pluri-décamétrique
- F- Effondrement localisé (3 m de diamètre) : événement de référence sur le secteur

Figure 71 : Exemples de formes karstiques observées sur le site d'étude

A-4 Evènements d'origine karstique

Au sein de ce calcaire, les transits de l'eau, de par sa capacité acide, altèrent, déblayent puis élargissent des conduits karstiques **dont on peut seulement appréhender le parcours à partir des manifestations aériennes** constatées sur le terrain :

Au niveau des corniches calcaires, on observe notamment :

- des **surfaces lapiazées** d'aspect vacuolaire ;
- des **conduits calcaires subhorizontaux** de diamètre décimétrique colmatés par des argiles silteuses ocre ;
- et des **sources karstiques** en pied de paroi.

Les mouvements de terrain constatés en surface correspondent principalement à de **petits effondrements localisés** (diamètre inférieur à 1 m) et à de **grandes dolines d'affaissement** (cf. figure 71).

B- Évaluation de l'aléa « débouillage »

B-1 Processus retenus

Parmi les processus possibles sur le secteur, seul le débouillage est ici présenté.

B-2 La prédisposition

L'exercice consiste ici à proposer un exemple de mise en œuvre de la démarche par croisement de critères. En conséquence, la justification de la qualification et de la cartographie de chaque critère n'est pas l'objet des paragraphes ci-dessous (ce travail a été réalisé en amont).

Il est par ailleurs utile de préciser qu'en raison du contexte géologique relativement simple du secteur d'étude, **plusieurs critères ont été considérés comme homogènes à l'échelle du périmètre étudié** (critères relatifs au substratum notamment). Néanmoins, **d'autres critères présentent des variations spatiales** au sein du secteur étudié ; c'est le cas par exemple de l'épaisseur de la couverture et du rôle des eaux, aussi bien de surface que souterraines.

Pour mettre en œuvre la démarche, les tableaux de croisement utilisés sont ceux présentés à l'Annexe 8.2.1.a.

Les **cartographies** relatives à la définition du **rôle de chacun des trois pôles** sont visibles sur la figure 72 ci-dessous. Leur combinaison permet d'obtenir la **prédisposition au débouillage** sur le secteur d'étude.

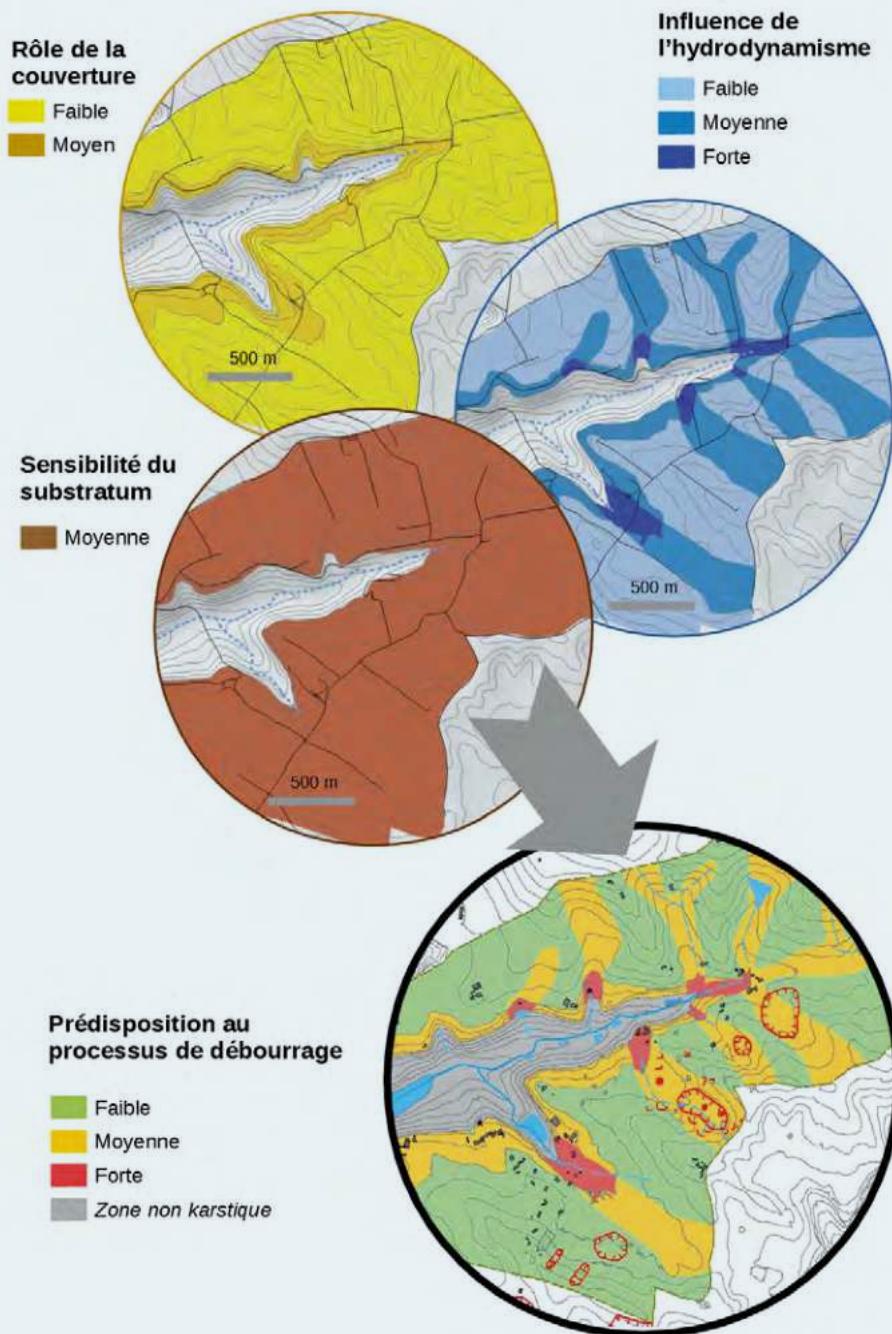


Figure 72 : Évaluation des rôles de chaque pôle et cartographie de prédisposition au débouillage

