



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE,
DE L'ÉNERGIE, DU CLIMAT
ET DE LA PRÉVENTION
DES RISQUES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**Direction générale de
la prévention des risques**

Paris, le **06 DEC. 2024**

Service des risques naturels
Sous-direction des aléas et des ouvrages hydrauliques
Bureau des risques naturels terrestres

La cheffe de service des risques naturels
aux
destinataires *in fine*

Nos réf. : 2024-55-SDCAP-MH

Affaire suivie par : Margaret HERBAUX

Tel. : 01 40 81 89 25

Courriel : margaret.herbaux@developpement-durable.gouv.fr

Objet : méthodologie de caractérisation de l'aléa effondrement localisé

- Annexe 1 : addendum du guide méthodologique « *Plan de prévention des risques naturels - Cavités souterraines* » de 2012
- Annexe 2 : note technique décrivant les éléments d'homogénéisation de la caractérisation de l'aléa d'effondrement localisé lié aux cavités souterraines

La présente note expose les résultats des travaux menés en lien avec vos services sur l'homogénéisation de la caractérisation de l'aléa d'effondrement localisé lié à la présence de cavités souterraines.

Le territoire français est exposé aux risques liés à la présence de cavités souterraines dues à l'exploitation humaine (anciennes carrières souterraines). Ces cavités peuvent, par dégradation naturelle, générer des affaissements ou des effondrements en surface potentiellement dangereux pour les personnes et les biens.

Dans les territoires fortement exposés, le plan de prévention des risques naturels prévisibles est un outil à privilégier pour prévenir ce type de risques. À ce titre, le guide méthodologique intitulé « *Plan de prévention des risques naturels (PPR) - Cavités souterraines abandonnées* » a été établi en 2012 pour aider les services déconcentrés de l'État à mettre en œuvre cette procédure pour le cas des cavités souterraines, notamment la phase d'évaluation de l'aléa. Ce guide constitue également une aide opérationnelle aux services instructeurs et aux bureaux d'étude chargés de l'évaluation de l'aléa et de l'appréciation des enjeux.

Vous nous avez fait part de difficultés rencontrées lors de l'établissement de PPR « cavités souterraines », liées aux hétérogénéités constatées lors de l'évaluation et de la cartographie des aléas dus aux cavités souterraines par les bureaux d'études ou les opérateurs chargés de leur réalisation.

ecologie.gouv.fr

Tour séquoia, 1 place Carpeaux
92055 La Défense cedex

Pour répondre à cette problématique, la DGPR a constitué un groupe de travail. Piloté par l'Ineris, il a réuni des représentants de services déconcentrés, les opérateurs de l'État impliqués sur la thématique des cavités (Ineris, Cerema et BRGM) et plusieurs services de collectivités chargés du suivi d'anciennes carrières. Ces travaux ont mis en évidence la nécessité de mettre à jour ou préciser certains éléments du guide méthodologique, notamment les parties traitant **de l'évaluation et de la caractérisation de l'aléa d'effondrement localisé**.

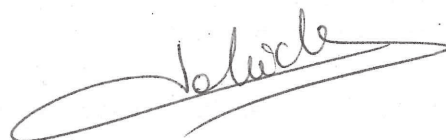
Ces travaux ont abouti à de nouvelles rédactions pour évaluer et cartographier l'aléa de manière homogène sur l'ensemble du territoire national.

Les éléments nouveaux portent sur :

- ✓ la qualification de l'intensité pour les effondrements localisés : en cohérence avec la doctrine relative aux effondrements localisés d'origine minière, est désormais retenue **la valeur limite de 5 m** entre une intensité de niveau limité et une intensité de niveau modéré (au lieu de 3 m) ;
- ✓ la notion de « *présomption de présence de vide* » est remplacée par la notion d'« *emprise de cavités supposées* » de façon à cartographier de manière justifiée, sur la base d'éléments historiques, les zones où la présence de cavités est supposée ;
- ✓ la notion de « *marge de sécurité* » est remplacée, pour plus de clarté, par « *marge d'aléa* ». La méthode de cartographie de la « *marge d'incertitude* » et de la « *marge de reculement* » est précisée.

Vous trouverez en annexe les informations techniques sur ces sujets :

- l'annexe 1 présente les compléments et modifications apportés au guide méthodologique « *Plan de prévention des risques naturels - Cavités souterraines abandonnées* » de 2012, sous la forme d'un addendum ;
- l'annexe 2, élaborée par l'Ineris, présente les éléments techniques ayant conduit à ces modifications.



Véronique Lehideux

Liste des destinataires :

Mesdames et messieurs les directeurs départementaux des territoires (et de la mer)

Mesdames et messieurs les directeurs régionaux de l'environnement, de l'aménagement et du logement

Madame la directrice régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports d'Ile-de-France

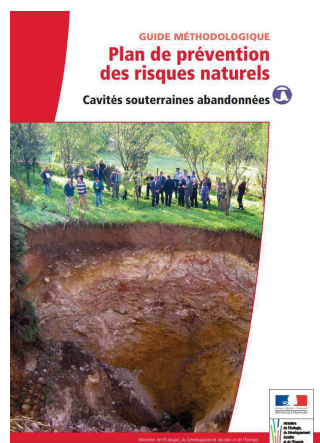
Madame et messieurs les directeurs de l'environnement, de l'aménagement et du logement

Monsieur le directeur de l'environnement, de l'aménagement, du logement et de la mer de Mayotte

Monsieur le directeur général des territoires et de la mer de Guyane

Madame la directrice des territoires, de l'alimentation et de la mer de Saint-Pierre-et-Miquelon

Annexe 1 : addendum du guide méthodologique « *Plan de prévention des risques naturels - Cavités souterraines abandonnées* » de 2012



Guide Méthodologique Plan de prévention des risques naturels Cavités souterraines abandonnées

Addendum

Novembre 2024

En référence au guide méthodologique sur les plans de prévention des risques naturels - Cavités souterraines abandonnées¹ de 2012, cet addendum vise à préciser quels éléments sont modifiés ou complétés, plus spécifiquement sur l'évaluation et la cartographie de l'aléa d'effondrement localisé. Des éléments plus précis sont disponibles dans la note en **annexe 2** intitulée « *Éléments d'homogénéisation de la caractérisation de l'aléa d'effondrement localisé lié aux cavités souterraines* ».

¹ Guide disponible sous :

https://osmose.numerique.gouv.fr/jcms/p_3171874/fr/mte-espace-national-risques-naturels?documentKinds=&explorerCurrentCategory=p_8564333&mids=&portlet=p_3171872&types=ALL&displayedPublication=319264524_DBFileDocument

Le tableau page 39 « Hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement localisé » :

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (« flache » de profondeur centimétrique)
Limitée	$\emptyset < 3 \text{ m}$
Modérée	$3 \text{ m} < \emptyset < 10 \text{ m}$
Élevée	$\emptyset > 10 \text{ m}$

Est modifié comme suit :

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrement auto-remblayé à proximité immédiate de la surface (« flache » de profondeur centimétrique)
Limitée	$\emptyset < \mathbf{5 \text{ m}}$
Modérée	$\mathbf{5 \text{ m}} < \emptyset < 10 \text{ m}$
Élevée	$\emptyset > 10 \text{ m}$

Considérant les évolutions récentes des classes d'intensité liées aux phénomènes analogues d'effondrements localisés d'origine minière (sur la base des dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de type fontis établi par le Centre scientifique et technique du bâtiment), **le seuil entre l'intensité limitée et modérée passe de 3 m à 5 m.**

En complément des paramètres déjà énumérés en pages 43 et 44, le tableau suivant précise les critères d'appréciation du niveau de prédisposition d'une zone à la manifestation du phénomène d'effondrement localisé jusqu'en surface sur un site donné :

Prédisposition d'une zone à la manifestation d'un effondrement localisé	Critères d'appréciation	
	Cavité accessible	Cavité non accessible
Très sensible	Plusieurs fontis en surface se sont déjà produits sur le site concerné <u>ou</u> le site présente des conditions de stabilité souterraines très dégradées (piliers ruinés, chutes de toits observés, suivi instrumenté évolutif) avec des lithologies, des profondeurs et des volumes de vide favorables au développement du phénomène <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.	Plusieurs fontis en surface se sont déjà produits sur le site concerné
Sensible	Un fontis s'est déjà produit sur le site concerné ou le phénomène s'est déjà produit sur un site similaire au site concerné <u>et</u> Le site présente des configurations peu dégradées (observation ou suivi instrumenté peu évolutif) mais les caractéristiques du site et le retour d'expérience définissent comme possible la réalisation du phénomène sur le site concerné (notamment une profondeur et un volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.	Un fontis s'est déjà produit sur le site concerné ou le phénomène s'est déjà produit sur un site similaire au site concerné <u>et</u> Les conditions sont remplies pour que le phénomène se produise sur le site concerné à l'échelle de vies humaines (certitude sur l'existence de cavités, connaissance suffisante des caractéristiques permettant de démontrer l'initiation et la réalisation du phénomène, lithologie, profondeur et volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.
Peu sensible	Aucun fontis en surface n'est recensé sur site ni sur site similaire <u>et</u> Le site présente des configurations non dégradées (observation ou suivi instrumenté non évolutif) mais les caractéristiques du site et le retour d'expérience définissent comme possible la réalisation du phénomène sur le site concerné (notamment une profondeur et un volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Aucun facteur aggravant susceptible de favoriser ou déclencher le phénomène n'est connu.	Aucun fontis en surface n'est recensé sur site ni sur site similaire <u>et</u> Les conditions sont remplies pour que le phénomène se produise sur le site concerné à l'échelle de vies humaines (certitude sur l'existence de cavités, connaissance suffisante des caractéristiques permettant de démontrer l'initiation et la réalisation du phénomène, lithologie, profondeur et volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Aucun facteur aggravant susceptible de favoriser ou déclencher le phénomène n'est connu.
Non sensible	Les configurations observées, les caractéristiques connues (remblayage total ou quasi total, profondeur, foisonnement) ainsi que le retour d'expérience permettent d'écarter toute réalisation du phénomène. Exemples : • cas d'une cavité remblayée dans les règles de l'art ; • cas d'une cavité a priori auto-comblée par foisonnement (en cas d'effondrement) ; • cas d'une cavité effondrée où les conditions de nouveaux effondrements ne sont plus remplies	

La notion de « **présomption de présence de vide** », détaillée page 43, est remplacée par la notion d'« **emprise de cavités supposées** ». Une **prédisposition forfaitaire « indéterminée »** est définie pour toutes les emprises de cavités supposées.

