



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212836 - 2741657 - v1.0

21/12/2023

## **Synthèse - Analyse de l'interaction entre deux aléas : cavité et inondation**

**INERIS**

maîtriser le risque  
pour un développement durable

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : ALHEIB Marwan -

Vérification : LECOMTE AMELIE; CONIL NATHALIE

Approbation : Document approuvé le 21/12/2023 par DUPLANTIER STEPHANE

## Table des matières

1	Contexte et objectifs.....	8
2	Les concepts de multi-aléa et d'interactions entre aléas.....	9
2.1	Définition du multi-aléa .....	9
2.2	Méthodologie d'évaluation des interactions entre aléas .....	11
2.2.1	Approche qualitative.....	11
2.3	Approche quantitative .....	11
3	Etude multi-aléa « mouvements de terrain » et « inondation » .....	14
3.1	Aléas considérés .....	14
3.2	Définition des aléas « mouvements de terrain – cavité » (guide PPRN Cavités, 2012).....	14
3.2.1	Affaissement (AFF) .....	14
3.2.2	Effondrement localisé – fontis (FON).....	14
3.2.3	Effondrement généralisé (EFF) .....	15
3.3	Définition des aléas « inondation » naturelle (Géorisques) .....	15
3.3.1	Débordement de cours d'eau (INO-DCE) .....	15
3.3.2	Submersion marine (INO-SM).....	15
3.3.3	Ruissellement (INO-RU).....	15
3.3.4	Remontée de nappe (INO-RN).....	15
3.4	Définition des aléas « inondation accidentelle » (Ineris, 2018).....	16
3.4.1	Arrêt de l'exhaure minier (INO-AEX).....	16
3.4.2	Rupture des ouvrages (INO-ROU).....	16
3.5	Boucles d'interaction entre les aléas (MVT-INO) .....	16
3.5.1	Interactions au niveau principal .....	16
3.5.2	Interactions qualitatives au niveau opérationnel.....	17
3.6	Exemples d'arbres d'interaction entre aléas (MVT-INO) .....	18
3.7	Évaluation de l'interaction des cas identifiés par les DREAL.....	21
4	Cas d'application : commune de Peypin .....	23
4.1	Description .....	23
4.2	Aléas naturels.....	25
4.2.1	Aléa « mouvements de terrain ».....	25
4.2.2	Aléa « inondation » .....	27
4.3	Évaluation de l'interaction entre les deux aléas .....	27
4.3.1	Niveau principal – analyse globale .....	27
4.3.2	Niveau opérationnel - analyse détaillée .....	28
4.3.3	Calcul de l'indice Multi-Aléa (MH).....	29
4.4	Conclusion.....	31
5	Cas d'application : commune de Cambrai.....	32
5.1	Description .....	32
5.2	Aléa « mouvements de terrain » .....	34
5.3	Aléa « inondation » .....	35
5.4	Cas connus d'interaction entre les deux aléas.....	36
5.5	Évaluation de l'interaction entre les deux aléas .....	37

5.5.1	Niveau principal - analyse globale .....	37
5.5.2	Niveau opérationnel - analyse détaillée .....	38
5.5.3	Calcul de l'indice Multi-Aléa.....	39
5.6	Conclusion.....	40
6	Conclusion .....	41
7	Principales références bibliographiques.....	42

## Liste des figures

Figure 1 : Démarche générale de l'étude d'interaction entre plusieurs aléas .....	10
Figure 2 : Identification des interactions entre deux aléas (Ai et Aj) et construction de la matrice d'interaction pour n aléas, lij : indice d'interaction entre deux aléas .....	10
Figure 3 : Démarche méthodologique en 6 étapes pour l'étude multi-aléa (cavités – naturels) .....	13
Figure 4 : Interactions possibles entre les deux principaux aléas : « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) d'origine naturelle ou/et anthropique .....	17
Figure 5 : Interactions possibles entre les aléas « mouvements de terrain » (AFF, FON et EFF) et les aléas « inondation » (RS, RN, RU, DCE, AEX et ROU) .....	17
Figure 6 : Interactions possibles entre les aléas « fontis » (RE, DE et SU) et les aléas « inondation » (RS, RN, RU, DCE, AEX et ROU) .....	18
Figure 7 : Arbre d'interaction entre l'aléa « remontée de cloche de fontis » (RE) et les aléas « inondation », « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU) .....	19
Figure 8 : Arbre d'interaction entre l'aléa « remontée de fontis par débouillage » (DE) et les aléas « inondation » : « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU) .....	19
Figure 9 : Arbre d'interaction entre l'aléa « Affaissement » (AFF) et les aléas « inondation », « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU) .....	20
Figure 10 : Arbre d'interaction entre l'aléa « effondrement généralisé » (EFF) et les aléas « inondation » : « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU) .....	20
Figure 11 : Localisation de la commune de Peypin (Source : GoogleMap) .....	23
Figure 12 : Géologie et exploitation minière du bassin houiller de lignite. Le gisement s'approfondit vers l'ouest. Peypin se trouve à l'est du bassin (Ineris, 2007) .....	24
Figure 13 : Carrières souterraines abandonnées de pierre à ciment (Commune de Peypin, crédit patrimoine industrielle), (Ineris, 2014) .....	25
Figure 14 : Localisation des cavités naturelles et ouvrages souterrains hors mines (carrières, puits et galeries) dans la commune de Peypin (les données sont issues du site georisques.gouv.fr) ; cette figure est présentée en illustration .....	26
Figure 15 : Localisation de l'aléa « mouvements de terrain » sur deux secteurs (1 à gauche et 2 à droite) de la commune de Peypin lié à la présence des cavités souterraines – carrière de pierre à ciment – PPRM – Peypin .....	26
Figure 16 : Niveau de l'aléa « inondation » pour la commune de Peypin (carte issue du site internet de la préfecture du Rhône, consulté en février 2021) .....	27
Figure 17 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), une flèche verte correspond à une interaction faible et une flèche rouge indique une interaction forte ; ajustement de l'aléa « mouvement de terrain » (MVT) .....	28
Figure 18 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), prenant en compte les sous-aléas « inondation » .....	28
Figure 19 : Interactions entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), prenant en compte les sous-aléas inondations .....	29
Figure 20 : Arbre d'interaction entre les deux aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) pour les carrières souterraines de pierre à ciment – commune de Peypin .....	29
Figure 21 : Indice MH (multi-hazard intensity indice) pour la première analyse ou analyse globale de l'interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) .....	30
Figure 22 : Calcul de la valeur de MH pour les aléas « mouvements de terrain » (MVT), l'aléa « débordement de cours d'eau » (DCE), l'aléa « ruissellement » (RU) et l'aléa « inondation » d'origine accidentelle liée à l'exhaure (AXE) .....	30
Figure 23 : Localisation de l'arrondissement de Cambrai (source : BRGM) et localisation de la zone de la commune de Cambrai (secteur d'étude, cercle rouge) .....	32
Figure 24 : Coupe géologique de terrain dans le Cambrésis, on note la présence d'un banc de craie blanche épaisse, ce banc comporte des carrières souterraines (Source : BRGM) .....	33
Figure 25. Carte des cavités souterraines présentes sur la commune de Cambrai (Source : Géorisques) .....	34
Figure 26 : Carte de susceptibilité de présence de carrières souterraines dans le Cambrésis et la localisation de la zone de l'étude (cercle noir) .....	34
Figure 27 : Carte d'aléa « mouvements de terrain » liés à la présence de cavités souterraines, (source : BRGMRP-52959-FR) et la localisation de la zone de l'étude .....	35

Figure 28 : Carte de susceptibilité d'inondation des cavités par la nappe (source : BRGMRP-52959-FR), localisation de la zone de l'étude .....	36
Figure 29 : Carte corrigée de l'IDPR (source : BRGMRP-52959-FR), localisation de la zone de l'étude .....	36
Figure 30 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), une flèche verte correspond à une interaction faible et une flèche rouge indique une interaction forte ; Ajustement de l'aléa « mouvements de terrain » (MVT).....	37
Figure 31 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et les aléas « inondation » ..	38
Figure 32 : Arbre d'interaction entre les deux aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) pour les carrières souterraines de craie de l'arrondissement de Cambrai .....	38
Figure 33 : Indice MH pour l'interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO).....	39
Figure 34 : Calcul de la valeur de MH pour les aléas « mouvements de terrain » (MVT), l'aléa « débordement de cours d'eau » (DCE), l'aléa « ruissellement » (RU) et l'aléa « remontée de nappe » (RN).....	39

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Ajustement qualitatif des niveaux initiaux d'aléas en fonction du niveau d'interaction.....	11
Tableau 2 : Ajustement quantitatif de niveaux initiaux d'aléas en fonction du niveau d'interaction .....	11
Tableau 3 : Valeurs des aléas ajustés .....	12
Tableau 4 : Aléas « mouvements de terrain » (cavités) et aléas « inondation » d'origine naturelle et accidentelle.....	14
Tableau 5 : Niveau d'interaction (vert : faible ou sans interaction ; orange : interaction moyenne ; rouge : interaction forte).....	21
Tableau 6 : Cas d'interaction entre l'aléa « cavité – mouvements de terrain » et l'aléa « inondation » – analyse selon la méthodologie : niveau 1 (global) et niveau 2 (détaillé) .....	22
Tableau 7 : Liste des mouvements de terrains qui ont affectés les cavités souterraines de Cambrai durant l'année 2001 (source : georisque.gouv.fr).....	36

## Résumé

L'Ineris a développé, entre 2018 et 2021, une approche générale d'identification et de caractérisation des interactions entre phénomènes naturels incluant des phénomènes gravitaires (effondrements de cavités, éboulements rocheux, glissements...). Cette étude basée sur des problématiques locales, identifiées par retour d'expérience des services déconcentrés de l'État, a permis notamment de définir des interactions physiques entre les phénomènes. Il ressort de cette analyse que les interactions les plus fréquemment rencontrées sont celles entre les phénomènes « d'inondation » (ruissellement, remontée de nappes, débordement de cours d'eau, submersions brutales...) et les mouvements de terrain liés aux cavités souterraines.

Aussi, l'Ineris a engagé en 2022, une réflexion spécifique sur l'analyse multi-aléa « cavités-inondation ». Une méthodologie en 6 étapes a été développée comportant l'identification et l'évaluation des interactions potentielles, la définition des scénarios pouvant se développer et le calcul de l'indice multi-aléa.

Cette méthodologie a été appliquée aux deux aléas naturels « mouvements de terrain » liés aux cavités souterraines et « inondation ». Il en ressort les éléments suivants :

- ces aléas sont de type dépendant ;
- l'effet de l'eau se traduit par une fragilisation immédiate ou différée de la cavité et, des terrains de recouvrement ;
- les interactions sont doubles c'est-à-dire qu'elles peuvent se faire dans les deux sens : inondation – mouvements de terrain ou mouvements de terrains – inondation.

Afin de valider la méthodologie développée, l'analyse multi-aléa a été appliquée aux territoires de Peypin et de l'arrondissement de Cambrai qui présentent plusieurs aléas naturels dont les aléas « inondation » (INO) et « mouvements de terrain » (MVT) associés à la présence des cavités souterraines.

Deux niveaux d'analyse ont été réalisés : la première analyse (globale) entre les deux aléas a montré que les interactions peuvent atteindre un niveau fort. L'arbre d'interaction a permis de préciser les conditions de ces interactions. Un indice multi-aléas (MH), permettant de préciser le niveau d'interaction, a également été calculé pour les deux cas analysés.

La méthodologie développée et son application présentent une première étape de l'analyse multi-aléa. Cette approche globale et intégratrice permettrait notamment de hiérarchiser les territoires concernés par plusieurs aléas.

### **Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :**

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Synthèse - Analyse de l'interaction entre deux aléas : cavité et inondation, Verneuil-en-Halatte : Ineris - **212836** - v1.0, 21/12/2023.

### **Mots-clés :**

Multi-aléa, méthodologie, risques gravitaires, cavités-MVT, inondation, interaction, évaluation

# 1 Contexte et objectifs

Afin d'améliorer les connaissances méthodologiques pour la réalisation pratique d'analyses multirisques en corrélation avec les risques gravitaires, l'Ineris a développé, entre 2018 et 2021<sup>1</sup>, une approche générale d'identification et de caractérisation des interactions entre phénomènes naturels, incluant des phénomènes gravitaires (effondrements de cavités, éboulements rocheux, glissements...). Cette étude, basée sur des problématiques locales identifiées par retour d'expérience des services déconcentrés de l'État, a permis de définir :

- les interactions physiques entre les phénomènes ;
- les éventuelles incompatibilités en termes de dispositions réglementaires (constructives ou gestions des usages des sols) sur des zones affectées par plusieurs aléas naturels.

Il ressort de cette analyse que les interactions les plus fréquemment rencontrées sont celles entre les phénomènes « d'inondation » (au sens large) et les mouvements de terrain liés aux cavités souterraines.

Afin de poursuivre ce travail, une réflexion spécifique sur l'analyse multi-aléa « cavités-inondation » a été engagée en 2022. Les différentes interactions entre ces deux aléas ont été décrites et trois niveaux d'interactions ont été proposés. Ce rapport présente la synthèse de ces travaux ainsi que l'application de la méthodologie à deux communes exposées aux aléas « cavités et inondation », à savoir les cas de :

- Peypin – département des Bouches-du-Rhône (13) ;
- Cambrai – département du Nord (59).

---

<sup>1</sup> Multi-aléa- Evaluation des interactions potentielles entre aléas mouvements de terrain et inondation, ref. Ineris - 206836 - 2755922 - v1.0

Caractérisation des interactions entre phénomènes naturels incluant des phénomènes gravitaires : Cas concrets et grille d'analyse pour l'aléa cavité et ses interactions. Ineris - 212836 - 2741657 - v1.0

## 2 Les concepts de multi-aléa et d'interactions entre aléas

### 2.1 Définition du multi-aléa

L'aléa est un concept issu du risque naturel qui correspond à la probabilité qu'un phénomène se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité ou une gravité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence (guide PPRN Cavités, 2012).

La Commission Européenne (2010) définit le multi-aléa comme la probabilité d'apparition de différents aléas survenant soit au même moment, soit peu de temps après, parce qu'ils sont dépendants les uns des autres ou parce qu'ils sont provoqués par le même événement déclencheur ou danger, ou simplement parce qu'ils menacent les mêmes éléments à risque sans coïncidence chronologique. Le multi-aléa considère l'occurrence de plus d'un phénomène, dans un lieu donné. Il intègre les interactions potentielles entre ces phénomènes ainsi que leur occurrence simultanée ou cumulative. Le multirisque découle de l'évaluation du multi-aléa en évaluant les dommages engendrés par l'interaction de ces aléas.

Deux types d'interaction sont possibles :

- l'interaction physique : lorsque les mécanismes ou les phénomènes à l'origine d'un des aléas peuvent avoir un effet sur les mécanismes ou les phénomènes d'un autre aléa. Les aléas sont alors dits « dépendants » (fonction du temps et de l'espace) ;
- l'interaction réglementaire, notamment en termes de gestion de l'urbanisme et des mesures compensatoires. Certains aléas qui sont indépendants physiquement mais dont les mesures ou les règlements peuvent, dans certains contextes être dépendants, on parle dans ce cas spécifique d'une étude multi-aléa réglementaire.

La Figure 1 présente la démarche générale de l'évaluation de l'interaction entre plusieurs aléas. On distingue trois niveaux d'étude en fonction des interactions possibles entre les aléas identifiés sur un site donné :

- le niveau 1 qui correspond à un seul aléa ou à plusieurs aléas indépendants. Dans ce cas chaque aléa est évalué de façon indépendante. L'analyse multi-aléa n'est pas recommandée ;
- Le niveau 2 qui considère plusieurs aléas, dont l'un des aléas peut déclencher un ou plusieurs aléas. Ce déclenchement peut être immédiat ou différé. L'analyse de niveau 2 doit être conduite afin de déterminer le niveau d'interactions et les conséquences de ces interactions ;
- Le niveau 3 qui correspond à l'occurrence simultanée de plusieurs aléas créant un effet de cascade (effet domino) avec une diminution et une aggravation de l'ensemble des aléas concernés. L'analyse doit être détaillée pour identifier et évaluer les types d'interaction ainsi que les conséquences.