B-3 L'intensité

L'intensité des mouvements de terrain sur le secteur d'étude est donnée par le **diamètre des événements historiques déjà survenus** :

- pour la majorité du secteur, les effondrements constatés ont des diamètres de l'ordre du mètre ce qui se traduit par une **intensité faible** ;
- néanmoins, **un thalweg se distingue des autres** par son comportement et par la dimension des mouvements de terrain en surface. Ce thalweg se voit donc affecté d'une intensité spécifique, plus précisément **moyenne**, du fait des diamètres rencontrés de l'ordre de 3 mètres (dont événement de référence) ;
- par ailleurs, cette intensité dite historique a aussi été appliquée dans les secteurs aval des thalwegs (cf. figure 73).

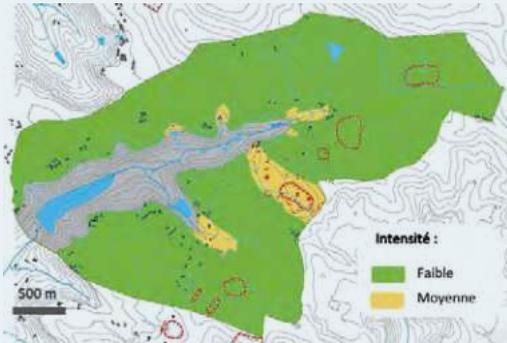


Figure 73 : Cartographie de l'intensité des mouvements de terrain

B-4 Résultats finaux

Une fois l'intensité définie, la **cartographie de l'aléa** (cf. figure 74) est obtenue (pour le processus de débouillage) par croisement entre la prédisposition et l'intensité.

Prédisposition

Intensité



Figure 74 : Rappel des cartes de prédisposition et d'intensité

La carte de l'aléa débouillage est donnée par la figure 75 ci-après. On constate que **trois classes d'aléa** sont présentes sur le secteur étudié.

À titre pédagogique, **cinq secteurs** ont été identifiés sur la carte (numérotés de 1 à 5) et traduits sous forme de tableaux (cf. Tableaux 1 à 5) afin de faire apparaître le raisonnement suivi pour la qualification de l'aléa débouillage sur la zone à laquelle ils appartiennent.

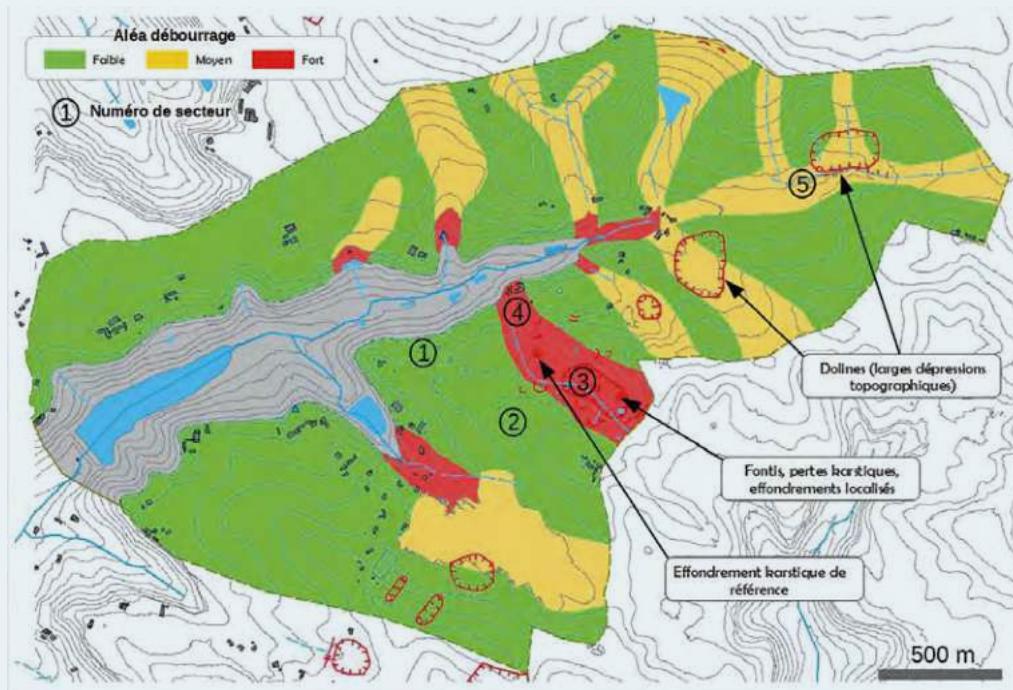


Figure 75 : Carte d'aléa au débouillage

SECTEUR 1

	Critère considéré	Qualification du critère	Classe obtenue
Sensibilité du substratum	Nature du substratum	Calcaire	Moyenne
	Polyphasage	Une phase	
	Fracturations et discontinuités	Absence de fracturation	
	Influence du colmatage des vides karstiques	Colmaté	
Comportement de la couverture	Épaisseur couverture	Fine	Forte
	Nature couverture	Cohésive	
Rôle de l'hydrodynamisme	Eau de surface par effet topographique	Non	Moyenne
	Eau de surface par effet lithologique	Oui	
	Zone surexposée aux eaux de surface	Absence de surexposition	
	Fatigue hydrologique	Nappe au toit du réseau	
Prédisposition au débouillage			Moyenne
Intensité	Diamètre moyen des événements historiques	1 m	Faible
	Effet sablier	Non	/
Intensité prévisible des mouvements de terrain			Faible
Qualification de l'aléa « débouillage » du secteur 1			Faible