Le tableau page 46 proposant un exemple de grille de hiérarchisation des classes d'aléa :

EXEMPLE D'UNE GRILLE DE HIÉRARCHISATION DES CLASSES D'ALÉA			
Probabilité d'occurrence \ Intensité	faible	moyenne	forte
Très limitée (affaissements et effondrements autoremblayés)	faible	faible	moyen
Limitée (affaissements nets et petits fontis)	faible	moyen	moyen
Modérée (effondrements localisés)	moyen	moyen	fort
Élevée à très élevée (fontis importants et effondrement généralisé)	moyen	fort	très fort

Est remplacé, pour les effondrements localisés, par les deux tableaux suivants :

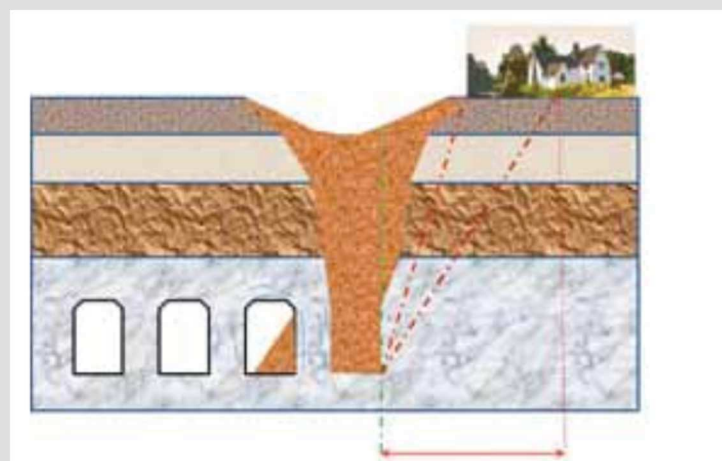
Cavité avérée		Prédisposition			
		Non sensible	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité	Très limitée	Pas d'aléa	Faible	Faible	Faible
	Limitée	Pas d'aléa	Faible	Faible	Moyen
	Modérée	Pas d'aléa	Faible	Moyen	Fort
	Élevée	Pas d'aléa	Moyen	Fort	Fort

Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour une cavité avérée

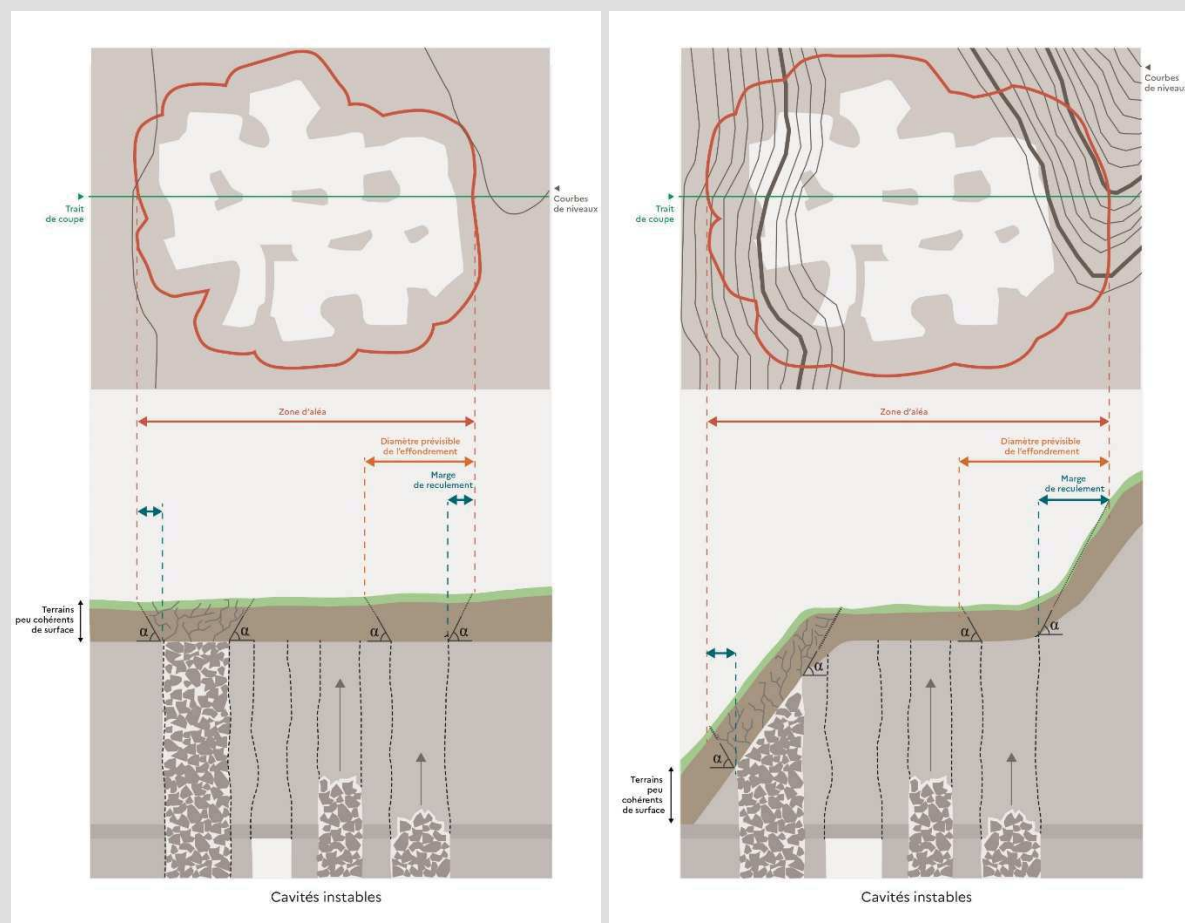
Emprise de cavité supposée		Prédisposition - indéterminée
Intensité	Très limitée	Faible
	Limitée	Faible
	Modérée	Faible
	Élevée	Moyen

Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour une emprise de cavité supposée

La figure page 48 relative à la marge de reculement :



Est remplacée par les deux figures suivantes de cartographie de la marge de reculement considérant, d'une part, une topographie de surface plane (figure de gauche) et, d'autre part, une topographie de surface pentée (figure de droite) :



Annexe 2 : éléments d'homogénéisation de la caractérisation de l'aléa d'effondrement

Éléments d'homogénéisation de la caractérisation de l'aléa d'effondrement localisé lié aux cavités souterraines

Destinataires : Margaret HERBAUX (DGPR)

Copies : Frédéric POULARD (Ineris)

PJ* :

* Indiquer si besoin la référence unique du(des) document(s) ou copier l'(les) hyperlien(s)

1. Objectifs

Dans les plans de prévention des risques naturels (PPRN) de mouvements de terrain, prenant en compte les risques d'effondrement et d'affaissement des cavités ou dans les PPRN de cavités, les zones qualifiées en aléa de niveau fort ou très fort, relatifs aux effondrements localisés, font le plus souvent l'objet de mesures d'interdiction de construire, et ce quelle que soit la nature des projets. Cependant, les niveaux d'aléa fort et très fort ne sont pas toujours définis de manière homogène. Ils peuvent être appréciés différemment selon le niveau d'intensité, d'une part, et selon la prédisposition, d'autre part.

Les services déconcentrés de l'État chargés de l'établissement de PPR et certaines collectivités concernées par le risque « cavités », ont souligné les hétérogénéités existantes dans l'évaluation et la cartographie des aléas liés aux cavités souterraines, selon les opérateurs ou les bureaux d'études qui sont chargés de leur réalisation.

Aussi, des réflexions ont été menées entre 2021 et 2024, afin de proposer un cadre partagé permettant d'évaluer et de cartographier l'aléa avec plus d'homogénéité sur l'ensemble du territoire national. Elles s'appuient sur les échanges entre les opérateurs de l'État impliqués sur la thématique des cavités (Ineris, Cerema et BRGM), certains services carrières (le service commun des carrières souterraines de la ville de Lille, le service d'inspection des carrières de la ville de Laon, l'Inspection générale des carrières (IGC) de Paris, le syndicat intercommunal « Études et prévention des risques carrières et falaises de gironde » (EPRCF33) et le syndicat intercommunal d'Indre-et-Loire Cavités 37), les services déconcentrés de l'État (DREAL et DDT) et la DGPR.