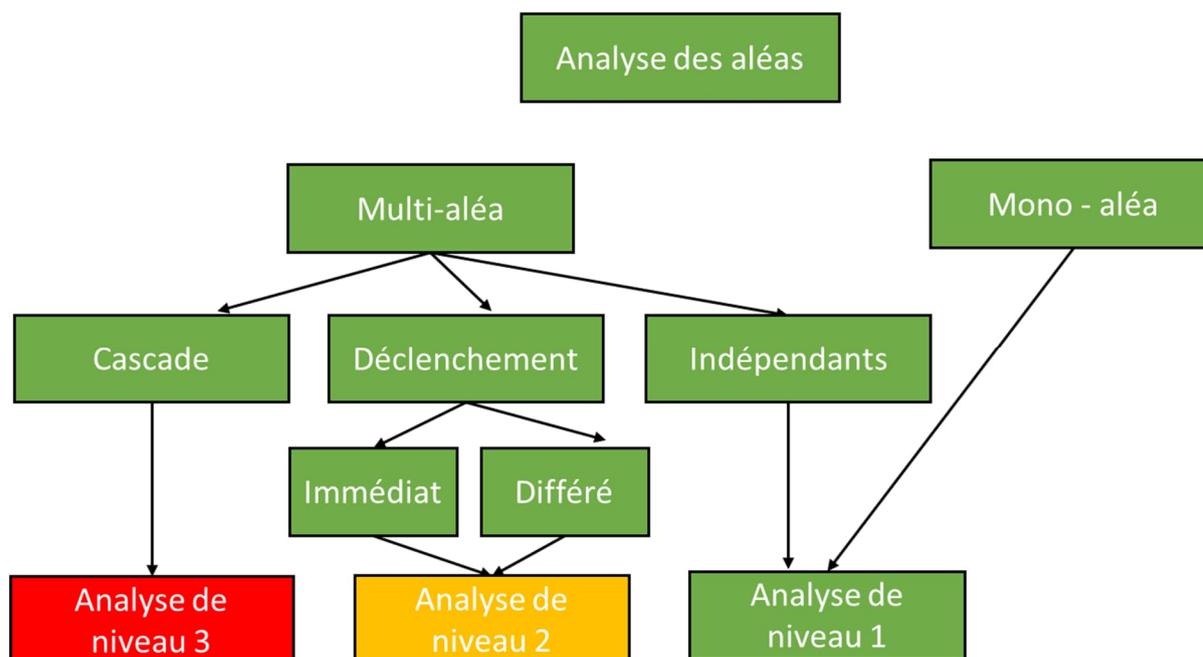


Figure 1 : Démarche générale de l'étude d'interaction entre plusieurs aléas

La Figure 2 présente l'interaction entre deux aléas ( $A_i$  et  $A_j$ ). La méthodologie consiste à identifier l'influence de l'aléa  $A_i$  sur l'aléa  $A_j$  puis l'aléa  $A_j$  sur l'aléa  $A_i$ . Dans le cas d'une interaction avérée, il est possible de qualifier le type (simple, double, ou en cascade) et le niveau l'interaction : faible, moyen et fort. La matrice d'interaction permet de réaliser cette évaluation pour  $n$  aléas.

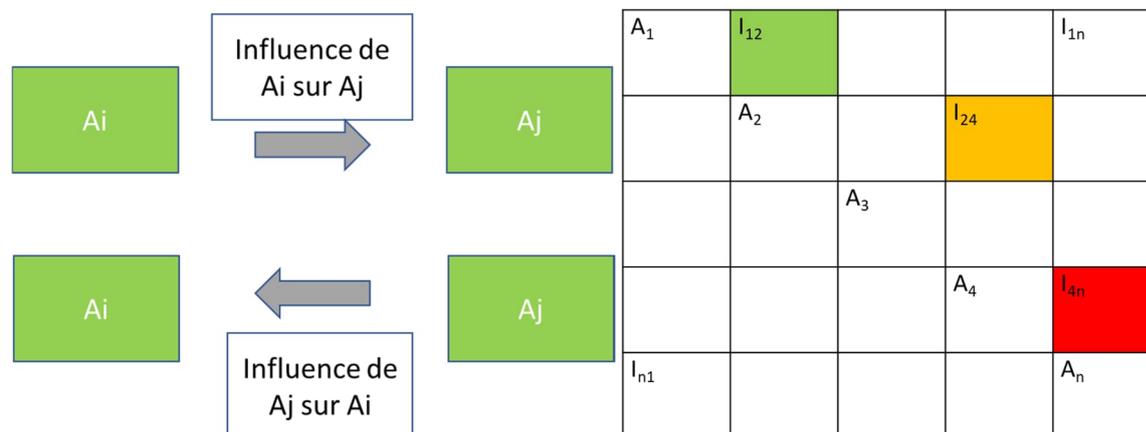


Figure 2 : Identification des interactions entre deux aléas ( $A_i$  et  $A_j$ ) et construction de la matrice d'interaction pour  $n$  aléas,  $I_{ij}$  : indice d'interaction entre deux aléas

Pour un site (secteur d'une commune, commune, groupement de communes, etc.) exposé à plusieurs aléas, l'analyse multi-aléa, contrairement aux analyses mono aléa, consiste à considérer chaque aléa comme un élément en interaction potentielle avec d'autres aléas également identifiés sur le site. Cette approche globale et intégratrice permet de représenter le plus fidèlement possible les situations dans lesquelles coexistent et interagissent les aléas sur un même territoire/site. Les avantages de l'analyse multi-aléa/multirisque des sites peuvent être résumés comme suit :

- une prise en compte plus globale des interactions entre les aléas naturels ;
- une meilleure évaluation de l'intensité et de la prédisposition des aléas, notamment à travers des scénarios associés à leurs interactions ;
- une meilleure prise en compte de la vulnérabilité des enjeux d'un territoire exposé à plusieurs aléas ;
- une vision globale et intégrée du risque pour une meilleure gestion de celui-ci.

## 2.2 Méthodologie d'évaluation des interactions entre aléas

### 2.2.1 Approche qualitative

Plusieurs outils sont disponibles pour présenter l'existence et le niveau d'interactions entre plusieurs aléas, à savoir : la matrice d'interaction (Figure 2), la boucle d'interaction ou encore l'arbre d'interaction. Il est recommandé de combiner ces outils pour décrire les scénarios d'interaction.

On définit généralement trois niveaux d'interaction (Tableau 1) : faible, moyen et fort. Ces niveaux d'interaction sont définis en fonction du retour d'expérience, d'observations de terrain et d'avis d'experts.

Après l'identification de l'interaction et de son niveau, on ajuste le niveau de l'aléa initial selon le niveau d'interaction (Tableau 1). En règle générale les ajustements suivants sont admis :

- absence d'interaction : pas de potentiel d'interaction (temporelle et spatiale) pour les aléas existants identifiés : pas de modification du niveau d'aléa.
- le niveau d'interaction est jugé moyen entre les aléas existants : le niveau d'aléa initial sera augmenté, d'un niveau,
- le niveau d'interaction est jugé élevé entre les aléas existants : le niveau d'aléa initial sera augmenté d'un niveau ou deux niveaux en fonction de type d'aléa.

Tableau 1 : Ajustement qualitatif des niveaux initiaux d'aléas en fonction du niveau d'interaction

Niveau initial de l'aléa	Niveau d'interaction	Niveau d'aléa ajusté
Faible / Moyen / Fort	Absence ou faible interaction	Faible / Moyen / Fort
Faible	Moyen	Moyen
Moyen		Fort
Fort		Très Fort
Faible	Fort	Moyen
Moyen		Fort
Fort		Très Fort

### 2.3 Approche quantitative

Cette approche, tient compte dans un premier temps d'une évaluation qualitative des interactions. Elle associe ensuite les niveaux d'aléa et les niveaux d'interaction à une valeur correspondante. Le choix de valeurs est arbitraire. Dans le cadre de cette étude, afin de conserver des valeurs de croisement relativement faibles, les valeurs suivantes ont été considérées (Tableau 3) :

- 1, 1,2 et 1,3 respectivement pour des aléas faible, moyen et fort.
- 1, 1,1 et 1,2 respectivement pour une interaction faible, moyenne et forte.

Tableau 2 : Ajustement quantitatif de niveaux initiaux d'aléas en fonction du niveau d'interaction

Niveau initial de l'aléa		Niveau / coefficient d'interaction	
Faible	1	Faible	1
Moyen	1,2	Moyen	1,1
Fort	1,3	Fort	1,2

L'objectif est ensuite de calculer le niveau d'aléa ajusté. Il est le produit du niveau de l'aléa initial considéré et du niveau interaction de cet aléa avec un autre aléa. En tenant compte des valeurs proposées ci-avant, la valeur de l'aléa ajusté peut varier entre 1 et 1,56 (Tableau 3).

À titre d'exemple, la valeur d'un aléa ajusté égale à 1 correspond à un aléa i initial de niveau faible pour lequel le niveau d'interaction avec le deuxième aléa j est faible. La valeur d'un aléa ajusté égale à 1,56

correspond à un aléa initial  $i$  de niveau fort pour lequel le niveau d'interaction avec le deuxième aléa  $j$  est fort.

Tableau 3 : Valeurs des aléas ajustés

		Niveau d'aléa ajusté		
		Niveau d'interaction		
Niveau d'aléa initial		Faible	Moyen	Fort
	Faible	1	1,1	1,2
	Moyen	1,2	1,32	1,44
	Fort	1,3	1,43	1,56

Enfin, cette approche permet également de calculer un indice multi-aléa (MH) permettant d'associer une « note » à l'ensemble des interactions pouvant exister sur un même territoire.

L'indice multi-aléa (MH) est défini selon l'équation suivante :

$$MH = \sum_1^n H_{ad-i}$$

$n$  : nombre d'aléas identifiés sur le site étudié

$H_{ad-i}$  : niveau d'aléa ajusté de l'aléa  $i$  ( $H_i$ )

Cet indice présente un grand intérêt, notamment pour la cartographie du niveau multi-aléa. Pour illustrer le calcul de l'indice multi-aléa, on présente l'exemple suivant pour deux aléas :

- un aléa  $i$  de niveau moyen ( $H_i = 1,2$ )
- un aléa  $j$  de niveau faible ( $H_j = 1$ )
- le niveau d'interaction respectif entre ces deux aléas est évalué de niveau fort (1,2)

Par conséquent, les niveaux d'aléa ajustés sont les suivants :

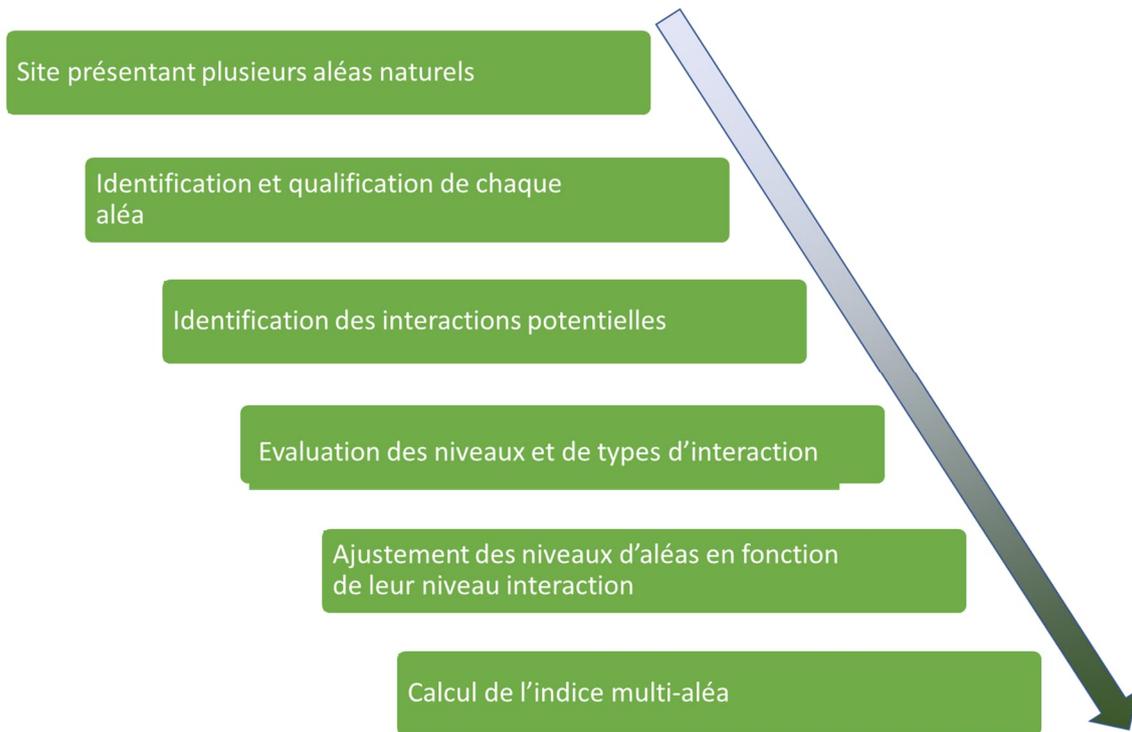
- $H_{ad-i} = 1,2 \times 1,2 = 1,44$
- $H_{ad-j} = 1 \times 1,2 = 1,2$

Aussi, l'indice multi-aléa résultant sera

- $MH_{(i,j)} = 1,44 + 1,2 = 2,64$

Ce type de calcul peut être utilisé pour des territoires présentant de multiples aléas afin de cibler les zones sur lesquels le nombre d'interaction entre aléas est important, considérant le niveau d'aléa de chacun des phénomènes attendus. Il permet ainsi de prioriser les secteurs pour la gestion globale des aléas.

La Figure 3 représente la démarche méthodologique développée dans le cadre de cette étude. Elle comporte 6 étapes clés : la première étape consiste à identifier et qualifier les aléas présents sur un même territoire. Une fois les aléas identifiés, la démarche consiste ensuite à identifier et évaluer les interactions potentielles qui peuvent exister entre ces aléas. Enfin, la dernière étape consiste à calculer l'indice multi-aléa.



*Figure 3 : Démarche méthodologique en 6 étapes pour l'étude multi-aléa (cavités – naturels)*

### 3 Etude multi-aléa « mouvements de terrain » et « inondation »

#### 3.1 Aléas considérés

Cette partie du rapport concerne l'analyse multi-aléa des aléas « mouvements de terrain » liés à la présence des cavités souterraines et des aléas « inondation » (d'origine naturelle ou accidentelle). Le Tableau 4 présente l'ensemble des aléas considérés (aléas opérationnels) pour ces deux grandes familles (aléas principaux). Ainsi, 11 aléas opérationnels ont été identifiés. Pour chacun de ces aléas, un code d'identification a été défini et sera repris dans la suite de l'étude.

Tableau 4 : Aléas « mouvements de terrain » (cavités) et aléas « inondation » d'origine naturelle et accidentelle

Aléas principaux (2)	Code	Aléas opérationnels (11)	Code	
Mouvement de terrain	MVT	Affaissement		<b>AFF</b>
		Fontis	Fontis - Remontée de cloche de fontis	<b>FON-RE</b>
			Débouillage	<b>FON-DE</b>
			Suffosion	<b>FON-SU</b>
		Effondrement généralisé		<b>EFF</b>
Inondation	INO	Naturelle	Débordement de cours d'eau	<b>INO-DCE</b>
			Ruissellement	<b>INO-RU</b>
			Remontée de nappe	<b>INO-RN</b>
			Submersion marine	<b>INO-SM</b>
		Accidentelle	Rupture des ouvrages	<b>ROU</b>
			Arrêt d'exhaure	<b>AEX</b>

#### 3.2 Définition des aléas « mouvements de terrain – cavité » (guide PPRN Cavités, 2012)

##### 3.2.1 Affaissement (AFF)

L'aléa « mouvements de terrain » de type affaissement se manifeste par la rupture du toit de l'exploitation (cavités souterraines) se propage de façon progressive dans les terrains de recouvrement, et se traduit en surface par le réajustement du sol, sans rupture cassante importante. La nature des terrains de couverture (formations peu cohérentes et souvent plastiques) et la faible ouverture des vides à l'origine sont les principaux critères de ce type de phénomène.

##### 3.2.2 Effondrement localisé – fontis (FON)

L'aléa « mouvements de terrain » de type effondrement localisé se manifeste classiquement par l'apparition soudaine d'un cratère d'effondrement dont l'extension varie de moins d'un mètre de diamètre à quelques dizaines de mètres au maximum. On distingue trois types d'effondrement localisé en fonction de la nature de l'ouvrage souterrain :

- la remontée de cloche de fontis (FON-RE) correspond à la remontée en surface d'un éboulement initié au « toit » d'une cavité. Lorsque la voûte initiée par la rupture du premier banc rocheux ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface. Si l'espace disponible au sein

des vides sous-jacents est suffisant pour que les matériaux éboulés foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par auto-comblement, la voûte peut atteindre la surface du sol.