SECTEUR 2

	Critère considéré	Qualification du critère	Classe obtenue
Sensibilité du substratum	Nature du substratum	Calcaire	Moyenne
	Polyphasage	Une phase	
	Fracturations et discontinuités	Absence de fracturation	
	Influence du colmatage des vides karstiques	Colmaté	
Comportement de la couverture	Épaisseur couverture	Épaisse	Moyenne
	Nature couverture	Cohésive	
Rôle de l'hydrodynamisme	Eau de surface par effet topographique	Non	Faible
	Eau de surface par effet lithologique	Non	
	Zone surexposée aux eaux de surface	Absence de surexposition	
	Fatigue hydrologique	Nappe au toit du réseau	
Prédisposition au débouillage			Faible
Intensité	Diamètre moyen des événements historiques	1 m	Faible
	Effet sablier	Non	/
Intensité prévisible des mouvements de terrain			Faible
Qualification de l'aléa « débouillage » du secteur 2			Faible

SECTEUR 3

	Critère considéré	Qualification du critère	Classe obtenue
Sensibilité du substratum	Nature du substratum	Calcaire	Moyenne
	Polyphasage	Une phase	
	Fracturations et discontinuités	Absence de fracturation	
	Influence du colmatage des vides karstiques	Colmaté	
Comportement de la couverture	Épaisseur couverture	Fine	Moyenne à fort
	Nature couverture	Cohésive	
Rôle de l'hydrodynamisme	Eau de surface par effet topographique	Oui	Moyenne
	Eau de surface par effet lithologique	Non	
	Zone surexposée aux eaux de surface	Absence de surexposition	
	Fatigue hydrologique	Nappe au toit du réseau	
Prédisposition au débouillage			Moyenne à forte
Intensité	Diamètre moyen des événements historiques	3 m	Moyenne
	Effet sablier	Non	/
Intensité prévisible des mouvements de terrain			Moyenne
Qualification de l'aléa « débouillage » du secteur 3			Forte

SECTEUR 4

	Critère considéré	Qualification du critère	Classe obtenue
Sensibilité du substratum	Nature du substratum	Calcaire	Moyenne
	Polyphasage	Une phase	
	Fracturations et discontinuités	Absence de fracturation	
	Influence du colmatage des vides karstiques	Colmaté	
Comportement de la couverture	Épaisseur couverture	Fine	Forte
	Nature couverture	Cohésive	
Rôle de l'hydrodynamisme	Eau de surface par effet topographique	Oui	Forte
	Eau de surface par effet lithologique	Oui	
	Zone surexposée aux eaux de surface	Absence de surexposition	
	Fatigue hydrologique	Nappe au toit du réseau	
Prédisposition au débouillage			Forte
Intensité	Diamètre moyen des événements historiques	3 m	Moyenne
	Effet sablier	Non	/
Intensité prévisible des mouvements de terrain			Moyenne
Qualification de l'aléa « débouillage » du secteur 4			Forte

SECTEUR 5

	Critère considéré	Qualification du critère	Classe obtenue
Sensibilité du substratum	Nature du substratum	Calcaire	Moyenne
	Polyphasage	Une phase	
	Fracturations et discontinuités	Absence de fracturation	
	Influence du colmatage des vides karstiques	Colmaté	
Comportement de la couverture	Épaisseur couverture	Épaisse	Moyenne
	Nature couverture	Cohésive	
Rôle de l'hydrodynamisme	Eau de surface par effet topographique	Non	Moyenne
	Eau de surface par effet lithologique	Non	
	Zone surexposée aux eaux de surface	Absence de surexposition	
	Fatigue hydrologique	Nappe au toit du réseau	
Prédisposition au débouillage			Moyenne
Intensité	Diamètre moyen des événements historiques	1 m	Faible
	Effet sablier	Non	/
Intensité prévisible des mouvements de terrain			Faible
Qualification de l'aléa « débouillage » du secteur 5			Moyen