Dans ce cadre, il a été décidé de travailler prioritairement sur l'aléa d'effondrement localisé, celui-ci étant le plus couramment retenu et analysé dans les études d'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Aussi, les évaluations des aléas d'effondrement généralisé et affaissement ne sont pas traitées ici. L'évaluation des aléas de mouvements de terrain liés aux cavités dans des contextes spécifiques tels que la dissolution du gypse, le karst et les versants sous-cavés est détaillée dans des guides dédiés [5] [6] [7].

Les propositions de la présente note synthétisent l'ensemble de ces travaux et réflexions. Ces propositions viennent compléter ou modifier certaines notions abordées dans le guide Plan de prévention des risques naturels (PPRN) sur les cavités souterraines abandonnées de 2012 [1] (pages 37 à 52). Pour plus de clarté, les chapitres de cette note sont repris dans le même ordre que ceux du guide PPRN cavités. Pour chaque partie, les éléments les plus importants, issus du guide PPRN cavités sont repris textuellement en début de chapitre et sont suivis des compléments ou modifications à prendre en considération.

Remarques : L'évaluation et la cartographie de l'aléa d'effondrement localisé, telles que définies dans cette note, seront à appliquer aux nouvelles études d'aléa. Il n'y a pas lieu de réviser immédiatement toutes les études d'aléa déjà produites.

2. Propositions

2.1. Généralités (pages 37-42 du guide PPRN cavités)

2.1.1. Définition et concepts

Dans le guide PPRN cavités

Page 37 : dans l'optique de prévention des risques et d'aménagement du territoire telle que retenue dans le cadre de l'élaboration d'un PPRN, la période de référence pour identifier le niveau d'aléa est généralement le long terme correspondant à l'échéance centennale. Il est ainsi nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des caractéristiques du massif.

Page 42 (partie prédisposition) : dans une optique de prévention des risques et d'aménagement du territoire telle que retenue dans le cadre de l'élaboration d'un PPRN, il convient d'évaluer la prédisposition d'un site à l'apparition d'instabilité en surface dans le long terme (sur les 100 prochaines années) et de tenir compte du vieillissement inéluctable du matériau rocheux et de sa dégradation mécanique dans le temps. À ce titre, on rappellera que certains matériaux sont particulièrement évolutifs à court terme comme le gypse ou les argiles.

Compléments

La notion de temps dans l'évaluation de l'aléa intervient notamment dans l'évaluation de l'intensité et de la prédisposition (les deux principales composantes d'un aléa). Aussi, afin que celle-ci soit intégrée de façon homogène, il semble nécessaire de définir une échelle temporelle commune.

Sur la base de la proposition d'échelle temporelle du guide éboulement du LCPC, [8], nous proposons de retenir, pour la gestion du risque cavités, les termes et délais suivants :

- Imminent : de quelques jours à quelques mois (cette notion est notamment utilisée par le maire pour prescrire l'exécution des mesures de sûreté) ;
- Court terme : quelques années ;
- Long terme : une centaine d'années.

Remarque : il ne s'agit pas ici de quantifier une échelle de temps pour développer une approche probabiliste quantitative mais plutôt de préciser les ordres de grandeurs des délais classiquement retenus en évaluation des aléas cavités (court et long terme, voir ci-après). Les autres niveaux temporels (très court terme et moyen terme) ne sont pas précisés ici car difficilement applicables à la gestion du risque cavités.

Notion de temps pour évaluer la prédisposition

La notion de « vieillissement inéluctable dans le temps des caractéristiques du massif » du Guide PPRN Cavités apparaît comme peu adaptée (l'association des termes « vieillissement inéluctable » renvoie à une certaine fatalité, qui n'est pas du tout la même pour toutes les cavités, certaines se dégradant très peu alors que d'autres connaissent des évolutions significatives d'année en année). Il est proposé de ne conserver que la notion de « dégradation des caractéristiques » au cours du temps.

Notion de temps pour évaluer l'intensité

Dans le cas d'un mouvement de terrain lié à la présence de cavités souterraines, il est d'usage de tenir compte d'une évolution au maximum à court terme, et plus habituellement de l'ordre d'une année, pour évaluer les dimensions du désordre attendu en surface. En effet, dans certains contextes ou considérant les délais administratifs, les désordres (fontis) rester généralement « ouverts » sur ces échelles de temps avant traitement. L'estimation de l'intensité (à l'ouverture du fontis) ne considère donc pas le talutage à long terme des terrains qui se poursuit de façon naturelle, indépendamment du phénomène concerné, en lien principalement avec les facteurs exogènes (comme les précipitations par exemple).

Remarque : même si la notion de temps est utilisée pour évaluer la prédisposition ou l'intensité, il est important de garder à l'esprit que la prévision du moment de la survenue d'un événement de type effondrement localisé reste extrêmement difficile.

2.1.2. Notion d'aléa de référence

Dans le guide PPRN cavités

Page 38 : 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.

Compléments

L'aléa de référence doit être défini par configurations homogènes (géologie, méthode d'exploitation, profondeur...similaires). Si les facteurs, ayant contribué au déclenchement et au développement de l'événement historique le plus important, ne sont plus réunis sur le site étudié ou que les configurations sont différentes pour les autres cavités du site, cet effondrement ne pourra pas constituer l'aléa de référence pour l'ensemble du site étudié. Ce choix se justifie par exemple lorsque l'effondrement le plus important a eu lieu au moment de l'exploitation et que les causes de cet effondrement (retrait de piliers, tir de mine...) ne se reproduiront plus en contexte post-exploitation. Aussi, un même site d'étude pourra intégrer plusieurs aléas de référence si plusieurs configurations homogènes de cavités sont définies.

Il est important de préciser que, dans le cas des cavités souterraines, le terme « aléa de référence » n'est pas forcément adapté puisqu'en réalité il s'agit d'une intensité de référence (diamètre de l'effondrement le plus important observé sur un secteur homogène).

Cette intensité de référence, par conséquent la plus importante, ne signifie pas systématiquement une intensité de niveau élevée. Cette intensité peut être de niveau modérée (voir limitée en toute théorie). Elle doit être représentative du plus important diamètre de désordre observé ou, en l'absence de désordre, du plus important diamètre calculé sur la base de caractéristiques des cavités et terrains de recouvrement (notamment superficiels). Ceci permet une évaluation homogène sur l'ensemble du territoire français.

2.2. Qualification de l'intensité de l'aléa (pages 38 à 41 du guide PPRN cavités)

2.2.1. Généralités – principe de qualification

Dans le guide PPRN cavités

Page 38 : l'intensité du phénomène caractérise l'ampleur des répercussions attendues. [...] La démarche d'évaluation consiste tout d'abord à identifier la grandeur physique la plus représentative permettant de caractériser les conséquences des événements redoutés. [...] Pour ce faire, il faut pouvoir se rapporter à des classes d'intensité définies et, de fait, à des valeurs seuils permettant de différencier ces classes. Cette approche renvoie à la notion de gravité des phénomènes. [...] Cette gravité peut s'appliquer aux personnes (victimes), aux biens (dégâts) ou aux activités (limites d'usage) [...] pour les conséquences des événements sur les biens (bâti et infrastructures), on s'attache à regrouper les phénomènes en fonction de la difficulté et du coût de mise en œuvre des mesures qu'il s'avérerait nécessaire d'entreprendre pour prévenir tout désordre ou réparer les dommages engendrés.

Compléments

Pour rappel, la notion d'intensité est utilisée pour tout type d'aléa naturel. L'évaluation de l'aléa résulte du croisement de l'intensité du phénomène attendu et de la probabilité d'occurrence ou prédisposition d'un site à voir se développer ce phénomène. Cette notion est notamment précisée dans l'article L. 562-1 du code de l'environnement : les PPR « *ont pour objet, en tant que de besoin de délimiter les zones exposées aux risques, en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru* ».

2.2.2. Qualification de l'intensité pour les effondrements localisés

Dans le guide PPRN cavités

Page 39 : l'aspect général d'un effondrement localisé de terrain, quelle que soit son origine, ayant souvent la forme d'un cratère, c'est le diamètre de l'effondrement qui influera sur les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes, des biens et activités dans la zone d'influence du désordre. [...] La profondeur du cratère peut également influencer sur la dangerosité du phénomène mais elle s'avère délicate à prévoir, notamment pour ce qui concerne les fontis et les débousses de puits. Ce critère n'a donc pas été retenu comme décisif.

Le Tableau 1 présente la hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement localisé ainsi que les conséquences redoutées (p 39 et 40 du guide PPRN cavités).