- le débouillage d'un remblai d'un puits (FON-DE) : il correspond à l'entraînement gravitaire du matériau de comblement du puits vers l'ouvrage souterrain auquel il est raccordé. Ce débouillage peut engendrer une rupture du revêtement du puits et un effondrement des terrains environnants.
- La suffosion (FON-SU) : causée par des circulations rapides d'eau interstitielle ou des fuites de canalisation, elle provoque le développement de boyaux de diamètre décimétrique par entraînement des particules fines dans la masse du sol sableux et les limoneux au-dessus des cavités naturelles ou anthropiques.

### 3.2.3 Effondrement généralisé (EFF)

L'aléa « mouvements de terrain » de type effondrements généralisé, également appelés effondrement en masse, se traduit par un abaissement à la fois violent et spontané de la surface sur parfois plusieurs hectares et plusieurs mètres de profondeur, tout le terrain au-dessus de la cavité s'effondrant d'un coup. Généralement associé aux carrières présentant une extension latérale importante, l'effondrement généralisé est le plus souvent initié par une rupture en chaîne des piliers de l'exploitation, le toit descendant alors en masse. Ils supposent l'existence d'une zone d'exploitation avec des taux de défrêtement (rapport de la surface des vides à la surface totale) élevés, des volumes de vides importants et des configurations d'exploitation fragiles (piliers sous-dimensionnés, élancement important, etc.).

## 3.3 Définition des aléas « inondation » naturelle (Géorisques)

### 3.3.1 Débordement de cours d'eau (INO-DCE)

On considère qu'il y a inondation par débordement de cours d'eau lorsqu'un cours d'eau déborde de son lit habituel. Les inondations par débordement de cours d'eau découlent de deux phénomènes :

- les crues lentes de plaine : les zones concernées se situent dans la vallée de la rivière ou du fleuve;
- les crues rapides et torrentielles : les zones concernées sont principalement des zones montagneuses ou de relief marqué.

### 3.3.2 Submersion marine (INO-SM)

Les submersions marines sont des inondations rapides et de courtes durées (de quelques heures à quelques jours) de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables. On distingue trois modes de submersion marine : la submersion par débordement, la submersion par franchissements et la submersion par rupture du système de protection.

### 3.3.3 Ruissellement (INO-RU)

L'inondation par ruissellement se produit lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. À l'origine du phénomène d'inondation par ruissellement se trouve un événement climatique important, par exemple une pluie de très forte intensité ou un cumul important de pluie sur plusieurs jours.

### 3.3.4 Remontée de nappe (INO-RN)

On parle généralement d'inondation par remontée de nappe lorsque l'inondation est provoquée par la montée du niveau de la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol. Si des événements pluvieux exceptionnels surviennent et engendrent une recharge exceptionnelle, le niveau de la nappe peut alors atteindre la surface du sol et provoquer une inondation « par remontée de nappe ». Pour les cavités souterraines, cette interaction est à prendre en compte lorsque la nappe s'approche du niveau de l'exploitation. Son effet peut concerner : le mur de l'exploitation, la couche exploitée et le recouvrement.

## 3.4 Définition des aléas « inondation accidentelle » (Ineris, 2018)

### 3.4.1 Arrêt de l'exhaure minier (INO-AEX)

Après l'arrêt des travaux miniers, il est possible d'arrêter le pompage des eaux et laisser ennoyer les anciennes mines à ciel ouvert ou souterraines. L'arrêt de l'exhaure peut-être accidentel, à cause de la défaillance du système de pompage. Ce phénomène est similaire à la remontée de nappe en termes des conséquences sur les ouvrages souterrains.

### 3.4.2 Rupture des ouvrages (INO-ROU)

Le phénomène de rupture correspond à une destruction partielle ou totale d'un ouvrage hydraulique (barrage ou d'une digue, canalisation, etc.) de manière brutale ou progressive. Pour les barrages et les digues, la rupture est accompagnée par une montée brutale du niveau de l'eau et un fort courant.

## 3.5 Boucles d'interaction entre les aléas (MVT-INO)

Afin de représenter les interactions possibles entre les aléas, la méthode de boucle d'interaction a été utilisée. Dans ce schéma, l'un des aléas est positionné au centre de la boucle et les autres aléas, avec lesquels une interaction est possible, sont placés autour.

L'interaction est représentée par une flèche indiquant la direction de l'interaction. Trois potentiels d'interaction ont été distingués :

- la première pour laquelle aucune interaction n'est possible : dans ce cas, la flèche est barrée ;
- la deuxième pour laquelle une interaction est possible et où le niveau de l'interaction est jugé faible : dans ce cas, la flèche est de couleur bleue ;
- la troisième où l'interaction est possible et le niveau de l'interaction est jugé fort : dans ce cas, la flèche est de couleur rouge.

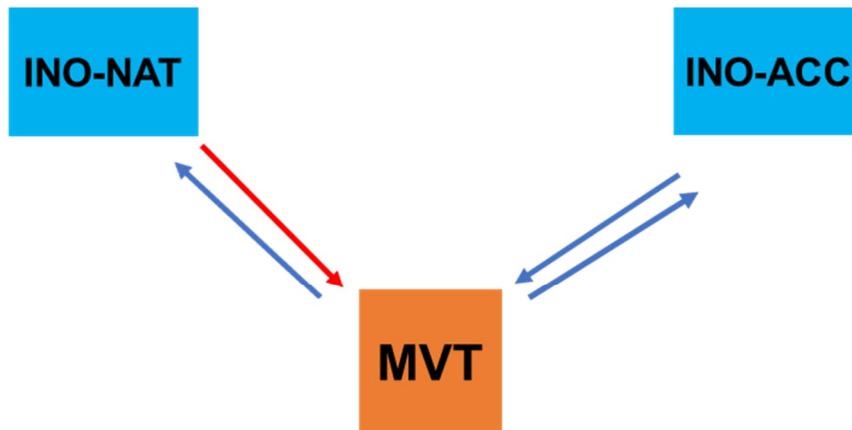
Pour chaque aléa placé au centre, nous avons examiné les potentielles interactions sur la base de retours d'expérience et d'avis d'expert. Cette évaluation doit être complétée par des études complémentaires et des observations afin de confirmer ou d'affirmer l'existence de ces interactions.

### 3.5.1 Interactions au niveau principal

Cette étude (menée entre 2018 et 2021) a mis en avant une interaction « évidente » entre les deux principaux aléas : « mouvements de terrain » lié à la présence des cavités souterraines et « inondation ». Dans une zone où il existe un aléa « mouvements de terrain », l'interaction avec l'aléa « inondation » est directe dans un sens comme dans un autre à savoir (Figure 4) :

- l'aléa « inondation » peut déclencher immédiatement ou de façon différée l'aléa « mouvements de terrain ».
  - o Exemple : l'inondation, liée à de fortes précipitations, pourrait induire le déclenchement immédiat d'effondrements localisés dans le périmètre de la zone inondée, par la réduction des caractéristiques mécaniques du terrain et l'augmentation de la charge.
- l'aléa « mouvements de terrain » peut déclencher immédiatement ou de façon différée l'aléa « inondation ». L'aléa « inondation » peut soit être nouveau aléa, il n'y avait pas d'aléa inondation avant le mouvement de terrain, ou soit aggravé pour une zone déjà reconnue inondable.
  - o Exemple : un mouvement de terrain de type affaissement pourrait induire, en cas de fortes précipitations, l'inondation de ce secteur, alors que la situation était inexistante avant l'occurrence de l'affaissement.

L'évaluation du type et du niveau d'interaction doit être réalisée par des experts. Chaque cas est un cas particulier nécessitant d'examiner les facteurs de prédisposition et les facteurs déclenchants. Cette évaluation doit être complétée par des études complémentaires et des observations afin de confirmer ou d'affirmer l'existence de ces interactions.



### Interaction entre les aléas – niveau 1

Figure 4 : Interactions possibles entre les deux principaux aléas : « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) d'origine naturelle ou/et anthropique

#### 3.5.2 Interactions qualitatives au niveau opérationnel

Dans cette partie, les interactions possibles entre les aléas opérationnels ont été analysées. Il a été décidé de placer les aléas « mouvements de terrain » au centre des boucles d'interaction.

Dans un premier temps, les interactions entre les aléas opérationnels ont été étudiées, soit 11 aléas (Tableau 4), 5 concernant les aléas « mouvements de terrain » et 6 concernant les « inondations », ont été identifiés.

Pour les trois types de mouvements de terrain : affaissement (AFF), effondrement localisé (FON) et effondrement généralisé (EFF), des interactions ont été identifiées avec la quasi-totalité des aléas « inondation », à l'exception de l'aléa « inondation par submersion maritime » (SM), peu de cavités se trouvant proches des côtes. Ces interactions sont présentées en Figure 5. Elles ont été définies selon le retour d'expérience et par avis d'expert.

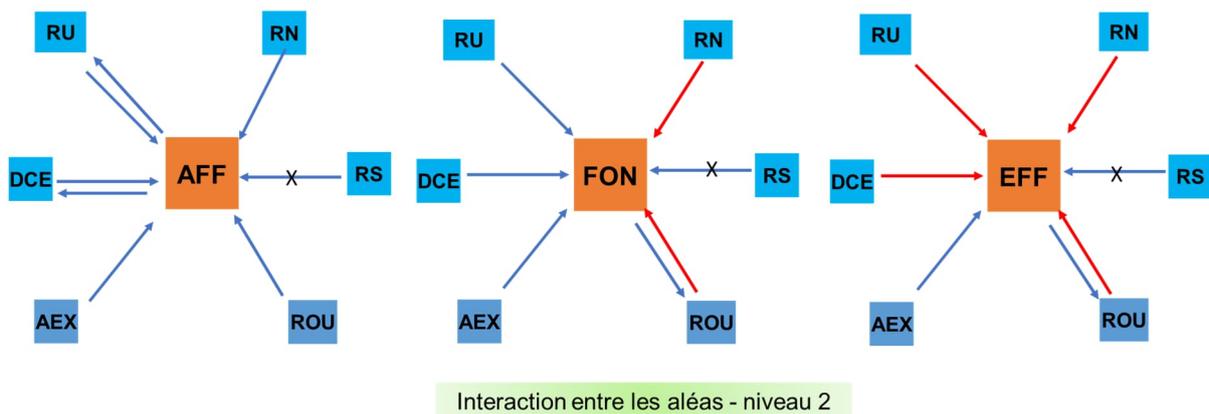


Figure 5 : Interactions possibles entre les aléas « mouvements de terrain » (AFF, FON et EFF) et les aléas « inondation » (RS, RN, RU, DCE, AEX et ROU)

L'aléa « affaissement », est jugé comme le moins dépendant des aléas « inondation » dans leur ensemble (interaction faible). D'un point de vue temporel, l'aléa « affaissement » peut être déclenché de manière immédiat ou différé après l'occurrence de l'inondation, indépendamment de son origine (naturelle : RN, RU et DCE ou accidentelle : AXE et ROU). L'aléa « affaissement » peut, quant à lui, déclencher deux aléas de type « inondation » (RU et DCE). Dans ces deux derniers cas, l'examen des cartes d'aléas permettrait de préciser l'interaction spatiale entre ces aléas.

Tous les aléas de type « inondation » peuvent interagir avec l'aléa « fontis », les aléas « remontée de nappe » (RN) et « rupture d'ouvrage » (ROU) étant considérés de niveau élevé par rapport aux autres interactions (RU, DCE et AEX). L'aléa « fontis » peut également être à l'origine d'un aléa « inondation » mais uniquement de type rupture d'ouvrage « OUV ». Néanmoins, ce type d'interaction est jugée moins forte que celle correspondante à l'occurrence de l'aléa « fontis » causé par la rupture d'ouvrage.

Tous les aléas de type « inondation » peuvent interagir avec l'aléa « effondrement généralisé », à l'exception de celui lié à la submersion maritime (SM). Les cinq aléas « inondation » (RN, RU, DCE, AEX et ROU) peuvent déclencher ou contribuer à accélérer l'occurrence de l'aléa « effondrement généralisé » (EFF). Les interactions sont jugées élevées pour l'ensemble des aléas à l'exception de l'arrêt de l'exhaure. L'occurrence d'un effondrement généralisé « EFF » peut déclencher, comme dans le cas de l'aléa « fontis » (FON) un aléa « inondation » par l'aléa « rupture d'ouvrage » (OUV).

Dans un second temps, une étude plus poussée des interactions liées à l'aléa « fontis » a été réalisée. Ainsi, les interactions entre les aléas « inondation » et les phénomènes de remontée de cloche (RE), débouillage (DE) et suffosion (SU) ont été examinés (Figure 6).

On constate que les aléas « inondation » interagissent plus fortement avec l'aléa « fontis » (FON) lié à la remontée de cloche (RE). L'aléa « fontis » par débouillage (DE) est surtout sensible à la remontée de la nappe (RN), qui pourrait déstabiliser le remblai mal compacté des puits. La suffosion est sensible à l'eau quel que soit son origine. Ce phénomène n'existe pas en l'absence de l'action de l'eau.

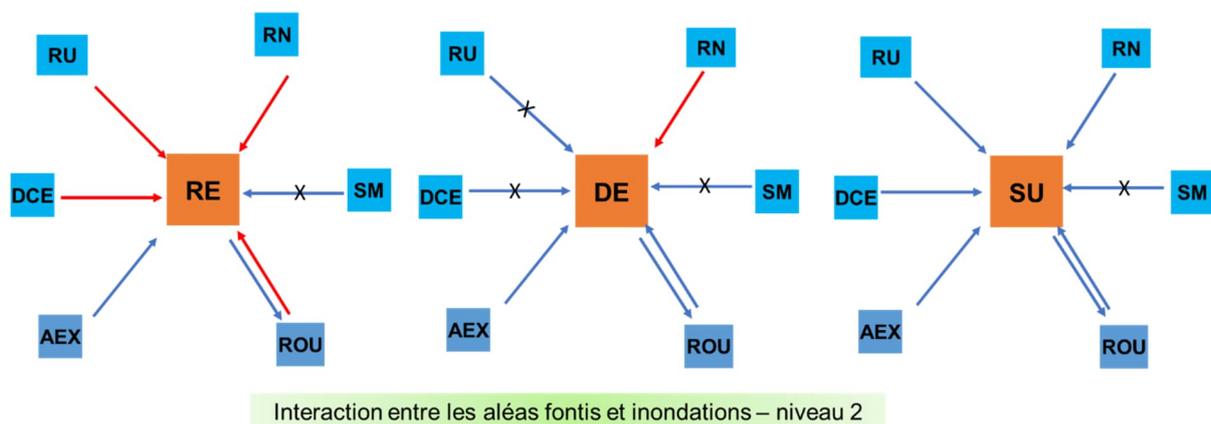


Figure 6 : Interactions possibles entre les aléas « fontis » (RE, DE et SU) et les aléas « inondation » (RS, RN, RU, DCE, AEX et ROU)

### 3.6 Exemples d'arbres d'interaction entre aléas (MVT-INO)

Afin de préciser les interactions entre les aléas « mouvements de terrain » et « inondation », une approche par arbres d'interaction a été utilisée. Ce mode de présentation, proche d'un arbre de causes et de conséquences utilisé en analyse de risque, est un outil très utile pour qualifier les interactions et construire des scénarios d'occurrence des aléas.

Ces arbres d'interaction ont été réalisés pour quatre aléas « mouvements de terrain » : le fontis par remontée de cloche (RE), le débouillage (DE) en intégrant la rupture de la tête de puits, l'affaissement (AFF) et l'effondrement généralisé (EFF) (Figure 7 à Figure 10).

Pour chacun de ces aléas (MVT), les principaux critères géométriques (notamment la profondeur de la cavité et le taux de défrètement) ainsi que les caractéristiques géologiques (nature du matériau exploité, existence de failles...) ont été utilisés comme point de départ.

À partir de ces contextes spécifiques, les impacts des principaux aléas inondations ont été définis et le niveau d'interaction a été qualifié (moyen, fort et très fort). Il est également proposé dans ces arbres d'interaction, en première approche, l'impact potentiel de ces interactions sur les niveaux d'aléa « mouvements de terrain » initiaux.