8.3.2. Application n°2 - Communes de Boulot et Etuz (70) - BRGM

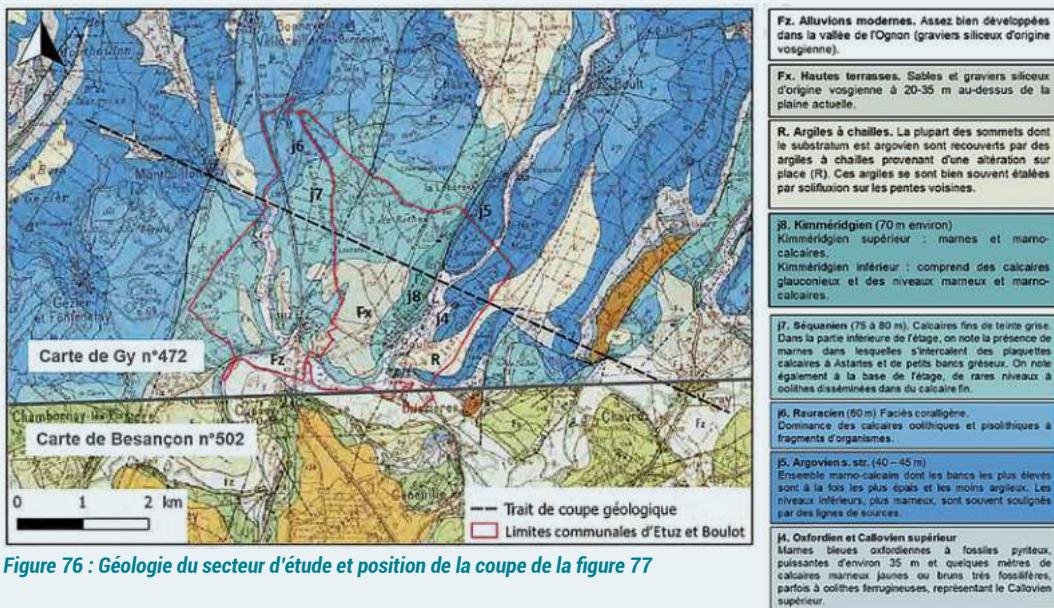
Suite à l'apparition de deux effondrements en trois ans sur les communes d'Etuz et de Boulot, la DDT 70 a confié en 2020 au BRGM une mission d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain d'origine karstique de ce territoire. Cette étude a donné lieu à l'édition d'un **rapport** (référence RP-71205-FR - novembre 2021), disponible *via* le site internet du BRGM. Ce qui suit est un **résumé** de ce rapport.

Les documents utilisés (phase documentaire) et les visites effectuées (phase terrain) sont détaillés dans le rapport. L'analyse s'est étendue au-delà des deux communes afin de mieux comprendre l'environnement étudié. Des statistiques ont servi à préciser l'influence des critères géologiques sur les phénomènes karstiques.

A- Contexte géologique

A-1 Situation et géomorphologie

Situées à une dizaine de kilomètres au nord de Besançon, en bordure du département de Haute-Saône (70), les communes d'Etuz et de Boulot (surface totale d'environ 12 km²) sont délimitées au sud par la **vallée de l'Ognon** (altitude 210 NGF) et au nord par un **plateau d'âge jurassique** (altitude 260 NGF, cf. figure 76).



A-2 Formations géologiques impliquées

D'après la carte géologique de Gy (n°472, cf. figure 77), le sous-sol des communes d'Etuz et de Boulot est constitué de **calcaires et de marnes datant du Jurassique**.

Deux lacunes sédimentaires, pouvant correspondre à des émergences, affectent le secteur : du Berriasien au Valanginien (-146 Ma à -132,9 Ma) et du Barrémien à l'Aptien (-130 Ma à -112 Ma). L'émergence définitive a lieu au Coniacien (-89 Ma). La **karstification** a ainsi pu affecter les roches carbonatées à trois reprises.

Ces dépôts sédimentaires sont par ailleurs affectés par une histoire **tectonique** débutant au Jurassique moyen avec deux systèmes de failles (système principal ENE-OSO au jeu supposé inverse et système secondaire NNE-SSO au jeu supposé normal). Le système secondaire façonne le secteur en une succession de horsts et de grabens comme illustré par la coupe géologique de la figure 77 (la localisation est précisée en figure 76).

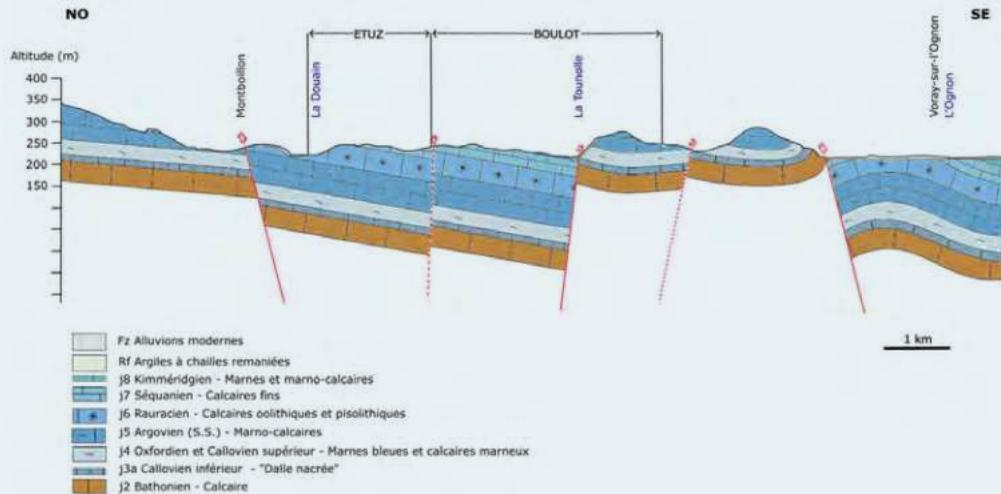


Figure 77 : Coupe géologique du secteur d'étude, localisée en figure 76

A-3 Formes karstiques et hydrogéologie

D'après les informations disponibles, les formations calcaires du secteur (particulièrement le Séquanien - Jurassique supérieur) présentent de **nombreuses formes karstiques** (cf. figure 71) : des cavités (grotte de la Douain, fenêtre karstique des Champs de Sû), des résurgences (sources de la Douain, de la Gouttote, le Sû, de Vauvenise, lavoir-fontaine d'Etuz), des effondrements (deux récents ont fait l'objet d'expertises par le BRGM).