Classe d'intensité	Critère	Conséquences redoutées
Très limitée	Effondrement auto-remblayés à proximité de la surface	« Flache » de profondeur centimétrique
Limitée	Diamètre de l'effondrement < 3 m	Trou éventuellement profond mais suffisamment étroit pour ne pas affecter immédiatement une fondation classique
Modérée	Diamètre de l'effondrement compris entre 3 et 10 m	Cratère + ou – profond et suffisamment large pour ruiner une construction récente en béton même sur radier
Élevée	Diamètre de l'effondrement > 10 m	Cratère important avec parois abruptes et risques d'engloutissement du bâti

Tableau 1 : Hiérarchisation des classes d'intensité de l'effondrement localisé (Guide PPRN cavités)

Compléments

En règle générale, au sein des études analysées, les classes d'intensité utilisées sont relativement homogènes et conformes au guide PPRN cavités. Néanmoins, des évolutions ont été apportées aux classes d'intensité liées aux phénomènes analogues d'effondrements localisés d'origine minière (nouvelle version en 2017 du guide « évaluation de l'aléa minier » [3]), dont la valeur seuil entre une intensité de niveau limité et modéré, a évolué d'un diamètre de 3 m à 5 m.

Cette évolution tient compte notamment du guide du CSTB [4] intitulé « Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de type fontis » dans lequel le CSTB fournit des dispositions constructives pour le bâti neuf pouvant être affecté par un effondrement localisé en utilisant le seuil de 5 m pour les définir (diamètre maximal admissible pour les constructions soumises à un effondrement localisé). En effet, au-delà de cette limite, le comportement des ouvrages est très fortement tributaire des dispositions particulières adoptées pour la construction et très sensible aux dimensions des fontis. De ce fait, lorsque les diamètres de fontis susceptibles de se produire dépassent 5 mètres, les dispositions de ce guide ne sont plus applicables. Dans ce guide, les modèles utilisés tiennent compte de l'action du fontis comme une perte d'appuis des structures (de type habitat), en considérant la position la plus défavorable du fontis par rapport à celle-ci, tout en acceptant un niveau d'endommagement maximal de niveau 3 (portes coincées et canalisations rompues).

Aussi, ces dispositions étant établies pour tout effondrement localisé de diamètre inférieur à 5 m, il a été choisi d'appliquer cette valeur limite entre une intensité de niveau limité et une intensité de niveau modéré (valeur qui n'affecte pas immédiatement une fondation classique).

Le choix de s'intéresser aux dispositions constructives pour le bâti, et pas à d'autres types d'enjeux, tient compte principalement du fait que d'un point de vue financier, c'est le propriétaire individuel qui sera le plus impacté puisqu'il est responsable des dommages liés aux cavités souterraines présentes sous sa parcelle (articles 552, 553 et 1384 du code civil).

Les nouvelles classes d'intensité proposées sont détaillées dans le Tableau 2.

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrement auto-remblayé à proximité immédiate de la surface (« flache » de profondeur centimétrique)
Limitée	$\varnothing < 5 \text{ m}$
Modérée	$5 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Élevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Tableau 2 : Nouvelles classes d'intensité pour définir l'aléa d'effondrement localisé

L'intensité du phénomène d'effondrement localisé est définie à partir des dimensions du cratère susceptible d'apparaître au jour. Ce cratère est issu de l'évasement d'une colonne vide formée autour de la galerie (ou

de la chambre d'exploitation) par éboulement des terrains. La dimension de la section de cette colonne est directement liée à la largeur de la galerie (ou de la chambre) ainsi qu'à la nature et à la qualité des matériaux de surface. La présence d'effondrement localisé en surface permet de bénéficier d'une référence quant aux diamètres possibles des effondrements localisés attendus (en lien avec l'intensité de référence, voir paragraphe 2.1.2).

2.3. Qualification de la probabilité d'occurrence (pages 41 à 44 du guide PPRN cavités)

Dans le guide PPRN cavités

Page 41 : plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période de retour donnée (annuelle, centennale, décennale...), qui laisserait une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en termes de prédisposition du site vis-à-vis d'un type de rupture.

L'identification des classes de prédisposition est une démarche délicate qui relève, en pratique, de l'expertise du spécialiste. Elle doit cependant être décrite et explicitée avec la plus grande attention, de manière à rendre la démarche aussi transparente que possible vis-à-vis des différentes parties prenantes impliquées dans l'élaboration puis la mise en œuvre du PPRN. À ce titre, deux notions primordiales doivent être prises en compte dans cette justification : la prédisposition à la rupture et la présomption de présence de vides.

2.3.1. Prédisposition à la rupture

Dans le guide PPRN cavités

Page 41 : la prédisposition d'un site à l'apparition de désordres est évaluée en fonction de paramètres caractérisant l'environnement du secteur considéré et le type d'exploitation. La détermination de cette prédisposition s'appuie, en premier lieu, sur le retour d'expérience [...]. L'examen géotechnique des cavités souterraines, lorsqu'elles sont visitables, conforte également le jugement de l'expert sur les niveaux de prédisposition à la rupture [...]. En complément de cette analyse, en retour d'expérience, la détermination de la prédisposition repose également sur la connaissance des scénarios d'instabilité des cavités [...].

Compléments

Concernant les galeries (et les chambres d'exploitation) souterraines, l'évaluation de la prédisposition d'un site à l'apparition d'un effondrement localisé intègre deux mécanismes successifs : la rupture souterraine puis la propagation de l'effondrement vers la surface.

Ainsi, l'évaluation de la prédisposition d'un site à l'apparition d'un effondrement localisé dépend de trois groupes de paramètres :

- la présence de phénomènes analogues sur le site ou dans des configurations (géologie, conditions d'exploitation...) d'autres sites identiques ou proches ;
- des paramètres liés à la prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain : il s'agit principalement des caractéristiques dimensionnelles des cavités (largeur notamment), de l'état des structures souterraines¹ (toit des cavités et piliers abandonnés en particulier) et de la nature des premiers bancs du toit (épaisseur, résistance, fracturation) ;
- des paramètres liés à la prédisposition à la remontée de l'instabilité jusqu'en surface : on retrouve ici la nature et l'épaisseur des bancs du recouvrement qui détermineront le coefficient de foisonnement ou la formation d'une voûte stable.

À ces paramètres peuvent s'ajouter un certain nombre de facteurs aggravants ou déclenchants comme l'hygrométrie et l'altération du milieu, la mise en charge hydraulique ou encore des facteurs anthropiques (activités en surface notamment).

Ces différents paramètres sont déjà énumérés dans le guide PPRN cavités souterraines, [1]. Ils sont repris de façon synthétique dans le Tableau 3. Des éléments complémentaires, plus qualitatifs, sont également disponibles dans le guide technique « Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines », [2], notamment les outils d'analyse (modèles de calcul) qui peuvent être utilisés pour évaluer la stabilité des ouvrages et/ou la remontée en surface des effondrements.

¹ L'état de la cavité n'est pas un facteur aggravant vis-à-vis du niveau d'aléa défini. Il s'agit d'un critère de prédisposition à la rupture qui doit être intégré de façon globale lors de l'expertise.

Remarque n°1 : dans la mesure du possible (lorsque l'accessibilité et les conditions de sécurité l'autorisent) des visites de terrain et des inspections souterraines se doivent d'être réalisées, notamment en zone d'enjeux. En effet, ces inspections apportent des éléments fondamentaux pour l'appréciation de nombreux critères de qualification de l'aléa.

Remarque n°2 : lorsque des études détaillées, qui auraient été réalisées dans le passé, existent, notamment des diagnostics géotechniques et de la surveillance, il est indispensable d'intégrer leurs analyses dans l'évaluation de la prédisposition.

Effondrement localisé			
Paramètres	Prédisposition à la rupture et à l'éboulement du toit de la cavité	Prédisposition à la rupture de piliers isolés	Prédisposition à la remontée de l'instabilité en surface
Observations Retour d'expérience	Observation : état de fracturation du toit (naturelle et/ou mécanique) ou de chutes de toit	Observation : état de fracturation des piliers (naturelle et/ou mécanique) ou de piliers ruinés	Observation : fontis en surface
Caractéristiques des cavités	Largeur (ou portée) du toit des chambres ou des galeries concernées au regard de l'épaisseur des bancs de toit	Caractéristiques des piliers concernés (résistance, sensibilité à l'eau, section, élancement, forme, régularité, superposition en cas d'exploitation sur plusieurs niveaux, etc.)	Volume des vides résiduels en profondeur (intégrant l'existence de remblayage)
Caractéristiques des terrains de toit / de recouvrement	Nature et épaisseur des premiers bancs rocheux de toit et/ou du matériau exploité	Contraintes s'exerçant au sein du massif (tributaires notamment du taux de défrètement local et de la profondeur des vides)	Nature (coefficient de foisonnement) et épaisseur des terrains de recouvrement
	Présence de poche karstique		Épaisseur et résistance du/des bancs au sein du recouvrement
Facteurs aggravants ou déclenchant : hygrométrie et altération du milieu, fluage et influence du temps (vieillissement du matériau et dégradation de ses propriétés), mise en charge hydraulique, activité sismique et facteurs anthropiques (activités en surface), végétation de surface (réseau racinaire)			

Tableau 3 : Principaux paramètres pour l'évaluation de la prédisposition d'un site à l'apparition d'un effondrement localisé

Dans un souci d'homogénéisation, le Tableau 4 identifie et précise les principaux critères d'appréciation pour chaque classe de prédisposition à l'apparition d'un effondrement localisé liés aux cavités souterraines. Trois classes sont ainsi définies : très sensible, sensible et peu sensible. Des précisions sont également apportées pour des sites classés non sensibles au regard des critères disponibles.