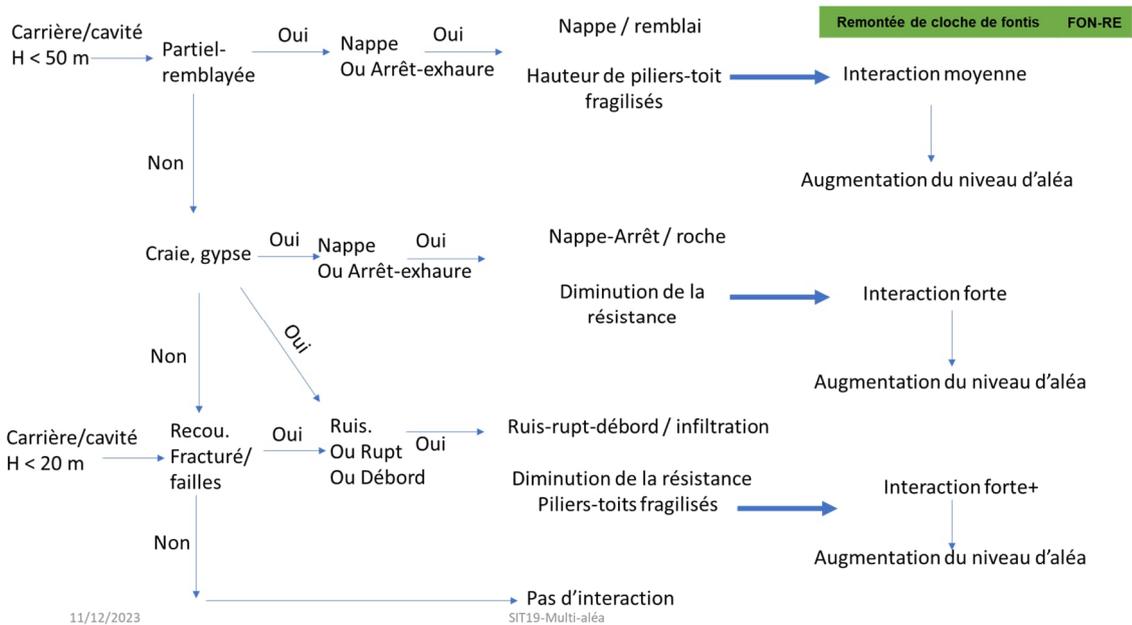


Figure 7 : Arbre d'interaction entre l'aléa « remontée de cloche de fontis » (RE) et les aléas « inondation », « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU)

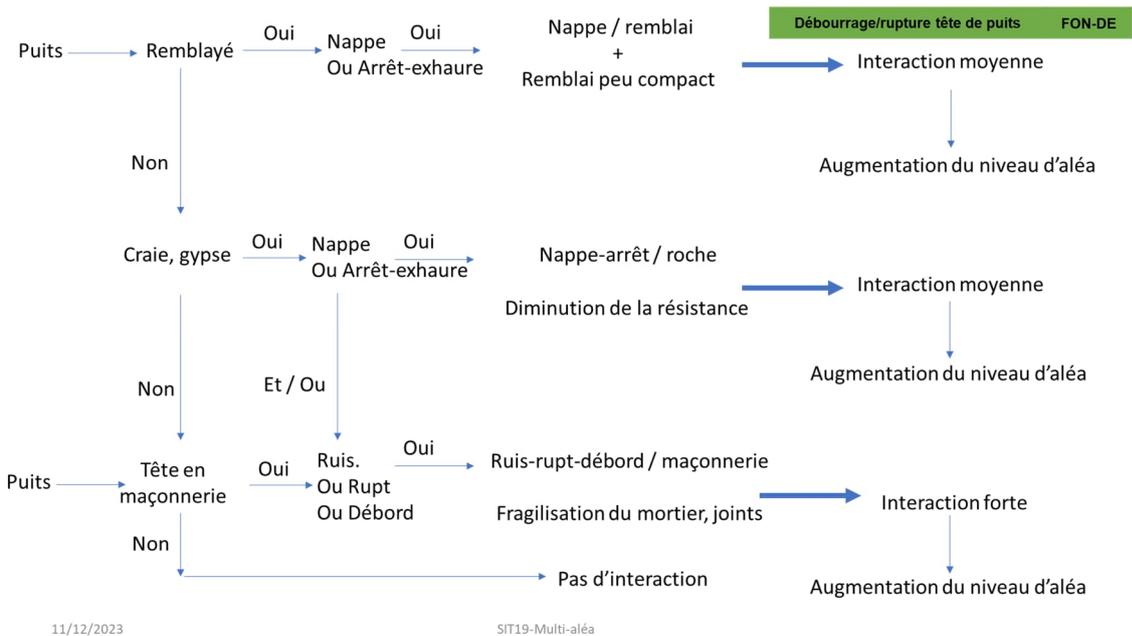


Figure 8 : Arbre d'interaction entre l'aléa « remontée de fontis par débouillage » (DE) et les aléas « inondation » : « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU)

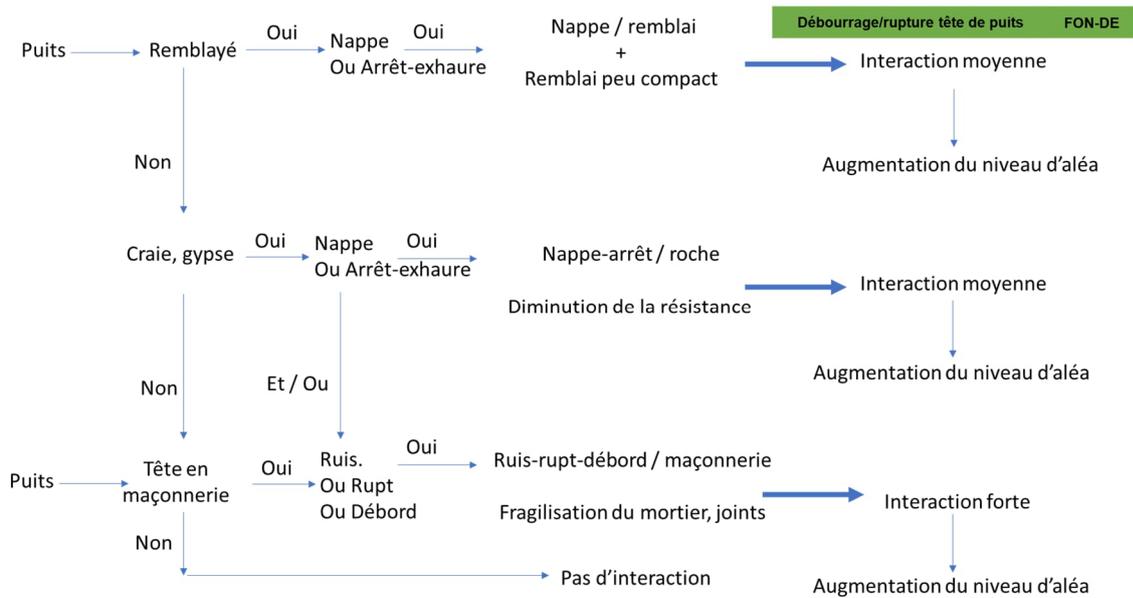
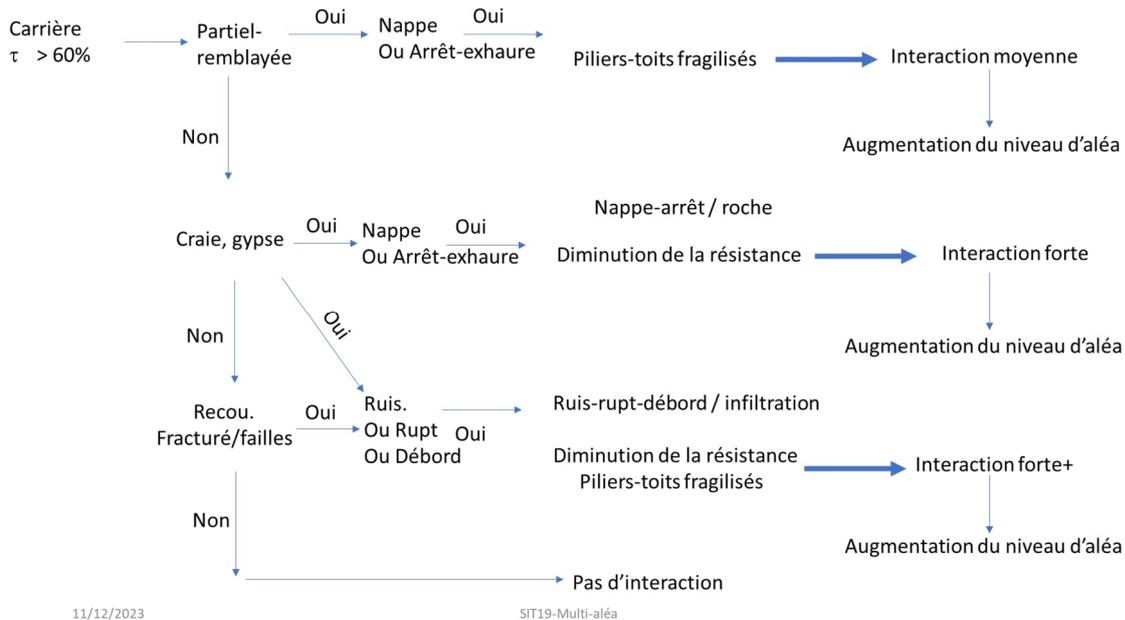


Figure 9 : Arbre d'interaction entre l'aléa « Affaissement » (AFF) et les aléas « inondation », « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU)



11/12/2023

SIT19-Multi-aléa

Figure 10 : Arbre d'interaction entre l'aléa « effondrement généralisé » (EFF) et les aléas « inondation » : « remontée de nappe » (RN), « rupture d'ouvrage » (ROU), « débordement de cours d'eau » (DCE), « ruissellement » (RU)

Sur la base des analyses d'interaction qui ont été présentées, le Tableau 5 synthétise les niveaux d'interaction entre les aléas « mouvements de terrain » et « inondation ». Les aléas « mouvements de terrain » sont considérés ici comme les aléas cibles et les aléas « inondation » comme des aléas sources. Il met ainsi en avant l'impact des aléas « inondation » sur les aléas « mouvements de terrain ».

Tableau 5 : Niveau d'interaction (vert : faible ou sans interaction ; orange : interaction moyenne ; rouge : interaction forte).

		Aléa cible				
		AFF	RE	DE	SU	EFF
Aléa source	DCE	Orange	Rouge	Orange	Orange	Rouge
	RU	Orange	Rouge	Orange	Orange	Orange
	RN	Orange	Orange	Vert	Vert	Rouge
	SM	Vert	Orange	Vert	Vert	Vert
	ROU	Orange	Rouge	Rouge	Vert	Orange
	AEX	Orange	Orange	Vert	Vert	Orange

### 3.7 Évaluation de l'interaction des cas identifiés par les DREAL

Au cours de cette étude, l'Ineris a développé une approche générale d'identification et de caractérisation des interactions entre phénomènes naturels, incluant des phénomènes gravitaires (effondrements de cavités, éboulements rocheux, glissements...). Elle est basée sur des problématiques locales, identifiées par retour d'expérience des services déconcentrés de l'État.

Sur la base des retours d'expérience identifiés par les DREAL lors de la première phase de l'étude (2018-2021), 23 cas répartis sur 5 régions, ont été analysés afin de définir les niveaux d'interaction entre les aléas cavité - mouvement de terrain et les aléas inondations (Tableau 6). À noter que cette analyse n'a pas été réalisée de façon détaillée en raison de l'absence de données précises sur les cavités (dimensions, profondeur, recouvrement, etc.).

Deux niveaux d'analyse ont été réalisés. Le niveau 1 qui implique une interaction systématique de niveau fort, pour tous les cas. Le deuxième niveau d'analyse qui montre que, sur l'ensemble de ces cas d'étude, la plupart concernent l'interaction entre l'aléa remontée de cloche de fontis (RE) et les aléas « inondation » de type débordement de cours d'eau (DCE), ruissellement (RU), et remontée de nappe (RN). Les niveaux d'interaction sont variables, le plus important (niveau fort) étant affecté aux deux carrières de craie, sensibles à l'eau. La comparaison entre ces deux niveaux d'analyse montre qu'une analyse détaillée est nécessaire pour distinguer les différences entre les aléas considérés et les interactions associées.

Tableau 6 : Cas d'interaction entre l'aléa « cavité – mouvements de terrain » et l'aléa « inondation » – analyse selon la méthodologie : niveau 1 (global) et niveau 2 (détaillé)

Région	Département	Commune	Aléas	Type d'inondation	Type de cavité	Interaction Niveau 1	Interaction Niveau 2
Bretagne (2 cas)	Morbihan (56)	Pénéstin (n°15)	Cavité-Mine- Inondation (Maritime / nappe) / Falaise	Submersion maritime Débordement de cours d'eau	2 cavités –ouvrages militaires		Remontée fontis- DCE Interaction faible à moyenne
		Sauzon (8)	Cavité/glisserment/sismique/Eau/Erosion	Action des vagues, Mer/Marée	Plusieurs cavités naturelles (cavités et puits), un ouvrage militaire		Pas d'interaction
Provence-Alpes-Côte d'azur (2 cas)	Bouches-du-Rhône (13)	Roquevaire (n°6)	Carrière/cavité/ inondation	Inondation - Par ruissellement et coulée de boue, Inondation - Par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau	Une carrière (calcaire) + plusieurs cavités naturelles		Remontée fontis- DCE/RU Interaction faible à moyenne
		Peypin (n°14)	Carrières / Mines / Inondation	Inondation - Par ruissellement et coulée de boue, Inondation - Par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau	Deux carrières (calcaire) + plusieurs cavités naturelles		Remontée fontis- DCE/RU Interaction faible à moyenne
Centre-Val de Loire (2 cas)	Loiret (45)	Gidy (n°7)**	Carrières\inondation	Inondation - Par remontées de nappes naturelles	Cave, carrière (craie), cavités naturelles, ouvrage civil		Remontée fontis- RN Interaction forte
		Chécy *		Inondation - Par ruissellement et coulée de boue Inondation, Par remontées de nappes naturelles ; Par ruissellement et coulée de boue, Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Cave, carrière (craie), cavités naturelles, ouvrage civil		Remontée fontis- DCE/RU/RN Interaction moyenne à forte

Région	Département	Commune	Aléas	Type de l'aléa inondation	Type de cavités	Interaction Niveau 1	Interaction Niveau 2
Haute-de-France (4 cas)	Aisne (02)	Saint-Quentin (n°1)	Mouvements/ inondation	Inondation - Par remontée de nappes naturelles, Par ruissellement et coulée de boue, Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Beaucoup des cavités de nature indéterminée et deux ouvrages militaires		Remontée fontis- DCE/RU/RN Interaction faible à moyenne
		Oeuilly (n°2)	Affaissements et effondrements	Inondation par une crue à débordement lent de cours d'eau	Une carrière (calcaire – chambre et piliers), plusieurs indéterminées, plusieurs ouvrages civils, deux ouvrages militaires		Affaissement-effondrement – DCE Interaction faible à moyenne
		Pargnan	Affaissements et effondrements	Inondation Par une crue à débordement lent de cours d'eau	plusieurs indéterminées, plusieurs ouvrages civils,		Affaissement-effondrement – DCE Interaction faible à moyenne
	Nord (59)	Cambresis (n°3)	Mouvements/ inondation	Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Plusieurs caves, plusieurs carrières (craie), 2 cavités naturelles, deux cavités indéterminées		Remontée fontis- DCE Interaction moyenne

Région	Département	Commune	Aléas	Type de l'aléa inondation	Type de cavités	Interaction niveau 1	Interaction niveau 2
Nouvelle Aquitaine (1)	Vienne (86) - Vallée du Clain – plusieurs communes	Aslonnes,	Mouvement (Karstou Grottes)/Inondation	Inondation - Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Plusieurs cavités naturelles		Remontée fontis- DCE Interaction faible
		Château-Larcher		Inondation - Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Une carrière, une cavité naturelle, souterrain?		Remontée fontis- DCE Interaction faible
		Dienné		Crue pluviale	Une seule cavité naturelle		Pas d'interaction
		Fleuré		Crue pluviale	Une seule cavité naturelle		Pas d'interaction
		Gizay		Crue pluviale, rupture d'ouvrage, nappe	Une seule cavité naturelle		Pas d'interaction
		Iteuil		Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Une seule cavité naturelle		Pas d'interaction
		Marnay		Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Quatre cavités naturelles		Pas d'interaction
		Nouaillé-Maupertuis		Crue pluviale (temps montée indéterminé), Barrage	Une carrière et plusieurs cavités naturelles		Remontée fontis- DCE Interaction faible
		Roches-Prémarie-Andillé		Inondation - Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Une seule cavité naturelle		Pas d'interaction
		Smarves		Inondation - Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Quatre cavités naturelles		Pas d'interaction
		Vivonne			3 cavités naturelles		Pas d'interaction
Montmorillon (n°5)	Par une crue à débordement lent de cours d'eau	Plusieurs cavités naturelles		Pas d'interaction			

## 4 Cas d'application : commune de Peypin

### 4.1 Description

La commune de Peypin (13), située à 21 km au Nord-Est de Marseille et 22 km au Sud-Est d'Aix-en-Provence, est une commune de 5600 habitants, de densité relativement importante.