Les traçages hydrogéologiques réalisés dans le secteur d'étude montrent par ailleurs une circulation souterraine principale du NE vers le SO, très certainement influencée par les failles d'orientation NNE-SSO. Les vitesses d'écoulement y sont élevées (20 m/h mesurés entre Chau-la-Lotière et la source Le Sû). Ces communications impliquent la présence d'un **réseau karstique connecté et bien développé**.

Exokarst



Epikarst - Carrière de Pin



Epikarst - Carrière de Bou



Endokarst



Figure 78 : Exemples de formes karstiques observées sur le site d'étude (les numéros renvoient à une carte des observations disponible dans le rapport)

A-4 Caractérisation de la zone d'étude

L'étude a révélé les informations suivantes :

Concernant le **substratum** :

Les formes karstiques se concentrent globalement sur les formations du Séquanien (J7) et du Rauracien (J6) : leurs densités y sont deux à presque trois fois plus fortes que sur les autres formations à tendance carbonatée (J4, J5, J8).

Un karst de contact est présent à la limite entre la formation marneuse de l'Oxfordien et du Callovien supérieur (J4) et le substratum carbonaté sous-jacent : la densité des formes karstiques est environ sept fois plus grande à cet endroit, sur une largeur d'environ 150 m.

Vu l'histoire géologique régionale, plusieurs phases de karstification ont affecté les formations carbonatées, mais cela s'est certainement fait de manière homogène.

L'absence de galeries explorables ainsi que les observations faites sur les affleurements rocheux indiquent que le toit rocheux des cavités karstiques est *a priori* partout fragile.

Concernant les **failles et discontinuités** :

Les formes karstiques se concentrent autour des failles principales.

Les visites de terrain montrent l'existence de couloirs d'altération (carrière de Bou notamment) se manifestant en surface sous la forme de vallons secs rectilignes.

Concernant les **vides karstiques** : sur le terrain, ceux-ci apparaissent tantôt colmatés (par des matériaux fins dans la carrière de Bou par exemple), tantôt vides (carrière du Pin, grotte de la Douain, etc.). Après analyse (entre autres des données de traçage), les zones

hydrogéologiquement actives (rivière, vallées, failles) sont considérées comme les seules étant « purgées », le reste étant colmaté par des matériaux cohésifs.

Concernant la **couverture** : les matériaux recouvrant le kart présentent des configurations et des comportements divers : les alluvions (Fz, Fx) faiblement cohésives sont *a priori* plus épaisses au droit des lits mineurs (jusqu'à 7 m pour l'Ognon et 4 m pour ses affluents), les argiles d'altération (R) cohésives présentent des épaisseurs très variables (de 2 à 13 m suivant la BSS), des sols généralement fins recouvrent également l'ensemble des formations (épaisseur estimée à 1 m sur les formations rocheuses et à 3 m sur les alluvions et pour les zones urbanisées).

Concernant l'**hydrogéologie** :

Les zones pouvant concentrer les eaux de surface par effet topographique sont naturellement les vallées et les vallons secs.

Aucune zone pouvant concentrer les eaux par effet lithologique n'a été identifiée.

Quelques bassins d'infiltration des eaux pluviales sont enfin retenus.

La position de la nappe est difficile à estimer (peu d'informations). Une nappe baignant les conduits karstiques et leur couverture a été retenue pour les lits mineurs de l'Ognon et de ses affluents. Ailleurs, seuls les conduits sont considérés comme noyés.

B- Évaluation et cartographie de l'aléa

B-1 Processus retenus

Étant donné la configuration géologique, trois processus sont ici retenus : le débouillage, le soutirage et la rupture de toit. L'extrusion n'est *a priori* pas possible en raison de trop faibles mises en charge du réseau karstique.

B-2 La prédisposition

L'analyse géologique du territoire telle qu'elle est présentée ci-dessus a été déclinée en cartes :

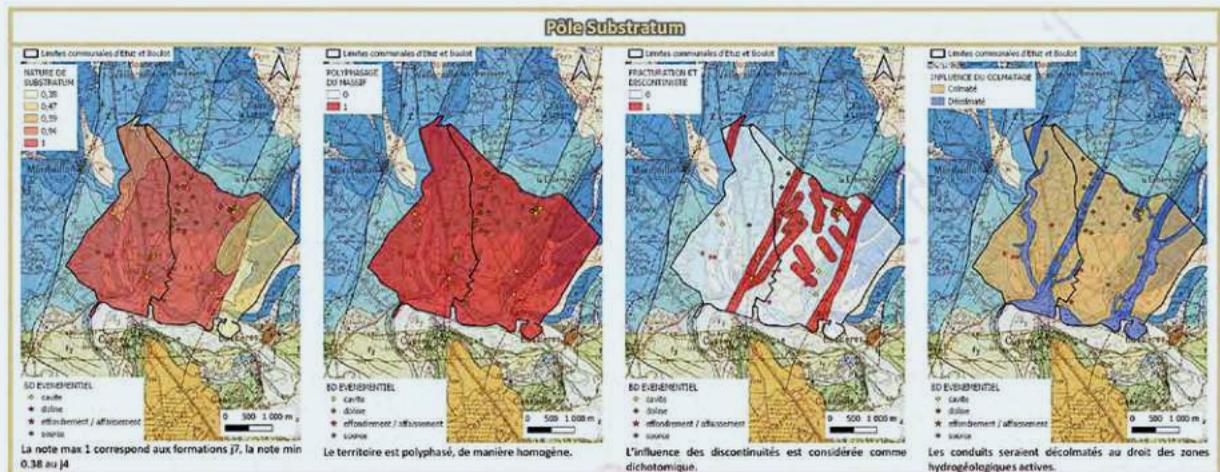
- une **carte** a été réalisée pour chacun des 11 critères considérés (page suivante – par souci de simplification, la carte de concentration d'eaux par effet anthropique n'a pas été reprise).
 - chaque carte découpe le site d'étude en **une ou plusieurs zones homogènes** vis-à-vis du critère considéré. En fonction du processus, chacune de ces zones est affectée d'une note allant de 0 (pas d'influence du critère sur le processus) à 1 (influence maximale) ;
 - pour refléter au mieux la « réalité » du territoire, ces notes ont été établies grâce à **des analyses géostatistiques** (voir rapport pour plus de détail à ce sujet) ;