Prédisposition d'une zone à la manifestation d'un effondrement localisé	Critères d'appréciation	
	Cavité accessible	Cavité non accessible
Très sensible	Plusieurs fontis en surface se sont déjà produits sur le site concerné <u>ou</u> le site présente des conditions de stabilité souterraines très dégradées (piliers ruinés, chutes de toits observés, suivi instrumenté évolutif) avec des lithologies, des profondeurs et des volumes de vide favorables au développement du phénomène <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.	Plusieurs fontis en surface se sont déjà produits sur le site concerné
Sensible	Un fontis s'est déjà produit sur le site concerné ou le phénomène s'est déjà produit sur un site similaire au site concerné <u>et</u> le site présente des configurations peu dégradées (observation ou suivi instrumenté peu évolutif) mais les caractéristiques du site et le retour d'expérience définissent comme possible la réalisation du phénomène sur le site concerné (notamment une profondeur et un volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.	Un fontis s'est déjà produit sur le site concerné ou le phénomène s'est déjà produit sur un site similaire au site concerné <u>et</u> Les conditions sont remplies pour que le phénomène se produise sur le site concerné à l'échelle de vies humaines (certitude sur l'existence de cavités, connaissance suffisante des caractéristiques permettant de démontrer l'initiation et la réalisation du phénomène, lithologie, profondeur et volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Le site peut présenter des facteurs aggravants pouvant déclencher le phénomène.
Peu sensible	Aucun fontis en surface n'est recensé sur site ni sur site similaire <u>et</u> Le site présente des configurations non dégradées (observation ou suivi instrumenté non évolutif) mais les caractéristiques du site et le retour d'expérience définissent comme possible la réalisation du phénomène sur le site concerné (notamment une profondeur et un volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Aucun facteur aggravant susceptible de favoriser ou déclencher le phénomène n'est connu.	Aucun fontis en surface n'est recensé sur site ni sur site similaire <u>et</u> Les conditions sont remplies pour que le phénomène se produise sur le site concerné à l'échelle de vies humaines (certitude sur l'existence de cavités, connaissance suffisante des caractéristiques permettant de démontrer l'initiation et la réalisation du phénomène, lithologie, profondeur et volume de vide connus et favorables au développement du phénomène) <u>et</u> Aucun facteur aggravant susceptible de favoriser ou déclencher le phénomène n'est connu.
Non sensible	Les configurations observées, les caractéristiques connues (remblayage total ou quasi total, profondeur, foisonnement) ainsi que le retour d'expérience permettent d'écarter toute réalisation du phénomène. Exemples : • cas d'une cavité remblayée dans les règles de l'art ; • cas d'une cavité a priori auto-comblée par foisonnement (en cas d'effondrement) ; • cas d'une cavité effondrée où les conditions de nouveaux effondrements ne sont plus remplies	

Tableau 4 : Critères d'appréciation du niveau de prédisposition d'une zone à la manifestation du phénomène d'effondrement localisé jusqu'en surface sur un site donné

La prédisposition à la remontée de l'instabilité en surface (dernière colonne du Tableau 3) dépend principalement du ratio entre le volume du vide résiduel en profondeur et du volume des matériaux foisonnés (coefficient de foisonnement fonction de la nature des terrains de recouvrement). Différentes méthodes analytiques (issues du contexte minier) existent pour déterminer la hauteur de remontée prévisible en surface d'un fontis [9] :

- la méthode Piggott et Eynon (1977) ;
- la méthode de Whittlaker et Reddish (1989) ;
- la méthode de Vachat (1982) ;
- la méthode de Meier (1991) ;
- la méthode Ineris (1998).

Les principales différences entre ces différentes méthodes résident dans l'approche analytique retenue (en 2D ou en 3D,) la géométrie considérée des vides (volume disponible et volume de propagation) et la prise en compte du volume réel de matériaux éboulés.

Le Tableau 5 fournit, en fonction des types de sols rencontrés, les gammes de valeurs de coefficient de foisonnement (K) à prendre en considération pour l'évaluation de la prédisposition.

Nature de terrain	Coefficient de foisonnement (f)	
	Matériau sec	Matériau humide ou saturé
Graves et sables alluvionnaires	1,25 à 1,30	1,15 à 1,20
Sables fins	1,25 à 1,30	1,20 à 1,30
Marnes et argiles cohérentes	1,35 à 1,40	1,25 à 1,35
Calcaire et craie	1,30 à 1,40	1,30 à 1,35
Roche	1,40 à 1,65	1,40 à 1,65

Tableau 5 : Tableau indicatif de valeurs de coefficient de foisonnement (A. Delfaut, 2007)

Concernant les puits, la prédisposition à l'effondrement doit tenir compte des deux mécanismes possibles : le débouillage du remblai au sein de celui-ci (conduisant à la présence d'un vide résiduel au sein de la colonne de puits) et la rupture de la tête de puits.

Le débouillage d'un remblai de puits est sensible aux variations du niveau d'eau dans l'ouvrage (remontée des eaux, battements de nappe), à la présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serremments pérennes, à l'ancienneté du remblayage et à l'existence de facteurs aggravants dans l'environnement du puits tels que les vibrations, les surcharges ou encore les arrivées d'eau (rejets, fuites...). D'une manière générale, l'hétérogénéité potentielle du remblai et le nombre de connexions au puits augmentent avec la profondeur de celui-ci. En l'absence d'éléments plus précis sur les puits, notamment pour les plus anciens, ce critère de profondeur est souvent pris en compte comme principal critère dans l'évaluation de la prédisposition. Il convient également d'apprécier la prédisposition à l'effondrement de la structure mise en place en tête du puits vide (plancher en bois, voûte en briques, dalle, bouchon...). Dans ce cas, ce sont les caractéristiques de cette structure (résistance, dimensions), son altérabilité dans le long terme, la nature du revêtement ou cuvelage du puits ainsi que la nature et la résistance des terrains encaissants qui influenceront directement sur cette prédisposition à la rupture.

Lorsque le puits est traité dans les règles de l'art, c'est-à-dire que des éléments tangibles et concrets permettent de juger de la pérennité du traitement (calcul de dimensionnement, recollement, plan de ferrailage, contrôle du volume des remblais, position du bouchon ou du serrement dans les terrains, etc.), la prédisposition sera considérée comme non sensible. Dans tous les autres cas de figure, l'ensemble des éléments détaillés ci-avant devront être analysés au cas par cas en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et du site.

2.3.2. Présomption de présence de vide

Dans le guide PPRN cavités

Page 42 : la notion de prédisposition d'un site à la rupture suffit dans le cas d'ouvrages connus et convenablement repérés. En l'absence d'information partielle ou totale, on est amené à introduire un autre concept, celui de présomption de présence de vides. Cette démarche permet de pondérer la prédisposition d'un site à l'apparition de désordres par une notion de présomption intégrant les lacunes d'informations. Il est souhaitable que la cartographie de l'aléa puisse mettre en évidence cette nuance.

En fonction de critères historiques et/ou techniques, lesquels doivent alors être exposés de manière précise et honnête, on peut classer les différents secteurs en fonction de la présence de vides allant de « improbable » à « très probable » voire « certaine ».

Compléments

Cette distinction, telle que définie, peut porter à confusion. En effet, une présomption ne peut pas être qualifiée d'improbable, probable ni de certaine, c'est la présence de vide qui peut l'être. De plus, la terminologie utilisée (présomption de présence de vide) ne retranscrit pas forcément la notion ciblée. En effet, dans le guide, ce concept consiste à intégrer les lacunes d'information sur la présence de cavité (ou notion de « cavités supposées »). Aussi, il est proposé que cette dernière terminologie soit adoptée et intégrée à une démarche séquentielle plus globale.

La notion de « cavités supposées » est basée principalement sur la capacité à cartographier de manière justifiée, sur la base d'éléments historiques, les zones où la présence de cavités est supposée (en l'absence de plan). Aussi, en fonction du contexte et des informations disponibles sur la localisation des cavités, plusieurs cas de figure peuvent être rencontrés. Quelques exemples de ce type de cavités supposées sont donnés à titre indicatif (liste non exhaustive) :

- localisation par rapport à une parcelle (demande d'exploitation sur la parcelle par exemple) ; dans ce cas, tout ou partie de la parcelle pourra être considérée comme une emprise de cavités supposées ;
- localisation selon un indice géographique (ex : au niveau de la rivière, près d'une intersection de route ou de chemin...), un indice géologique (à l'affleurement), un indice de cavités (puits) ou la présence de désordre ; dans ce cas, l'emprise des cavités supposées pourra être définie en tenant compte, par exemple, de la topographie ;
- localisation par rapport à des cavités avérées (ex : indication d'extension de cavités sur un plan sans que ceux-ci ne soient cartographiés ou documents d'archives précisant l'extension de cavités à partir de cavités avérées) ; dans ce cas, l'emprise des cavités supposées pourra être définie en fonction du contexte et des informations disponibles (extension connue, cavités entre deux secteurs avérés...). Aussi une même cavité pourra comporter une partie avérée et une partie supposée.