Traversée par l'autoroute A52, et plusieurs routes départementales (D7, D8, et D46A), elle possède également une zone d'activités industrielles comportant plus de 70 entreprises.



Figure 11 : Localisation de la commune de Peypin (Source : GoogleMap)

L'environnement géologique du site est particulièrement perturbé du fait de la forte activité tectonique régionale (Figure 12). Le secteur se situe au Sud du bassin de l'Arc, au Nord du chevauchement sud-provençal, entre la Chaîne de l'Etoile et le Massif de Régagnas. Les formations géologiques sont les suivantes :

- les formations quaternaires ;
- les formations tertiaires du Stampien, qui s'étendent essentiellement dans la partie Sud du territoire ;
- les formations secondaires du Crétacé qui renferment au sommet des argiles et marnes, alternant avec des calcaires gris et des brèches du Bégudien. Le Fuvélien est représenté par des calcaires gris en plaquettes ou en bancs épais, parfois argileux, qui constituent le faciès. En outre, plusieurs couches de lignite, également exploitées en travaux souterrains, sont intercalées dans cette formation qui recouvre une grande partie du secteur. A la base, le Valdonnien comportant des argiles rougeâtres à la base, puis des marnes et des calcaires en lits ou en bancs, s'observe au Nord de Valdonne, près de l'ancienne cimenterie. Le Barrémien se présente sous la forme de calcarénites blanches massives ;
- les formations secondaires du Jurassiques supérieur qui sont présentes au Sud de "l'Auberge Neuve". Le Portlandien inférieur est constitué de calcaires dolomitiques reposant sur des dolomites pulvérulentes et des lentilles bréchiques. Les calcaires gris ou beiges du Kimméridgien affleurent à Peypin et au niveau de la "Mauvaise Bastide» ;

- les formations secondaires du Jurassique moyen qui sont représentées au Sud par le Bathonien et Bajocien supérieur. La série, formée par des alternances de calcaires noirs et de calcaires argileux, affleure près du puits d'Armant.

La position structurale de ce secteur constitue la bordure méridionale du Bassin de l'Arc, à l'Est de la chaîne de l'Etoile, qui chevauche les formations supra-crétacées du bassin lignifère de Fuveau-Gardanne. Les collines de Peypin et du Terme sont des témoins du charriage de l'allochtone de l'Etoile au cours de la surrection du massif autochtone d'Allauch.

Le secteur est traversé par des failles subverticales d'orientation générale Est-Ouest affectant les formations crétacées et jurassiques. Les calcaires du Fuvélien et Vandonnien sont pentés vers l'Ouest au Nord du secteur, et vers le Sud au niveau de "La Bouilladisse".

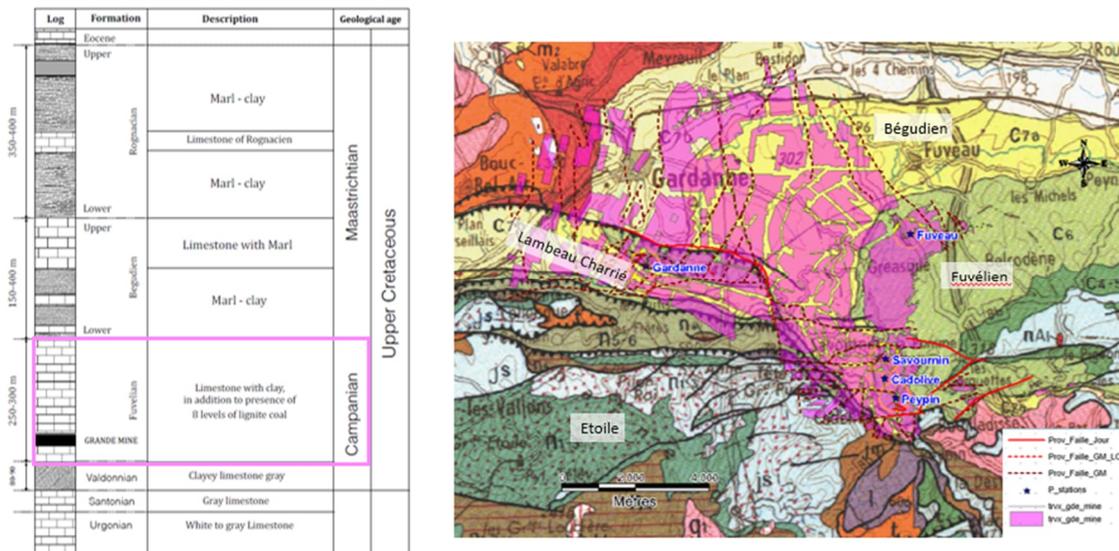


Figure 12 : Géologie et exploitation minière du bassin houiller de lignite. Le gisement s'approfondit vers l'ouest. Peypin se trouve à l'est du bassin (Ineris, 2007)

Les cavités souterraines (hors mines<sup>2</sup>) présentes dans la commune de Peypin sont des carrières de pierre à ciment. Elles ont été exploitées de manière intensive dans ce secteur principalement sur deux couches. La première couche, "La Valentine", est épaisse de 1,70 m et se situe à 2,50 m environ de la seconde couche, "Portland", épaisse de 2,50 m.

Deux bassins versants hydrogéologiques drainants sont délimités par la montagne de Régagnas : au Nord, le bassin versant sud de la rivière l'Arc et au Sud celui de la rivière de l'Huveaune. Au lieu-dit "Valdonne", les deux massifs séparés par le col de la Pomme conduisent le Merlançon, affluent de l'Huveaune, seul cours d'eau qui reçoit les ruisseaux de Teisset et de la Rouvière. Les débits des cours d'eau sont fortement dépendants des pluies issues des bassins versants très abrupts. Le Bégudien, à dominante marneuse dans la partie orientale du bassin, n'alimente que quelques petites émergences. Les formations Fuvéliennes ne présentent pas d'exutoire ; elles constituent donc un aquifère dont le mur correspondrait au toit du Valdonnien. D'importantes venues d'eau par ailleurs ont empêché l'extension des exploitations minières vers l'Est. Le massif de l'Etoile est drainé par la galerie d'évacuation des eaux des exploitations houillères dite "galerie de la mer".

Plusieurs aléas ont été recensés dans la commune de Peypin, ils peuvent être regroupés comme suit :

- aléas « naturels » : feu de forêt ; inondation ; sismicité naturelle ; mouvements de terrain (affaissements et effondrements liés aux cavités souterraines, éboulement - chutes de pierres et de blocs et glissement de terrain) ;

<sup>2</sup> La commune de Peypin appartient au bassin houiller de Provence, des exploitations minières de lignite existe, mais ce rapport ne traite pas de leur interaction avec les aléas naturels y compris les aléas liés à la présence de cavités souterraines.

- aléas « miniers » : mouvements de terrain (affaissement et glissement) ; inondation, échauffement. Ils ne sont pas traités dans ce rapport ;
- aléas « technologiques » en relation avec la pollution des sols, les anciens sites industriels et les installations classées.

De plus, entre 1982 et 2018, 11 arrêtés ont porté sur la reconnaissance de catastrophes naturelles sur la commune de Peypin dont cinq relatifs aux inondations.

## 4.2 Aléas naturels

Plusieurs aléas « naturels » ont été identifiés sur la commune de Peypin : feu de forêt ; inondation ; sismicité naturelle ; mouvements de terrain (affaissements et effondrements liés aux cavités souterraines, éboulement - chutes de pierres et de blocs et glissement de terrain) et retrait-gonflement des argiles<sup>3</sup>. La commune de Peypin dispose de deux PPR approuvés. Ils concernent le phénomène de retrait/gonflement des argiles et les effondrements liés à la présence des cavités souterraines (hors mines).

### 4.2.1 Aléa « mouvements de terrain »

La commune de Peypin est en partie sous-minées par d'anciennes des carrières souterraines abandonnées (Figure 13) et par des cavités naturelles. Les carrières sont constituées par quatre parties distinctes. Le réseau est marqué par un faible pendage, environ cinq degrés. Les galeries sont la plupart du temps basses (2 mètres à 3 mètres), le tout sur un seul niveau. Ces exploitations ont vraisemblablement pour la plupart débutées à ciel ouvert, avant de se poursuivre sous forme d'excavations souterraines plus ou moins étendues. En l'absence de travaux de confortement, les carrières souterraines subissent un vieillissement naturel qui conduit inéluctablement à la ruine des ouvrages.



*Figure 13 : Carrières souterraines abandonnées de pierre à ciment (Commune de Peypin, crédit patrimoine industrielle), (Ineris, 2014)*

La *Figure 14* représente la localisation de ces cavités anthropiques et naturelles selon les données disponibles sur le site internet [georisques.gouv.fr](http://georisques.gouv.fr).

En lien avec la présence de ces cavités souterraines, des aléas « mouvements de terrain de type « effondrement localisé » ont été identifiés. L'évaluation de cet aléa dans la commune de Peypin a conduit à définir que les terrains situés à l'aplomb ou à proximité immédiate d'anciennes exploitations souterraines (carrières de pierres à ciment) correspondent à un niveau d'aléa « fort » tandis que les terrains de surface non directement sous-minés mais situés en bordure d'exploitation correspondent à un niveau d'aléa « faible » (Figure 15).

<sup>3</sup> Les aléas naturels cités dans cette note proviennent du site web de référence : [georisques.gouv.fr](http://georisques.gouv.fr) consulté en février 2021.

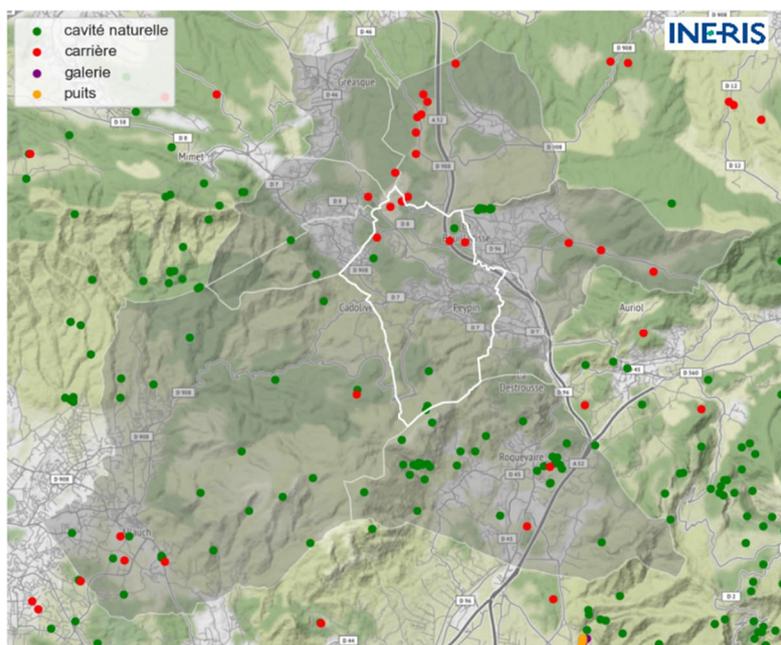


Figure 14 : Localisation des cavités naturelles et ouvrages souterrains hors mines ( carrières, puits et galeries) dans la commune de Peypin (les données sont issues du site georisques.gouv.fr) ; cette figure est présentée en illustration

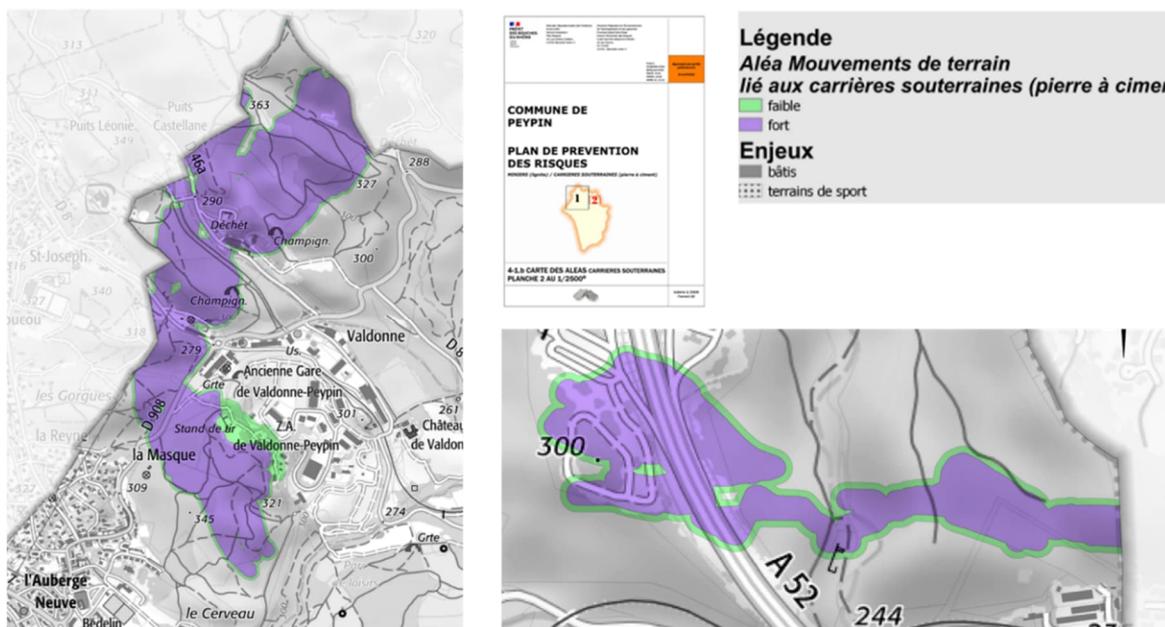


Figure 15 : Localisation de l'aléa « mouvements de terrain » sur deux secteurs (1 à gauche et 2 à droite) de la commune de Peypin lié à la présence des cavités souterraines – carrière de pierre à ciment – PPRM – Peypin<sup>4</sup>

<sup>4</sup> <https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/La-prevention/Les-plans-de-prevention-des-risques-naturels-approuves-dans-les-Bouches-du-Rhone/PEYPIN>

## 4.2.2 Aléa « inondation »

L'aléa inondation est évalué et cartographié sur le bassin de l'Huveaune dont fait partie la commune de Peypin (nord du bassin).

L'aléa « inondation » sur la commune de Peypin est évalué et cartographié le long des deux cours d'eau qui traversent la commune, à savoir : la Merlançon et le ruisseau du Grandpré. Il s'agit donc d'un aléa par débordement de cours d'eau. Les niveaux d'aléa associés sont : faible, moyen et fort. Toutefois les surfaces concernées sont relativement limitées.

À cet aléa inondation par débordement de cours d'eau peut s'ajouter également l'inondation accidentelle liée à la rupture de canalisation ou de réseaux d'eau potable.