- une carte est alors obtenue pour chaque processus en combinant les cartes unitaires.
 - cette **combinaison** s'est faite en pondérant « à dire d'expert » chaque critère (Tableau 1) ;
 - les notes finales s'échelonnent en théorie de 0 à 100. Suite aux calculs, elles vont ici :
 - de 11 à 73/100 pour le soutirage ;
 - de 28 à 78/100 pour le débouillage ;
 - de 23 à 75/100 pour la rupture de toit ;
 - ces notes sont ensuite **traduites en niveaux de prédisposition**, avec, pour cette étude : nul à très faible < 20 ≤ très faible < 40 ≤ faible < 60 ≤ moyen < 80 ≤ fort (cf. figure 80) ;

- **une carte de prédisposition finale** est dressée (cf. figure 80) en considérant pour chaque secteur la prédisposition la plus forte des trois processus retenus. Cette carte est brute : aucun ajustement n'y a encore été effectué.

	SOUTIRAGE		DEBOURRAGE		RUPTURE DE TOIT	
	Niveau	Poids	Niveau	Poids	Niveau	Poids
Nature de substratum	2	10%	2	10%	2	10%
Polyphasage du massif	1	5%	3	15%	3	15%
Fracturation et discontinuité	2	10%	2	10%	3	15%
Influence du colmatage	1	5%	3	15%	/	/
Fragilité de toit	/	/	/	/	3	15%
Epaisseur de couverture	2	10%	1	5%	1	5%
Nature de couverture	2	10%	1	5%	1	5%
Concentration d'eau par effet topographique	3	15%	2	10%	1	5%
Concentration d'eau par effet lithologique	3	15%	2	10%	2	10%
Zones surexposées aux eaux de surface	3	15%	2	10%	1	5%
Position de la nappe	1	5%	2	10%	3	15%