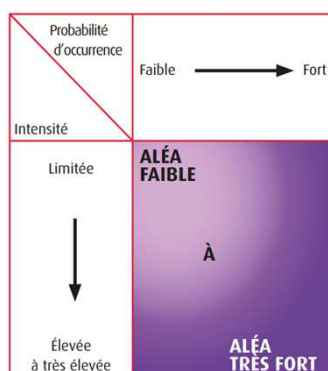
En l'absence d'information détaillée sur ces cavités (localisation, caractéristiques des cavités, état des cavités...), il est difficile de déterminer le niveau de prédisposition associé à ces emprises de cavités supposées. Aussi, il est proposé de définir une prédisposition forfaitaire comme indéterminée. Les principes d'évaluation de l'aléa et de la cartographie associée sont définis dans les paragraphes ci-après (2.4 et 2.5).

2.4. Détermination des classes d'aléa (page 45 du guide PPRN cavités)

Dans le guide PPRN cavités

Page 45 : s'il existe différentes méthodes de croisement (cotation, multicritères, etc.), il est fréquent de recourir au principe de matrice de croisement. Le principe de hiérarchisation est présenté dans le tableau suivant.

Chaque site étant spécifique, ce type de tableau devra être adapté au contexte qui le caractérise. Cette caractérisation a pour objectif de hiérarchiser les niveaux d'aléa, souvent restreints à 3 ou 4 (faible, moyen, fort, très fort) par défaut.



Compléments

L'aléa est défini par le croisement de l'intensité et de la prédisposition. La grille de croisement utilisée ne privilégie ni l'intensité ni la prédisposition pour déterminer le niveau d'aléa.

Pour les cavités avérées, le Tableau 6 présente une grille de croisement classique, telle qu'elle est habituellement utilisée en risques naturels ou en risques miniers. Cette classification distingue trois niveaux d'aléas : faible, moyen et fort.

Cavité avérée		Prédisposition			
		Non sensible	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité	Très limitée	Pas d'aléa	Faible	Faible	Faible
	Limitée	Pas d'aléa	Faible	Faible	Moyen
	Modérée	Pas d'aléa	Faible	Moyen	Fort
	Élevée	Pas d'aléa	Moyen	Fort	Fort

Tableau 6 : Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour une cavité avérée

Pour les cavités supposées, le niveau d'aléa est défini en se basant uniquement sur l'intensité des désordres attendu et en considérant une prédisposition inconnue. Le niveau d'intensité sera défini en fonction de l'intensité de référence, correspondant au plus important événement historique connu sur le secteur étudié ou à l'événement de plus grande ampleur considéré comme vraisemblable à une échéance de cent ans (voir chapitre 2.1).

Emprise de cavité supposée		Prédisposition - indéterminée
Intensité	Très limitée	Faible
	Limitée	Faible
	Modérée	Faible
	Élevée	Moyen

Tableau 7 : Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour une emprise de cavité supposée

Pour les secteurs « non cartographiables » (c'est-à-dire pour lesquelles les informations sont trop incertaines pour pouvoir cartographier explicitement les emprises de cavités supposées - exemple typique : carrière située au Nord de la commune), aucun aléa ne sera défini ni cartographié.

2.5. Cartographie de l'aléa – Notion de marge de sécurité (pages 45 à 48 du guide PPRN cavités)

Dans le guide PPRN cavités

Page 45 : l'aléa est un concept spatial, évalué en un point donné. Il a donc vocation à être cartographié sur l'ensemble du secteur d'étude de manière à faire ressortir les secteurs les plus sensibles au développement d'instabilités potentielles.

Page 47 : La cartographie de l'aléa concerne toujours les terrains de surface. Une attention toute particulière doit donc être portée à la notion de marge de sécurité qui regroupe à la fois l'incertitude spécifique :

- aux contours des vides souterrains par rapport à la surface (*marge d'incertitude*) ;
- à l'extension latérale possible des désordres en cas de remontée non verticale des éboulements (*marge de reculement*, *Figure 1*).

Page 48 : la prise en compte d'une marge de reculement est obligatoire pour tenir compte de la possible apparition de désordres sous des parcelles non directement sous-cavées. L'angle de rupture des terrains de recouvrement dépend étroitement de leur nature [...] En analysant la nature et la pente des terrains constituant le recouvrement ainsi que leur épaisseur respective [...], il est possible de définir une marge de reculement capable de caractériser le dépôt possible des désordres en périphérie des travaux.

Dans la marge de reculement, la zone d'extension du désordre sera affectée du même niveau d'aléa que celui à l'aplomb direct des travaux puisque cette auréole regroupe des terrains soumis aux mêmes phénomènes. Par contre, la zone susceptible de ne comporter que des tassements modérés, pourra faire l'objet d'une diminution du niveau d'aléa.

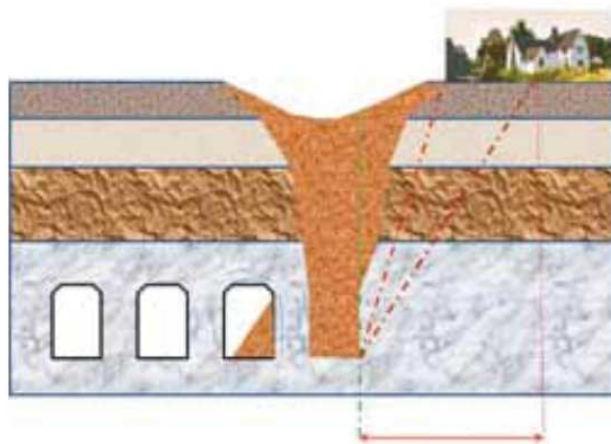


Figure 1 : Illustration de la marge de reculement (extrait du guide PPRN cavités)

Compléments

La cartographie de l'aléa doit intégrer une marge de sécurité qui est la résultante de deux marges distinctes, la marge d'incertitude et la marge de reculement :

- la marge d'incertitude, notée I, qui matérialise les incertitudes cartographiques dues à la précision des levés, des points de référence, du fond de plan utilisés et de son échelle, de l'assemblage des plans cadastraux (lorsque ce travail est nécessaire) et surtout du report fond – jour des plans des cavités. En fonction de la présence ou non de points de référence permettant un bon « calage » des plans (comme les puits repérés, par exemple), l'incertitude cartographique peut ne représenter que quelques mètres (plan récent avec des points remarquables levés au DGPS par exemple) pour atteindre une dizaine de mètres, voire davantage, dans certains cas (plans anciens, manque de repères fond – jour...) ;
- la marge de reculement, notée R, représente l'extension latérale possible des désordres initiés au sein des cavités souterraines. L'expérience montre en effet que les phénomènes redoutés ne se limitent pas à l'aplomb strict, en surface, des secteurs souterrains « sensibles » mais peuvent déborder, parfois très largement, sur des terrains adjacents. Cette marge s'étend jusqu'à une limite en surface matérialisée par l'angle d'influence des phénomènes. Elle dépend principalement de la nature des terrains de recouvrement et de la pente des terrains (et s'évalue dans le long terme).

Proposition n°1 : pour plus de clarté, il est proposé de renommer cette marge de sécurité en « marge d'aléa ».

Proposition n°2 : contrairement à ce qui est indiqué en page 48 du guide PPRN cavités de 2012, il n'a jamais été observé, sur site, au-delà de la zone effondrée ou talutée par l'effondrement (extension prise en compte dans la marge de recule), de terrains ayant subi des tassements. La caractérisation de la zone d'influence tient compte uniquement de l'épaisseur des terrains peu cohérents de surface qui peuvent « taluter » après l'apparition du désordre en surface. Cette marge est généralement sécuritaire et suffisante pour intégrer tous les mouvements de terrains potentiellement redoutés. Aussi, la notion de « zone susceptible de ne comporter que des tassements modérés » du guide PPRN cavités ne sera pas conservée.

Les schémas définissant les concepts de marge d'incertitude et surtout de marge de recule, présentés dans le guide PPRN cavités, apparaissent comme non adaptés car pas assez précis pour définir ces marges sans ambiguïté. Aussi, il est proposé deux schémas explicatifs, pour définir la marge de recule associée au phénomène d'effondrement localisé. Le premier (Figure 2) considère la présence d'une cavité souterraine avec une topographie de surface plane. Le second (Figure 3) avec une topographie de surface pentée. À noter que la prise en compte de la topographie pentée n'est généralement possible que dans le cadre d'études détaillées. Il est souvent plus difficile d'atteindre ce niveau de précision cartographique pour des études globales (portant sur de nombreuses et vastes zones de cavités souterraines).

La marge de recule (R) est définie selon l'équation suivante :

$$R = h \times \cotan(\alpha),$$

avec h, la hauteur des terrains peu cohérents de sub-surface et α , l'angle de talus naturel des terrains peu cohérents de sub-surface (mesuré sur l'horizontal).

L'expérience montre que l'angle de terrain naturel pour des terrains de sub-surface est voisin de 45°. Dans le cas de terrains superficiels sous eau, un angle plus faible pourra être retenu.