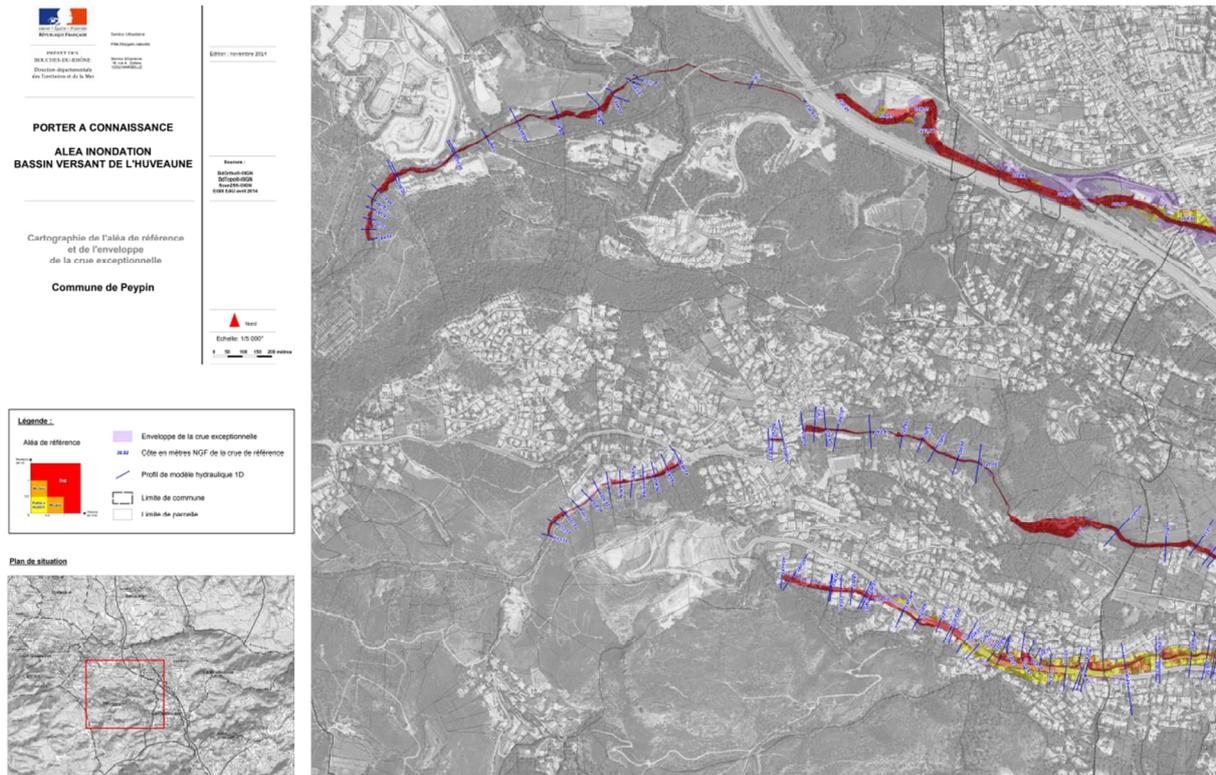


Figure 16 : Niveau de l'aléa « inondation » pour la commune de Peypin (carte issue du site internet de la préfecture du Bouches-du-Rhône, consulté en février 2021)

## 4.3 Évaluation de l'interaction entre les deux aléas

Les deux aléas « mouvements de terrain » et « inondation » peuvent se superposer sur certains secteurs de la commune de Peypin, nous avons analysé ces différentes situations.

### 4.3.1 Niveau principal – analyse globale

Pour le premier niveau d'analyse ou analyse globale, les interactions entre les aléas « mouvements de terrain » et « inondation » ont été étudiées. Les aléas « inondation » ont été scindés en deux pour dissocier d'une part l'inondation naturelle (INO-NAT) et d'autre part, l'inondation accidentelle (INO-ACC). La Figure 17 présente l'interaction entre les aléas, en tenant compte notamment des contextes géologiques et topographiques de la commune. L'interaction entre l'aléa « inondation » d'origine naturelle (débordement de cours d'eau) et l'aléa « mouvements de terrain » associé aux carrières de pierre à ciment est évaluée comme forte. En effet, l'action de l'eau peut engendrer une fragilisation de la carrière (toit et piliers) et des terrains de recouvrement. On note une interaction faible pour les autres aléas (INO-acc et MVT et MVT et INO-NAT).

La Figure 18 représente également une proposition de la réévaluation (aléa ajusté) du niveau de l'aléa « mouvements de terrain » (MVT) en fonction de l'aléa « inondation » (INO). On note que dans le cas où les deux aléas sont faibles, l'aléa « mouvements de terrain » garde son niveau. Dans le cas où l'aléa « mouvements de terrain » est fort, ce niveau est maintenu quel que soit le niveau de l'aléa

« inondation ». Pour les autres configurations, il est recommandé d'ajuster le niveau d'aléa pour tenir compte de l'interaction entre les deux aléas.

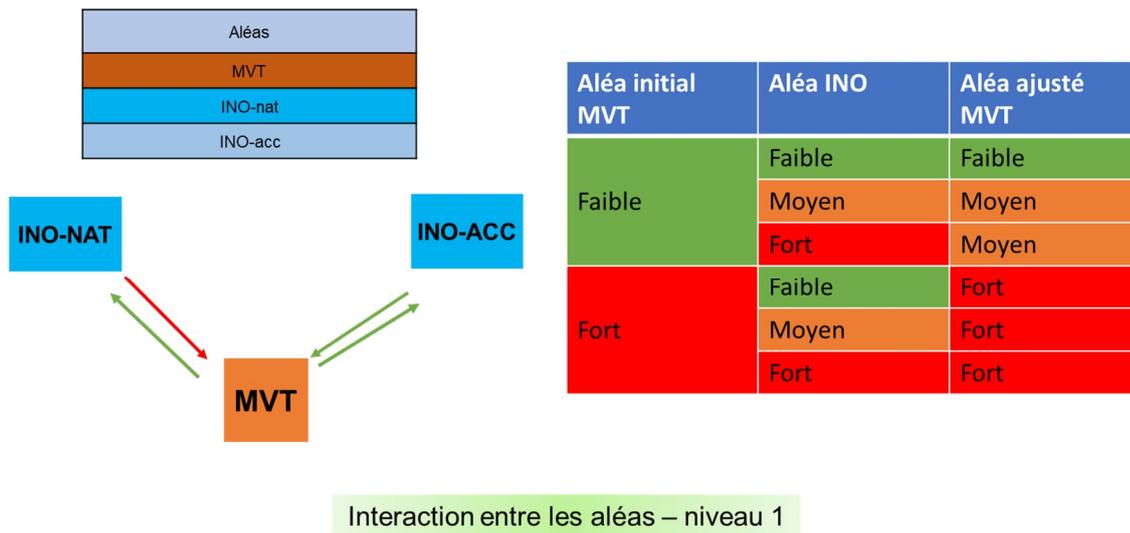


Figure 17 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), une flèche verte correspond à une interaction faible et une flèche rouge indique une interaction forte ; ajustement de l'aléa « mouvement de terrain » (MVT)

#### 4.3.2 Niveau opérationnel - analyse détaillée

Dans un deuxième temps, une analyse plus spécifique sur les interactions entre l'aléa « mouvements de terrain » et trois aléas (sous-aléa) « inondation » : par ruissellement (RU), par débordement de cours d'eau (DCE) et liée à l'ennoyage des mines de charbon et/ou aux rupture des réseaux a été réalisée.

La Figure 18 présente les interactions entre ces aléas. On note qu'il y a 4 interactions potentielles : 3 de niveau faible et une de niveau fort. On note que seul l'aléa (DCE) correspond à une double interaction : l'aléa « débordement de cours d'eau » peut impacter l'aléa « mouvements de terrain » et l'aléa « mouvements de terrain » peut à son tour impacter l'aléa « débordement de cours d'eau ».

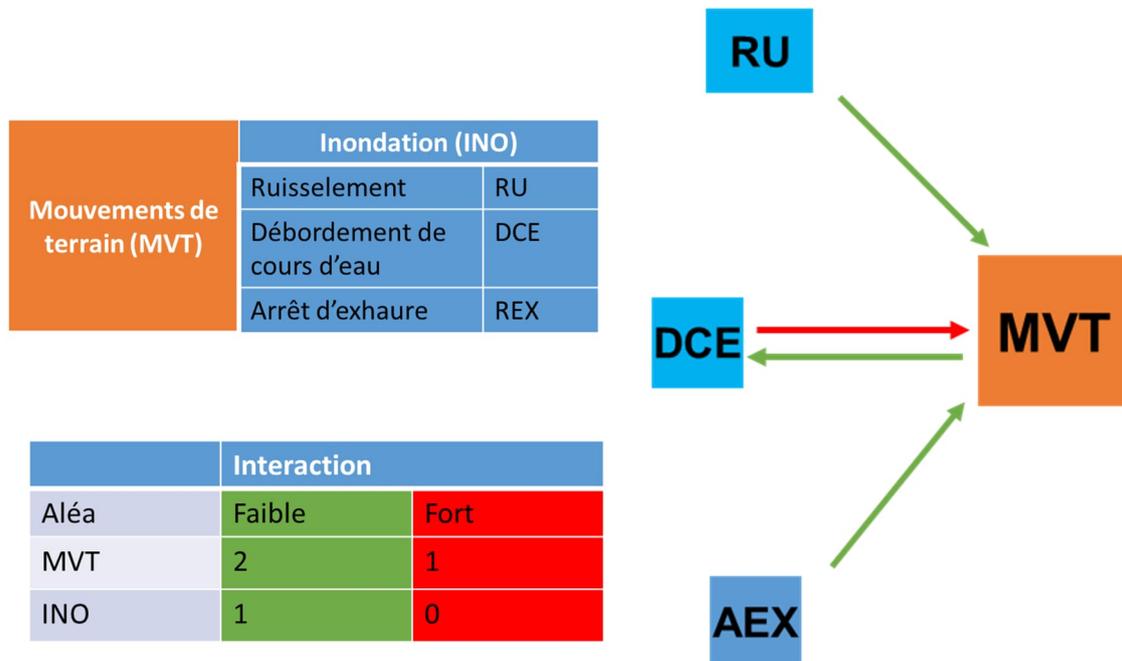


Figure 18 : Interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), prenant en compte les sous-aléas « inondation »

La Figure 19 représente également l'ajustement de l'aléa (MVT) en fonction soit d'un sous-aléa « inondation » soit de plusieurs aléas « inondation ». Dans ce cas, un aléa inondation doit être évalué pour combiner l'ensemble des aléas « inondation ». Cette analyse est une suggestion, l'expert en charge de l'étude peut potentiellement modifier le niveau de l'aléa ajusté en fonction des informations disponibles pour chaque zone ou configuration.

Aléa initial MVT	Aléa Inondation - INO				Aléa ajusté MVT
	DCE	RU	AEX	INO	
Faible	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert
	Vert	Vert	Orange	Vert	Vert
	Vert	Orange	Rouge	Orange	Orange
	Vert	Orange	Rouge	Rouge	Rouge
Fort	Vert	Vert	Vert	Vert	Rouge
	Orange	Orange	Orange	Orange	Rouge
	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge

Figure 19 : Interactions entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO), prenant en compte les sous-aléas inondations

Une analyse des interactions a également été réalisée par la construction d'un arbre d'interaction permettant de prendre en compte les caractéristiques de la carrière (matériau, profondeur, recouvrement) et les conséquences de l'interaction (fragilisation du remblai et de la roche, diminution de la résistance...). Ces causes liées à la présence de deux aléas permettent d'évaluer le niveau d'interaction et la nécessité d'ajuster ou non le niveau d'aléa (MVT) initial. La Figure 20 illustre cette démarche et les questions nécessaires de se poser pour établir les interactions et évaluer les conséquences en fonction des réponses données par les experts. On note que la roche de calcaire – pierre à ciment – est moins sensible à l'eau que la craie de Cambrésis (cf. Chapitre 5), en revanche le taux de défrètement est plus élevé dans le cas des carrières de pierre à ciment.

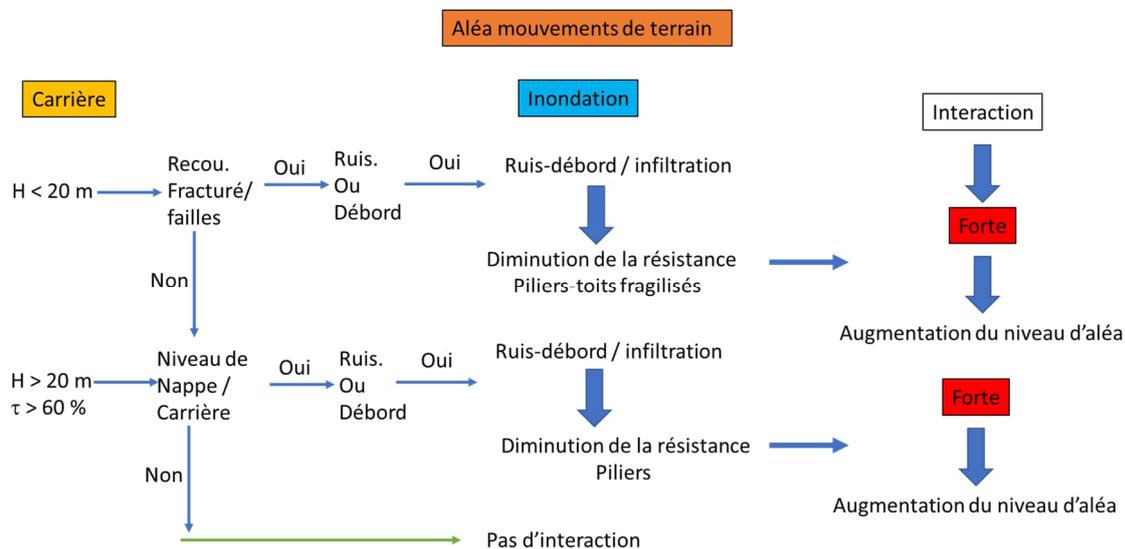


Figure 20 : Arbre d'interaction entre les deux aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO) pour les carrières souterraines de pierre à ciment – commune de Peypin

#### 4.3.3 Calcul de l'indice Multi-Aléa (MH)

Nous avons également calculé l'indice Multi-aléa (MH), ce calcul a été réalisé en considérant deux aléas et deux interactions fortes. Les étapes et les résultats de calcul sont présentés sur la Figure 21. Dans

le cas de Peypin, nous avons considéré deux aléas globaux : (MVT) (faible, moyen et fort) et (INO) (faible, moyen et fort) et deux niveaux d'interaction : forte et faible.

À titre d'exemple, le premier indice calculé tient compte d'un niveau d'aléa (MVT) de niveau faible et d'une interaction faible combiné à un aléa (INO) de niveau faible considérant une interaction forte, soit :

$$MH = 1 \times 1 + 1 \times 1,2 = 2,2$$

Aléas initiaux			Coefficient d'ajustement		Deux types d'interaction			Calcul MH			
Aléa initial	MVT	INO	Interaction	Caj	Aléa	Faible	Fort	Aléa	MVT	INO	MH
Faible	x	x (S2)	Faible	1	MVT	1	0	Faible	1	1	2,2
Moyen		x (S2)	Moyen	1,1	INO	0	1	Faible	1	1,2	2,44
Fort	x	x (S2)	Fort	1,2				Fort	1,3	1	2,5
										1,2	2,56
										1,3	2,74
										1,3	2,86

Figure 21 : Indice MH (multi-hazard intensity indice) pour la première analyse ou analyse globale de l'interaction entre les aléas « mouvements de terrain » (MVT) et « inondation » (INO)

La Figure 22 représente la valeur de MH en fonction des niveaux d'aléa d'un aléa « mouvements de terrain » et de 3 aléas « inondation » (débordement de cours d'eau, ruissellement et exhaure). Au total 18 configurations ont été considérées La valeur de MH varie de 4,2 à 5,46. La valeur la plus faible correspond à des aléas ayant tous un niveau faible et deux interactions faibles et une interaction forte (cf. Figure 18). La valeur la plus élevée correspond à des aléas ayant tous un niveau élevé (fort). Nous avons indiqué les valeurs de MH en l'absence des aléas inondations et pour les trois niveaux faible, moyen et fort. La valeur de MH permet clairement de montrer l'importance de la prise en compte de l'interaction entre les aléas.

Aléa initial MVT	Aléa Inondation - INO			MH
	DCE	RU	AXE	
Faible				<b>1</b>
				<b>4,2</b>
				4,4
				4,5
				4,6
				4,7
				4,84
				4,80
				5,16
				1,3
Fort				4,5
				4,7
				4,8
				4,9
				5,14
				5
				5,10
				<b>5,46</b>

Figure 22 : Calcul de la valeur de MH pour les aléas « mouvements de terrain » (MVT), l'aléa « débordement de cours d'eau » (DCE), l'aléa « ruissellement » (RU) et l'aléa « inondation » d'origine accidentelle liée à l'exhaure (AXE)

## 4.4 Conclusion

La commune de Peypin (13) présente plusieurs aléas naturels dont les aléas « inondation » (INO) et mouvement de terrain (MVT) associés à la présence carrières souterraines abandonnées. L'interaction entre les deux aléas dans cette commune est évidente car les facteurs de prédispositions de deux aléas se croisent (craie, profondeur, nappe, cours d'eau, réseaux, etc.).