Tableau 1 : Pondération des critères selon les processus et à dire d'expert



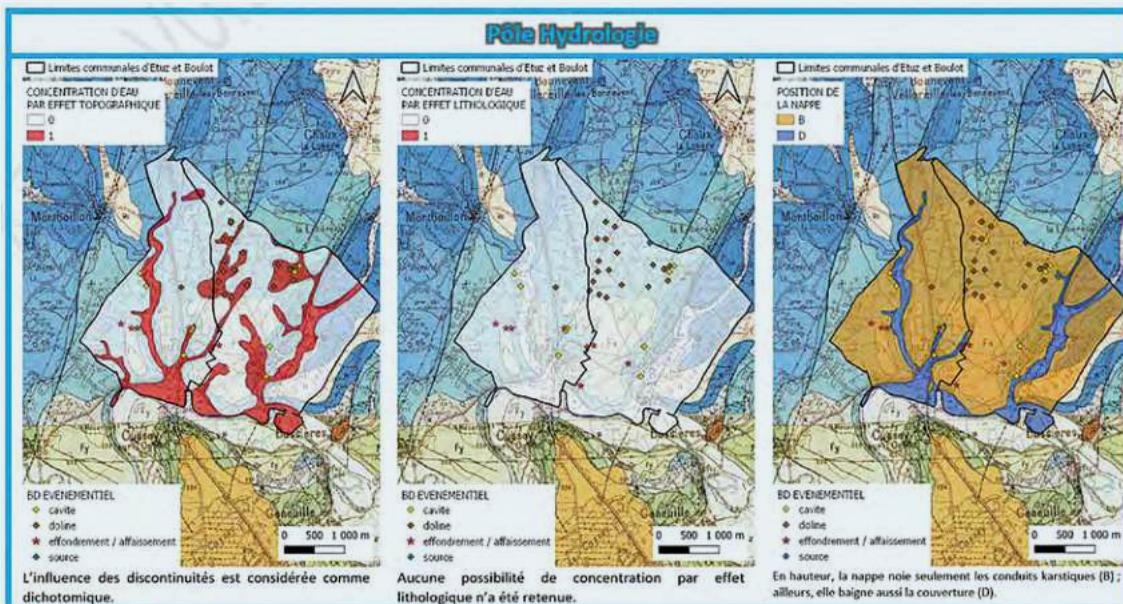
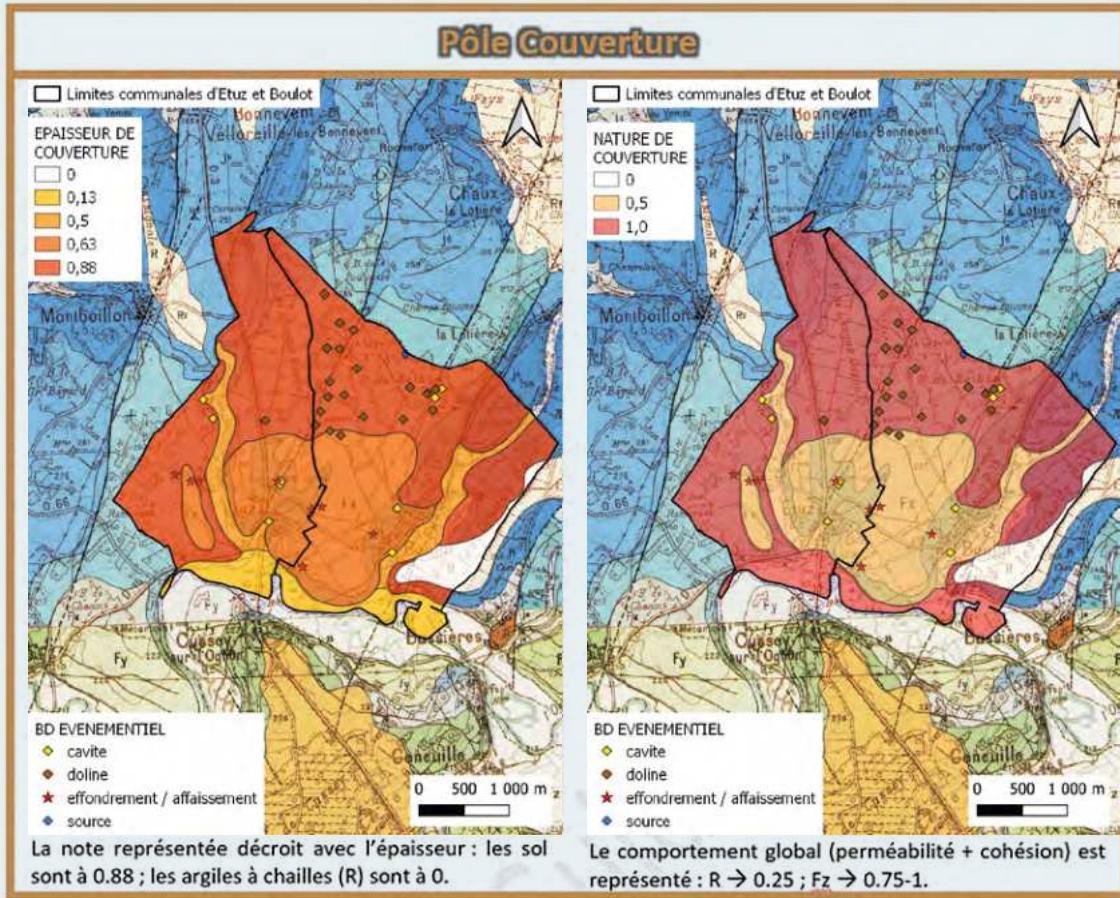


Figure 79 : Cartes unitaires de caractérisation des critères

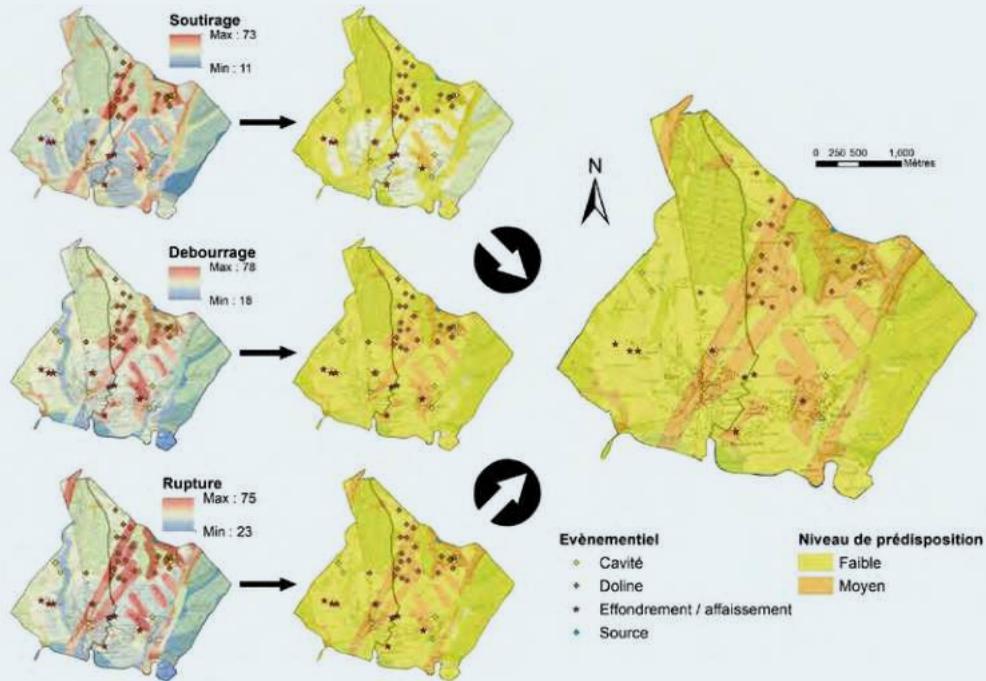


Figure 80 : Cartographies de la prédisposition des processus, traduites en niveaux, puis synthétisées en une carte (brute de prédisposition globale)

B-3 L'intensité

L'intensité correspond ici au diamètre en surface d'un potentiel désordre.