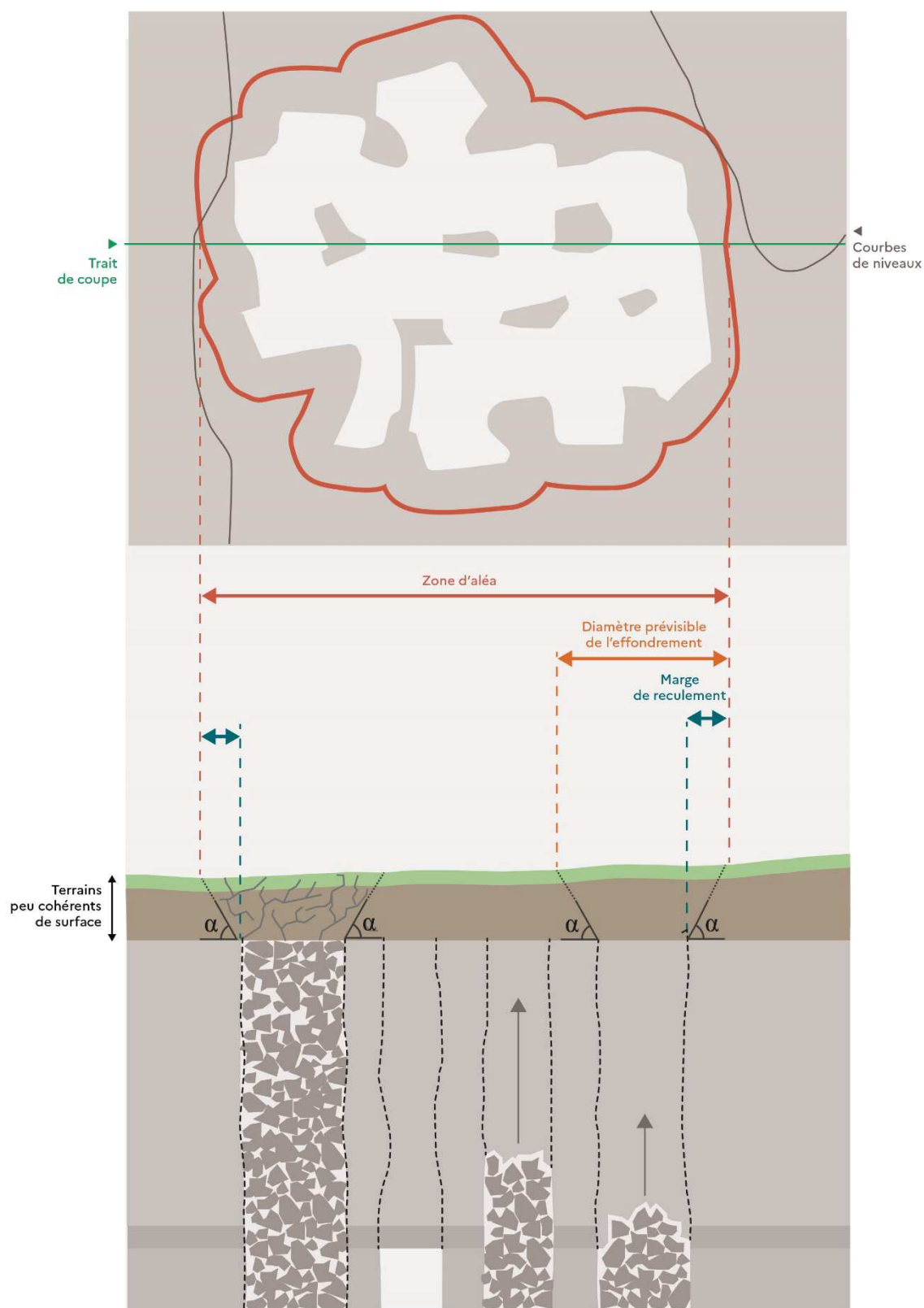
À titre indicatif, le Tableau 8 présente les valeurs d'angle de talus naturel pour différents types de matériaux.

Remarque n°1 : la définition de la marge d'aléa pourra être adaptée en fonction du contexte local (géologie, méthode d'exploitation...). En effet, dans certains contextes, par exemple lorsque les terrains de recouvrement sont « bouillants », comme certains sables aquifères, la prise en compte uniquement des terrains peu cohérents de sub-surface ne sera pas suffisante. Le calcul de la marge d'aléa devra inclure l'épaisseur de ces terrains bouillants.

Remarque n°2 : pour le cas spécifique des cavités supposées, aucune marge d'aléa n'est appliquée compte tenu de l'incertitude inhérente au tracé de ces cavités. Le figuré cartographique de l'aléa sur cavités supposées devra être différent de celui sur les cavités avérées à niveau d'aléa identique (par exemple : couleur du niveau d'aléa plus claire ou partie hachurée...) de façon à conserver et à valoriser cette information pour les phases de zonage et de cartographie réglementaires.

Nature des terrains	Angle de talus naturel
Sable fin et sec	10 à 20°
Sable fin et humide	15 à 25°
Gravier moyen légèrement humide	30 à 40°
Terre végétale humide	30 à 45°
Terre très compacte	40 à 50°
Cailloux, éboulis	40 à 50°
Marnes sèches	30 à 45°
Argiles sèches	30 à 50°
Argiles humides	0 à 20°
Grès tendres et roches diverses	50 à 90°

Tableau 8 : Angle de talus naturel (<http://www.stigencivil.ac-aix-marseille.fr/structure/1ressources/1docpeda/06techno/03Talus.pdf>)



Cavités instables

Figure 2 : Principe schématique de cartographie de la marge de reculement considérant une topographie de surface plane

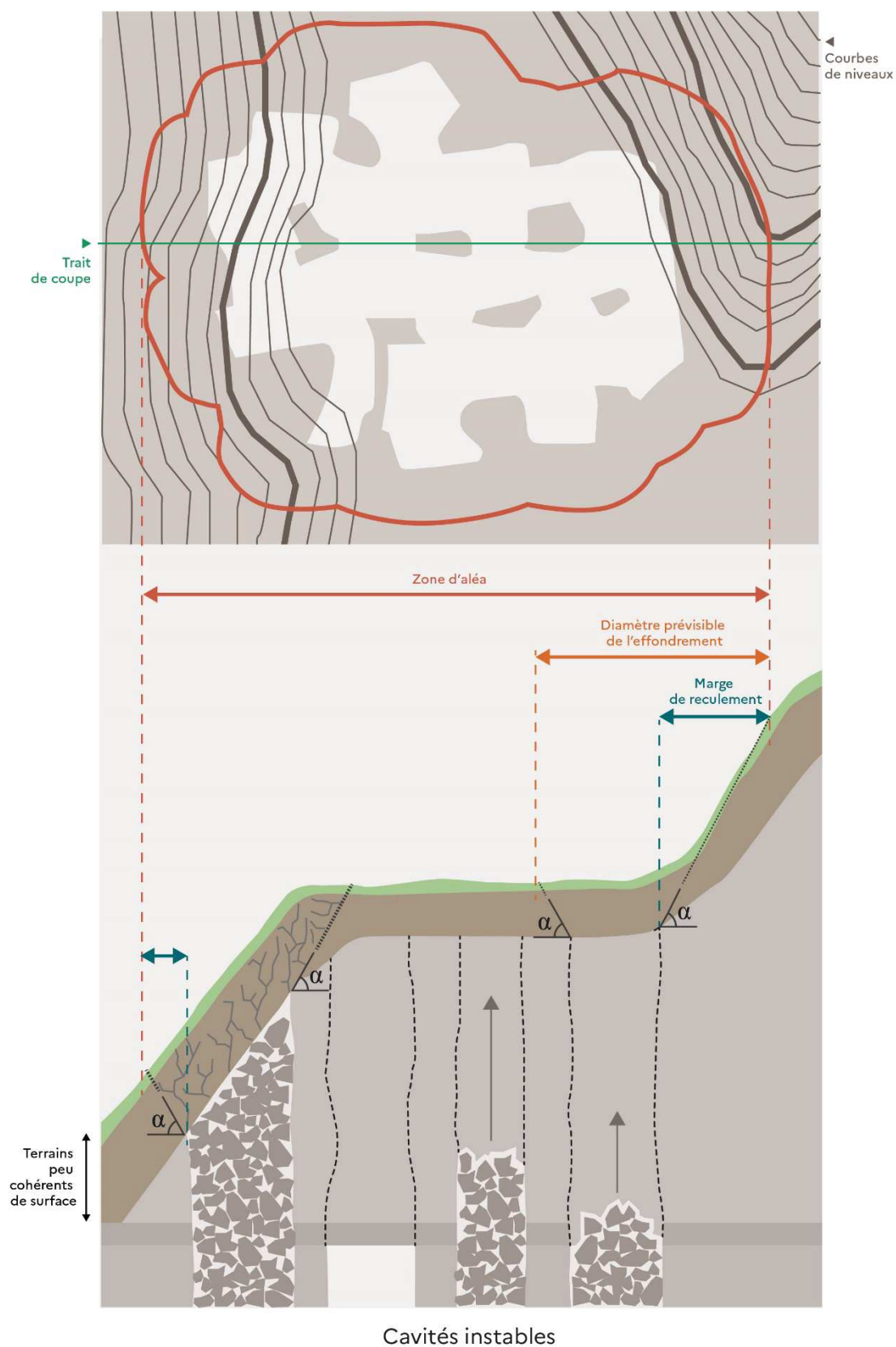


Figure 3 : Principe schématique de cartographie de la marge de reculement considérant une topographie de surface pentée

La Figure 4 présente schématiquement le principe de cartographie de la marge d'aléa (tracé rouge), qui intègre la marge de reculement (en bleu) et la marge d'incertitude (en vert). Le zonage défini par la marge d'aléa est affecté du même niveau d'aléa que celui à l'aplomb direct des cavités puisque cette « auréole » regroupe des terrains soumis aux mêmes phénomènes potentiels.