Pour établir cette interaction, la méthodologie proposée dans cette étude a été utilisée. Elle tient compte des informations disponibles sur les deux aléas issus des PPRI et PPRM existant sur la commune.

La première analyse (globale) entre les deux aléas a montré que l'interaction est de niveau fort. L'arbre d'interaction a permis de préciser les conditions de cette interaction.

La deuxième analyse, plus détaillée prend en compte trois aléas « inondation », à savoir : le débordement de cours d'eau (DCE), la remontée de nappe (RN) et le ruissellement (RU). Cette analyse confirme l'interaction forte entre les aléas DCE, RN, RU et mouvement de terrain. L'aléa mouvement de terrain impacte faiblement et uniquement l'aléa DCE. Les niveaux de l'aléa « mouvements de terrain » ont été ajustés en fonction des interactions définies.

Enfin, l'indice Multi-aléa (MH) a été calculé. Il prend en compte à la fois : les niveaux des aléas et les niveaux des interactions. Il varie entre 1, pour le cas où il existe uniquement un aléa « mouvements de terrain » de niveau faible et 5,62 pour le cas où les quatre aléas existent (MVT, DCE, RU et AXE). Cet indice pourrait être utilisé afin de hiérarchiser / prioriser les zones de la commune en termes de gestion des risques.

## 5 Cas d'application : commune de Cambrai

### 5.1 Description

L'arrondissement de Cambrai est situé en région Haut-de-France, dans le département du Nord (59). Il s'étend sur 50 km d'est en ouest et sur 30 km du Nord au Sud. Il comprend 116 communes (Figure 23).

Le Cambrésis est un territoire de plaine/plateau, au nord du Bassin parisien, à l'extrémité occidentale du massif des Ardennes. Le substratum est majoritairement crayeux et localement surmonté de dépôts cénozoïques de nature sableuse ou argileuse (Figure 24). Toute ces formations sont, le plus souvent, recouvertes de limons et de lœss. L'arrondissement ne dispose pas de ressources très importantes en eaux superficielles, cependant, elle est très riche en eaux souterraines emmagasinées dans des aquifères de formations litho stratigraphiques poreuses, fissurées ou fracturées.

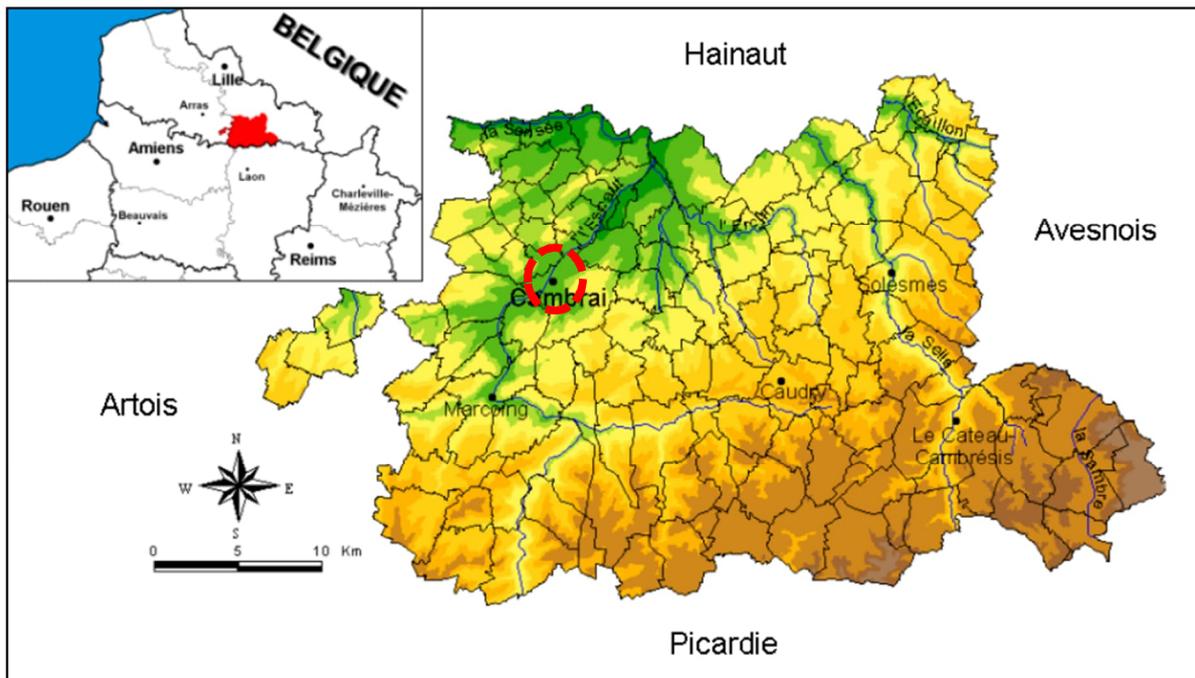


Figure 23 : Localisation de l'arrondissement de Cambrai (source : BRGM) et localisation de la zone de la commune de Cambrai (secteur d'étude, cercle rouge)

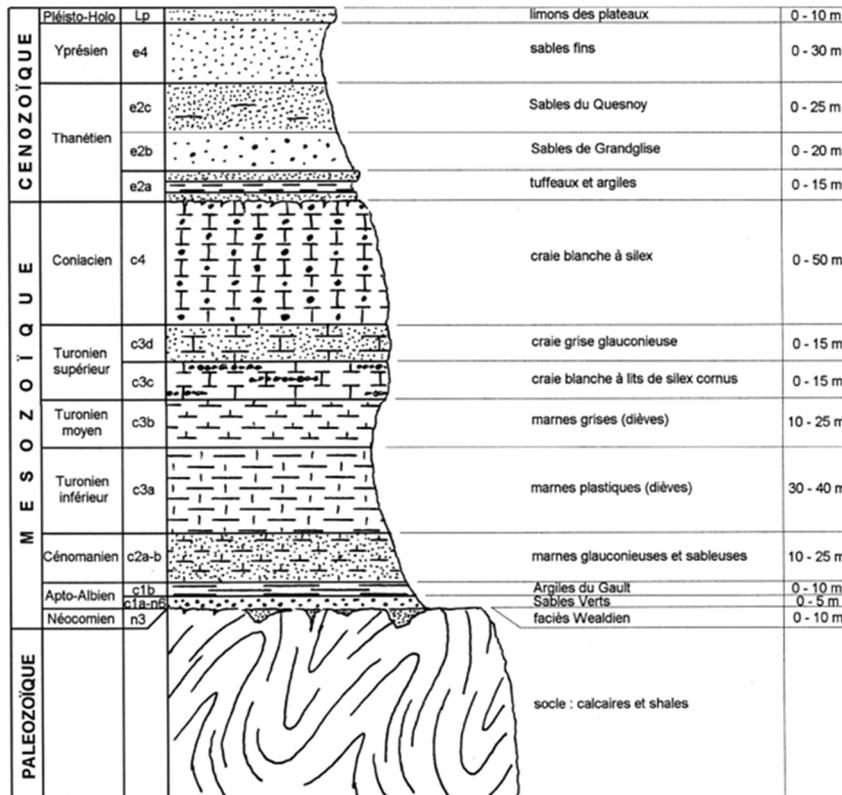
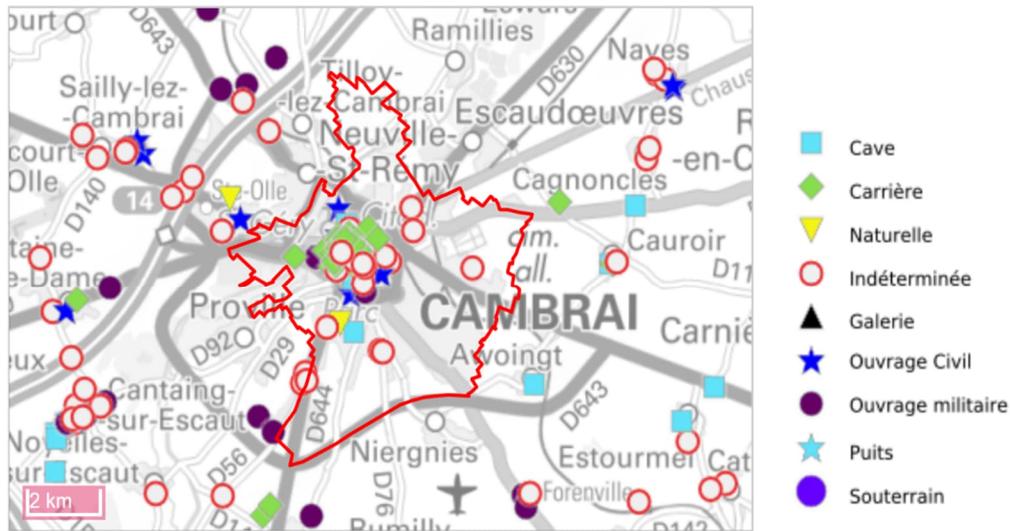


Figure 24 : Coupe géologique de terrain dans le Cambrésis, on note la présence d'un banc de craie blanche épaisse, ce banc comporte des carrières souterraines (Source : BRGM)

Notre analyse s'est focalisée sur la commune de Cambrai, plusieurs types de cavités souterraines ont été recensés dans le Cambrésis (Figure 25), on retrouve principalement :

- les puits à eau, les « boves »
- les ouvrages militaires ;
- les souterrains ;
- les ouvrages de génie civil ;
- les carrières souterraines, elles sont généralement de petites dimensions et ont été exploitées par la méthode de chambres et piliers. On trouve également des catiches. Le taux de défruitement varie entre 50 et 85 %. Dans le Cambrésis, certaines carrières d'extraction de pierre de construction ont été exploitées par une méthode mixte de chambres et piliers et de catiches. Leur profondeur varie entre 6 et 30 m en fonction de la nature du recouvrement et le niveau de la nappe phréatique. La hauteur des galeries varie entre 2 et 11 m et la largeur entre 2 et 5 m.

La Figure 25, présente un exemple des cavités recensées dans le périmètre proche de la commune de Cambrai.



Source : BRGM

Figure 25. Carte des cavités souterraines présentes sur la commune de Cambrai (Source : Géorisques)

## 5.2 Aléa « mouvements de terrain »

Il n'existe pas, de carte d'aléa « mouvements de terrain » liés à la présence de cavités souterraines sur cette zone d'étude. En 2004, le BRGM a réalisé une étude de cartographie préliminaire de l'aléa « mouvement de terrain liés à la présence de cavités souterraines, suite à de fortes pluviosités » sur l'arrondissement de Cambrai. Nous utiliserons ces informations pour effectuer l'analyse multi-aléa « mouvements de terrain-inondation » sur la commune de Cambrai uniquement.

Cette étude se base principalement sur le zonage de la présence potentielle de cavités souterraines (Figure 26) et plus largement de souterrains. L'évaluation de la susceptibilité de présence de cavités tient compte principalement de l'épaisseur de la couche de couverture de la craie ainsi que de l'épaisseur de la craie. Considérant la présence de cavités, ce territoire peut être concerné par plusieurs aléas mouvement de terrain.

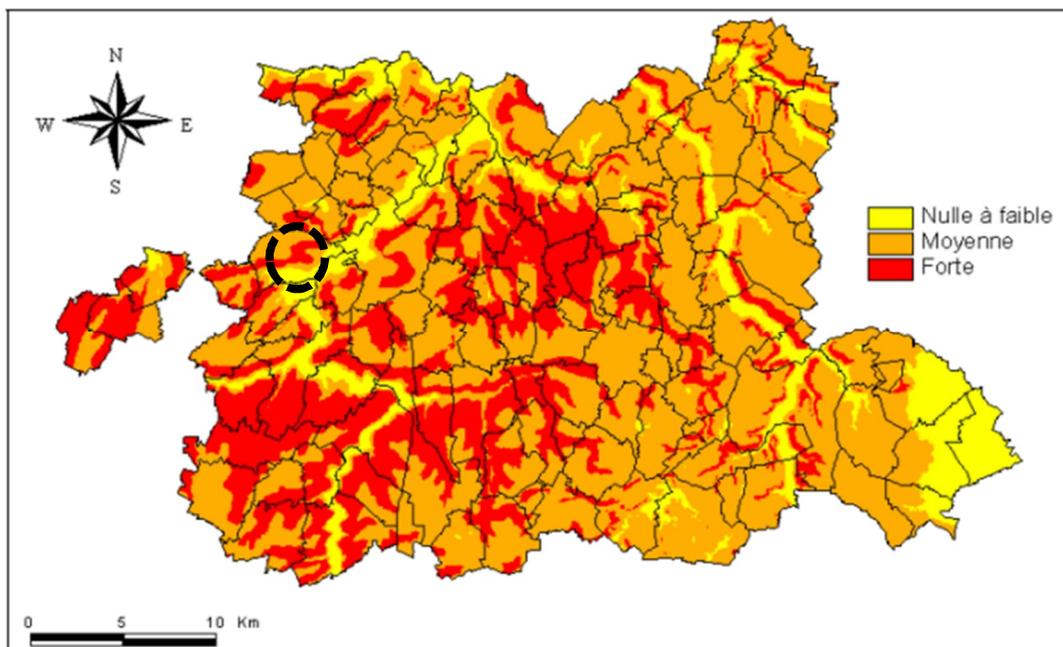


Figure 26 : Carte de susceptibilité de présence de carrières souterraines dans le Cambrésis (source : BRGMRP-52959-FR) et la localisation de la zone de l'étude (cercle noir)

La carte d'aléa « mouvements de terrain » liés à la présence de cavités souterraines (Figure 27), suite à de fortes pluviosités est obtenue par le croisement des facteurs de prédisposition, principalement la présence de cavités souterraines, et du potentiel d'infiltration des eaux de surface et inondation des cavités souterraines par la nappe, identifié dans cette étude du BRGM comme facteur de déclenchement.

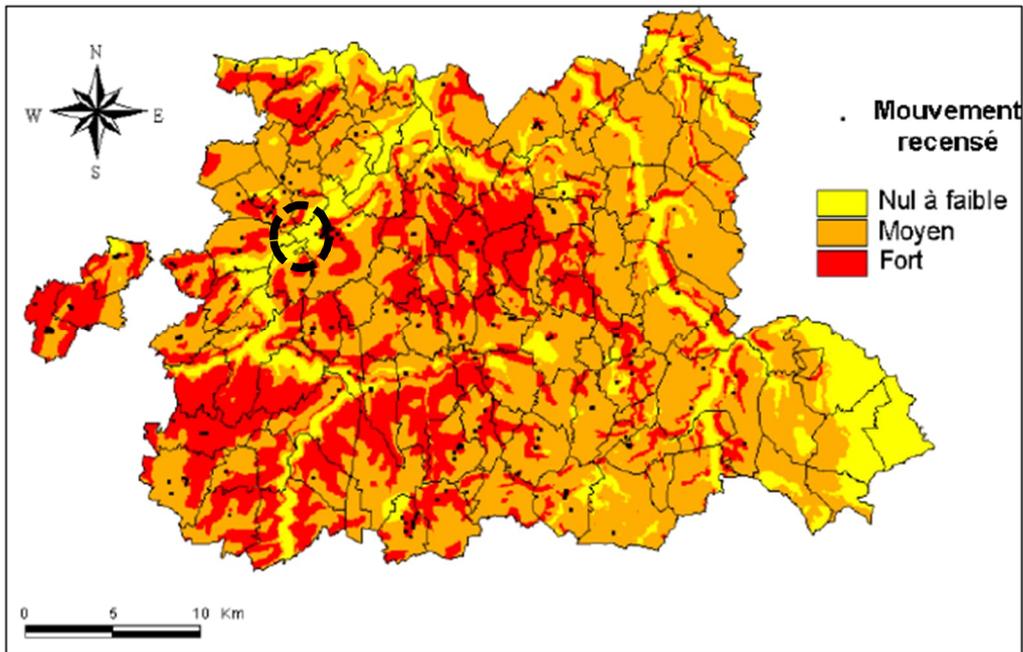


Figure 27 : Carte d'aléa « mouvements de terrain » liés à la présence de cavités souterraines, (source : BRGMRP-52959-FR) et la localisation de la zone de l'étude (cercle noir)

### 5.3 Aléa « inondation »

Il n'existe pas de PPR Inondation concernant l'arrondissement de Cambrai. Seul le PPRI de La Selle (rivière qui traverse du Nord au Sud la partie est de l'arrondissement de Cambrai) est disponible. L'aléa y est défini en tenant compte de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement.