Sur le périmètre d'étude étendu, six désordres disposent d'informations sur leurs dimensions : elles varient beaucoup, entre 0,5 m et 23 m de diamètre (ce dernier diamètre résultant certainement d'un agrandissement post-effondrement) et en réalité, seuls trois désordres sont connus de manière fiable. Les processus ayant abouti à ces désordres n'ont par ailleurs pas toujours été diagnostiqués et ne peuvent plus l'être a posteriori. Vu ces incertitudes, la **sinistralité historique** du site n'a pas été ici utilisée pour évaluer l'intensité.

Une **évaluation déterministe** a cherché à considérer les vides de départ et le comportement de la couverture, mais l'épaisseur de cette dernière s'est révélée très variable et avec un nombre insuffisant d'observations pour disposer de valeurs fiables et cartographiables.

Pour ces raisons, l'intensité n'a finalement pas été caractérisée.

B-4 Résultats finaux

L'intensité étant considérée comme inévaluable de manière fiable, l'obtention de l'aléa (par croisement prédisposition X intensité) se révèle également infaisable en l'état.

À la place, **il a été choisi de présenter une carte de prédisposition corrigée** (cf. figure 81). Ces corrections ajustent la carte brute sur trois aspects. Elles lissent tout d'abord les incertitudes spatiales en considérant le niveau le plus fort dans un tampon de 25 m autour des limites brutes établies. Elles éliminent également les « micro-zones » (de largeur inférieure à 100 m) en les faisant passer dans les niveaux de prédispositions supérieurs voisins. Quelques dires d'expert gomment enfin de rares incohérences, au cas par cas et selon le contexte local. **65 % du territoire sont au final couverts par un niveau faible et 35 % par un niveau moyen.**

La **cohérence** globale de la carte a été vérifiée en analysant la répartition des formes karstiques suivant les niveaux obtenus :

- concernant les désordres : Les trois désordres les plus connus sont localisés en niveau moyen. Pour les cinq autres mouvements plus incertains : trois sont en niveau faible et deux à proximité d'un niveau moyen.
- concernant les cavités karstiques « anciennes » : 17 dolines sur 21 et 6 cavités sur 9 se trouvent en niveau moyen.

Le rapport inclut par ailleurs un **retour d'expérience** des opérateurs sur la méthode utilisée.

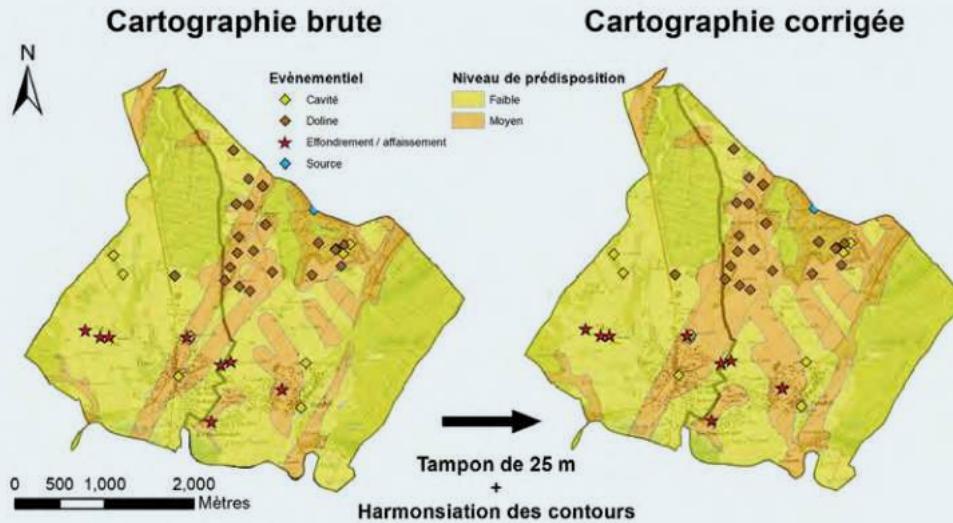


Figure 81 : Carte finale retenue = carte de prédisposition corrigée

ALÉA MOUVEMENTS DE TERRAIN D'ORIGINE KARSTIQUE EN CONTEXTE CARBONATÉ

ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE

Des effondrements et affaissements liés au karst peuvent se produire sur une large part du territoire français et menacer la sécurité des biens et des personnes. Gérer ces risques implique avant tout de bien connaître les phénomènes en cause.

Ce guide vise à aider les acteurs de l'aménagement du territoire et de la construction en fournissant tout d'abord les clés géologique et géotechnique pour comprendre les processus à l'origine de ces mouvements de terrain. Il propose également une méthode multicritère pour évaluer et cartographier cet aléa de manière prédictive. L'approche est valable à l'échelle communale et pluri-communale ; elle peut aussi être déclinée à l'échelle du site. Des exemples sont enfin proposés pour illustrer la méthode et guider l'utilisateur dans ses études.

CEREMA

Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand,
CS92803
69674 Bron Cedex
04 72 14 30 30
www.cerema.fr

BRGM

Centre scientifique
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009
45060 Orléans cedex 2
02 38 64 34 34
www.brgm.fr

Version numérique

ISBN : 978-2-37180-598-9



ISBN : 978-2-7159-2817-6



Version papier

ISBN : 978-2-37180-597-2



ISBN : 978-2-7159-2816-9