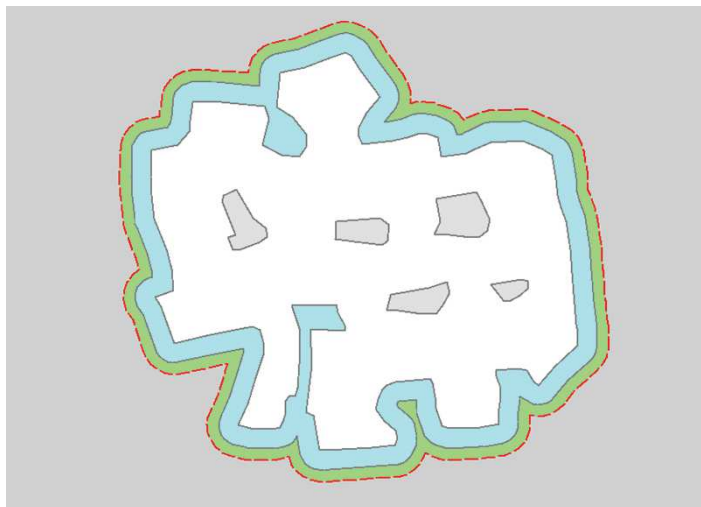


Figure 4 : Représentation schématique de la cartographie de la marge d'aléa (en pointillés rouge) correspondant au cumul de la marge de reculement (en bleu) et de la marge d'incertitude (en vert)

2.6. Remarques et recommandations – prise en compte des travaux (pages 49 et 50 du guide PPRN cavités)

Dans le guide PPRN cavités

Page 49 : il est d'usage, dans la démarche d'élaboration des PPRN, de ne pas prendre en compte la présence de travaux de confortement ou de protection dans la phase d'évaluation des aléas. Ce parti pris consiste à intégrer la possible perte d'efficacité dans le temps de telles mesures, surtout en cas de non-entretien. C'est particulièrement le cas pour les risques d'inondation ou de chutes de blocs. Sur ce point également, l'aléa d'effondrement de cavités présente des spécificités qui méritent d'être prises en compte. Certains traitements du risque, lorsqu'ils sont convenablement réalisés, se révèlent en effet définitifs et n'exigent pas d'entretien spécifique pour garantir leur efficacité dans le temps. C'est notamment le cas des remblayages totaux, réalisés à l'aide de coulis avec prise ou confinés par des barrages convenablement dimensionnés. Dans ce cas, le comblement des vides contribue à stabiliser durablement les terrains et l'affichage d'un aléa de type effondrement à leur aplomb n'aurait pas de sens physique. Il conviendra d'être beaucoup plus précautionneux dès lors que les travaux mis en œuvre sont destinés à conforter les ouvrages souterrains et non à les combler. Dans ce cas, la qualité de réalisation et le dimensionnement des mesures, ainsi que bien évidemment de la pérennité des techniques employées devront être minutieusement considérés.

Compléments

Il est important de noter que ces éléments sont valables pour tout type d'aménagement et d'usage du sol en surface.

Concernant le comblement total, une mise en œuvre dans les règles de l'art est requise, c'est-à-dire en s'assurant notamment de l'adéquation entre le volume de vide existant et le volume de coulis injecté. La notion de clavage devra également être intégrée afin de s'assurer de l'absence de vides résiduels notamment dans le cas des cavités peu profondes.

Pour rappel, le clavage représente l'opération finale de comblement visant à obstruer tous les vides résiduels. Il peut être réalisé depuis la surface ou directement depuis le fond.

3. Récapitulatif

Considérant les compléments apportés au guide PPRN cavités, au travers de cette note, la Figure 5 présente une démarche globale d'évaluation et de cartographie de l'aléa d'effondrement localisé lié aux cavités souterraines.

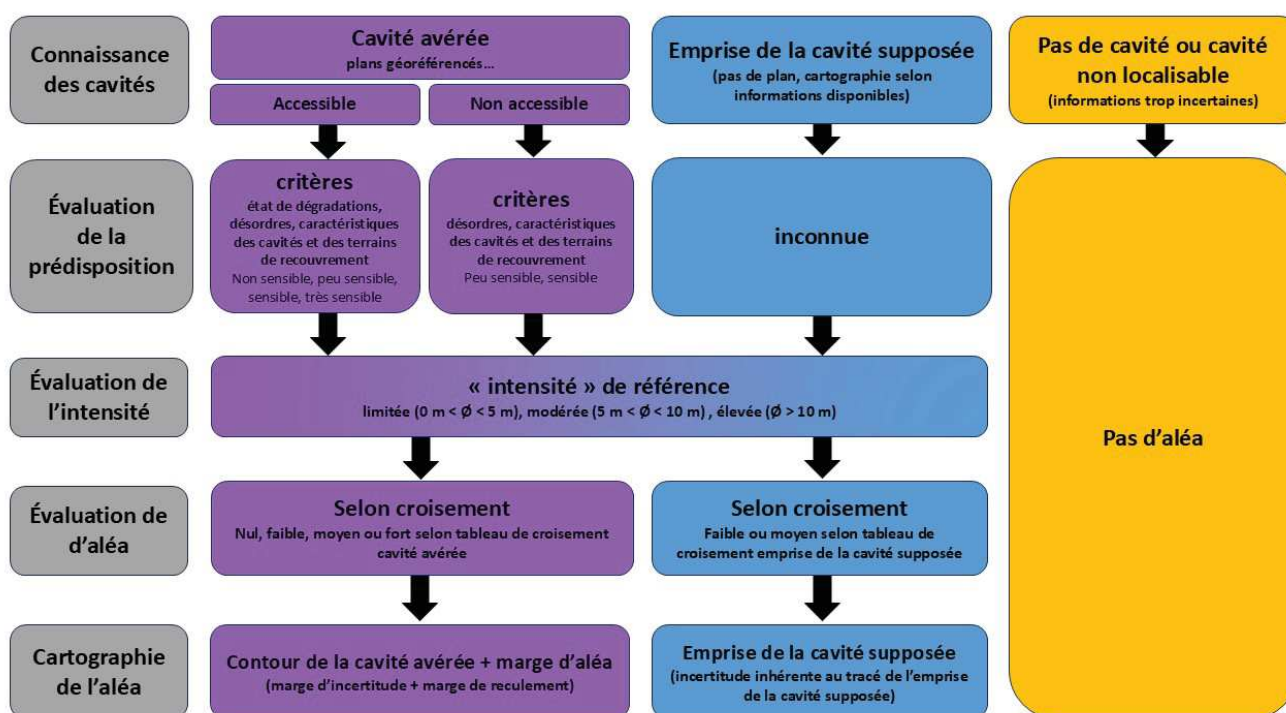


Figure 5 : démarche globale d'évaluation et de cartographie de l'aléa d'effondrement localisé lié aux cavités souterraines

4. Références

- [1] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. (2012). *Plan de prévention des risques naturels - Cavités souterraines abandonnées - Guide méthodologique*. Documentation française : <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/675741/plan-de-prevention-des-risques-naturels-cavites-souterraines-abandonnees-guide-methodologique?lg=fr-FR>
- [2] TRITSCH J.J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L et POTHERAT P. (2002). *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*. Guide technique du LCPC/Ineris/MEDD, Collection environnement, les risques naturels [GuideTechnique-LCPC-ALEACAV.pdf \(univ-gustave-eiffel.fr\)](#)
- [3] FRANCK C., SALMON R., DIDIER C., PAQUETTE Y., POKRYSZKA Z. (2018). *Guide d'évaluation des aléas miniers*. Ineris-DRS-17-164640-01944A : <https://www.ineris.fr/fr/guide-evaluation-aleas-miniers?msclid=18998961cfa411ecbc0c80e84406e512>
- [4] NGUYEN HH. CHENAF M. (2011). Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de type fontis. [Guide CSTB](#).
- [5] LECOMTE A., CHARMOILLE A., KREZIAK C. (2018), Guide Ineris/Cerema, Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol, Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Guide_Gypse_A4_V10_web.pdf
- [6] CHERKAOUI A., HERBAUX, M. (2018), Guide Ineris/Cerema, Aléa versant rocheux sous-cavé Caractérisation et évaluation : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Guide_VSC_A4_V15_web.pdf
- [7] NOURY G., VEDIE E., CLEMENT F., HUSSON E. (2023), Guide méthodologique BRGM/Cerema, Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté - évaluation et cartographie : [Mouvements de terrain d'origine karstique : un guide méthodologique | BRGM](#)
- [8] EFFENDIANTZ L. (2004) Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux : [GuideTechnique-LCPC-ALEABOUL.pdf \(ifsttar.fr\)](#)
- [9] LAMBERT C., SALMON R. (2007) Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière. Rapport Ineris DRS-07-86090-05803A : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRS-07-86090-05803A_total.pdf
- [10] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. (1999). *Plan de Prévention des risques naturels – Risques de mouvements de terrain - Guide méthodologique*. Documentation française : [Plans de prévention des risques naturels \(PPR\). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique. - Portail Web SIE \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)

Document approuvé le 04/12/2024 par DUPLANTIER STEPHANE