L'étude réalisée par le BRGM en 2004, permet d'apporter des éléments complémentaires sur le risque d'inondation sur l'ensemble de l'arrondissement de Cambrai. Elle s'intéresse plus particulièrement aux phénomènes de remontée de nappe et d'infiltration.

Comme pour la présence de cavités, deux zonages ont été proposés (Figure 28) :

1. la susceptibilité d'inondation des cavités par remonté de nappe, évalué à partir de la profondeur du plancher des cavités et des variations des niveaux piézométriques ;
2. le potentiel d'infiltration, évalué à partir de l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) qui compare le réseau hydrographique réel au réseau calculé à partir de la morphologie du MNT. C'est une approche indirecte de la perméabilité qui considère que lorsque l'indice est faible (rouge, Figure 29), le terrain est infiltrant, et inversement, une valeur forte (>1) correspond à une zone à ruissellement majoritaire (vert, Figure 29). Il en résulte que l'infiltration est prédominante sur les plateaux de Cambrésis, comme le ruissellement dans les vallées.

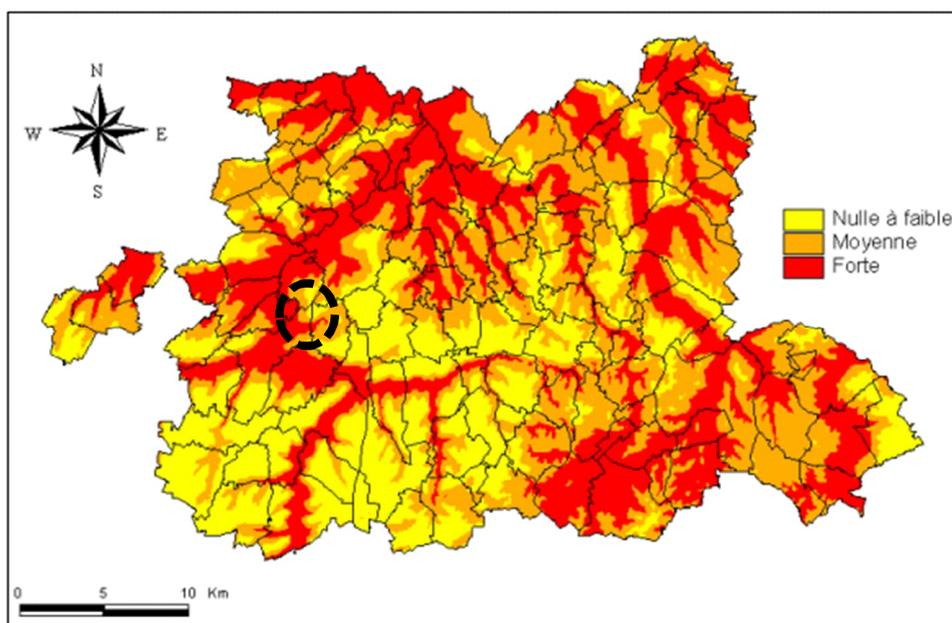


Figure 28 : Carte de susceptibilité d'inondation des cavités par la nappe (source : BRGMRP-52959-FR), localisation de la zone de l'étude (cercle noir)

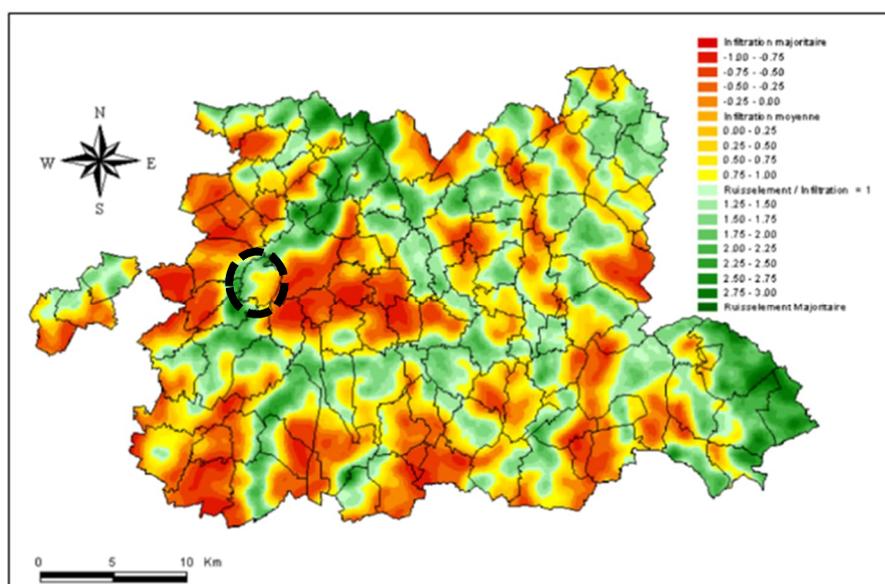


Figure 29 : Carte corrigée de l'IDPR (source : BRGMRP-52959-FR), localisation de la zone de l'étude (cercle noir)

Ainsi, l'inondation est caractérisée, sur l'arrondissement de Cambrai (et donc sur la commune de Cambrai, secteur d'étude), par des phénomènes de remontée de nappe et de ruissellement (ou d'infiltration).

#### 5.4 Cas connus d'interaction entre les deux aléas

Il existe sur la commune de Cambrai de nombreux cas illustrant l'existence d'interactions entre les aléas « inondation » et « mouvements de terrain » liés à la présence des cavités. Le Tableau 7 liste les différents mouvements de terrain répertoriés suite aux épisodes pluvieux de 2000-2001 qui ont entraînés la remontée exceptionnelle des nappes libres dans le Nord-Pas-de-Calais et plus généralement dans le nord et nord-ouest de la France.

Tableau 7 : Liste des mouvements de terrains qui ont affectés les cavités souterraines de Cambrai durant l'année 2001 (source : georisque.gouv.fr)

Cavité	Mouvement de terrain
Rue des anciens combattants d'AFN (cadastre AX n°698)	Effondrement datant du 29/03/2001 (évolution inconnue et fiabilité forte) avec x=665254 et y=1275839
Vieux chemin de Carnières (cadastre BE n°349)	Tassement des remblais suite à de fortes pluies Affaissement datant du 2.3/04/2001 (évolution inconnue et fiabilité forte) avec x=666366 et y=1275192
Rues des Ecoles (cadastre AS n°350)	Affaissement datant du 11/05/2001 (évolution inconnue et fiabilité forte) avec x=663835 et y=1275245
La Citadelle - anciennes fortifications - boulevard Vauban et avenue Jules Ferry	Affaissement en avril 2001 boulevard Vauban, face au n°53 (X : 664963 et Y : 2575621)
Rue Aubenche (cadastre AT n°160)	Affaissement datant du 17/04/2001 (évolution inconnue et fiabilité moyenne) avec x=664358 et y=1275180

## 5.5 Évaluation de l'interaction entre les deux aléas

Nous avons identifié sur la commune de Cambrai, un aléa « mouvements de terrain » (MVT) et un aléa « inondation ». L'inondation peut être liée soit à la remontée de nappe (RN) soit au ruissellement (RU) ou encore accidentellement (INO-acc) due à la rupture de canalisation ou des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Il n'y a pas de cours d'eau naturels à Cambrai. Néanmoins, on note la présence du canal de l'Escaut mais le risque de débordement ou de rupture de l'ouvrage est quasiment nul. Notons que trois niveaux (faible, moyen et fort) peuvent être identifiés pour les deux types d'aléa : « mouvements de terrain » et « inondation ».

### 5.5.1 Niveau principal - analyse globale

Pour le premier niveau d'analyse ou analyse globale, les interactions entre les aléas « mouvements de terrain » et « inondation » ont été étudiés. Les aléas « inondation » ont été scindés en deux pour dissocier d'une part l'inondation naturelle (INO-NAT) et d'autre part, l'inondation accidentelle (INO-ACC). La Figure 30 présente l'interaction entre les aléas, en tenant compte notamment des contextes géologiques et topographiques de la commune. L'interaction entre l'aléa « inondation » d'origine naturelle (remontée de la nappe) et l'aléa « mouvements de terrain » est évaluée comme forte. En effet, l'action de l'eau peut engendrer une fragilisation de la carrière (toit et piliers) et des terrains de recouvrement. On note une interaction faible pour les autres aléas (MVT et INO-ACC, MVT et INO-NAT). La Figure 30 présente également une proposition de la réévaluation du niveau de l'aléa « mouvements de terrain » (MVT) en fonction de l'aléa « inondation » (INO) (aléa ajusté). On note que dans le cas où les deux aléas sont faibles, l'aléa « mouvements de terrain » garde son niveau initial. Dans le cas où l'aléa « mouvements de terrain » est fort, ce niveau est maintenu quel que soit le niveau de l'aléa « inondation ». Pour les autres configurations, il est recommandé d'ajuster le niveau d'aléa pour tenir compte de l'interaction entre les deux aléas.

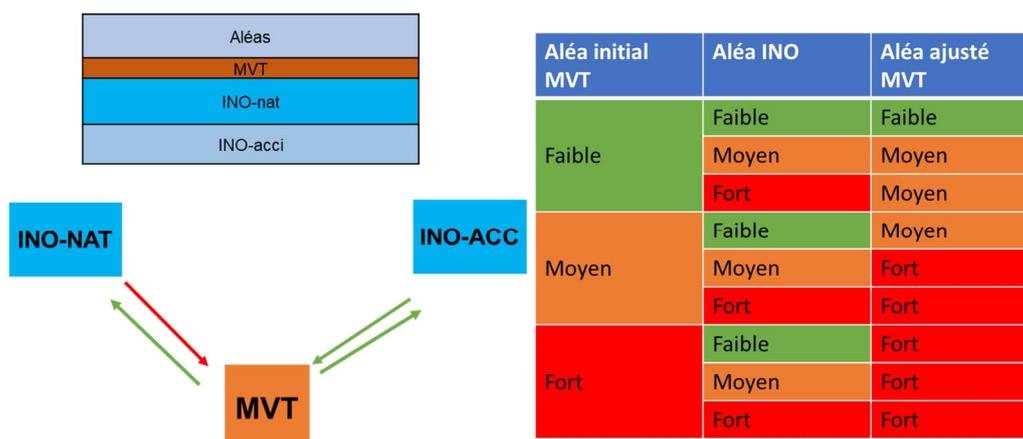


Figure 30 : Interaction entre les aléas mouvements de terrain (MVT) et inondation (INO), une flèche verte correspond à une interaction faible et une flèche rouge indique une interaction forte ; Ajustement de l'aléa mouvements de terrain (MVT)

## 5.5.2 Niveau opérationnel - analyse détaillée

Dans un second temps, une analyse plus spécifique a été réalisée sur les interactions possibles entre l'aléa « mouvements de terrain » et trois aléas « inondation » : débordement de cours d'eau (DCE), remontée de nappe (RN) et ruissellement (RU).

La Figure 31 présente les interactions entre ces aléas. On note que seul l'aléa (DCE) correspond à une double interaction : le (DCE) impacte le (MVT) et le (MVT) impacte à son tour le (DCE). Cette figure représente également l'ajustement de l'aléa (MVT) en fonction soit d'un aléa « inondation » soit de l'ensemble des aléas « inondation ». Dans ce cas, un aléa « inondation » doit être évalué pour proposer un aléa ajusté (MVT) en modifiant son niveau initial. Cette analyse est une suggestion, l'expert en charge de l'étude peut modifier le niveau de l'aléa ajusté en fonction des informations disponibles pour chaque zone ou configuration.

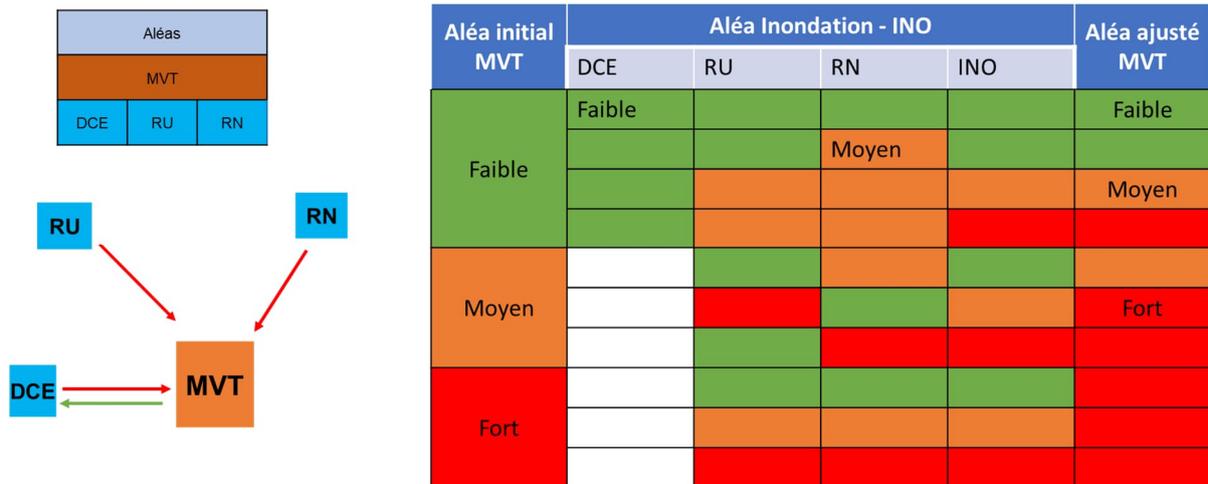


Figure 31 : Interaction entre les aléas mouvements de terrain (MVT) et les aléas inondation.

Une analyse des interactions a également été réalisée par la construction d'un arbre d'interaction permettant de prendre en compte les caractéristiques de la carrière (matériau, profondeur, matériau, recouvrement) et de préciser les conséquences de l'interaction (fragilisation du remblai et de la roche, diminution de la résistance). La Figure 32 illustre cette démarche et les questions qu'il est nécessaire de se poser pour établir les interactions et évaluer les conséquences en fonction des réponses données.

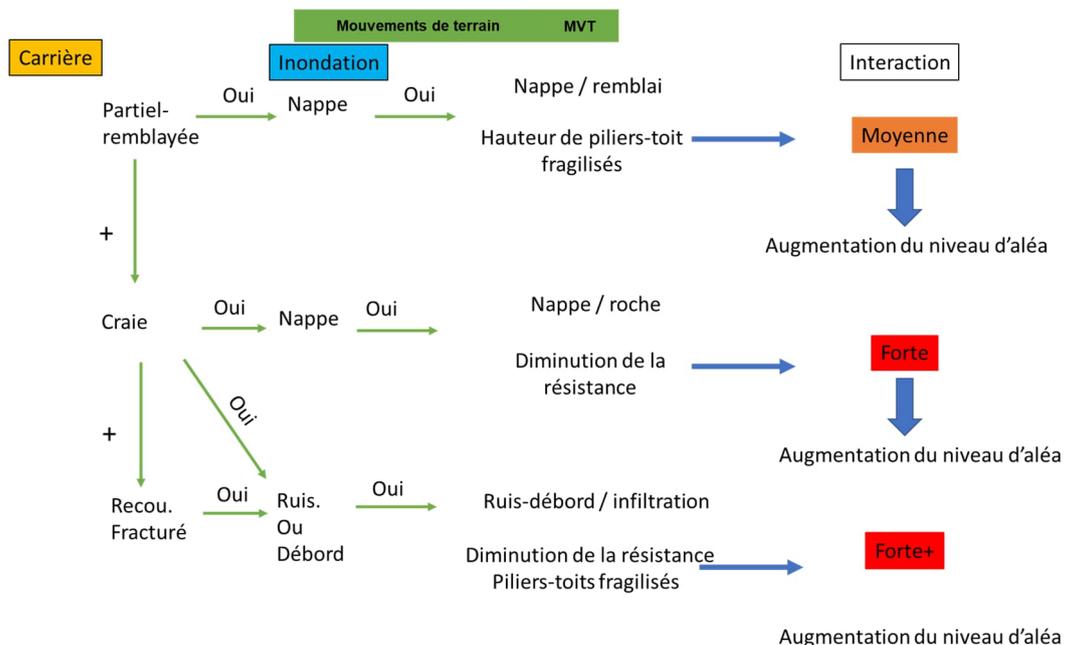


Figure 32 : Arbre d'interaction entre les deux aléas mouvements de terrain (MVT) et inondation (INO) pour les carrières souterraines de craie de l'arrondissement de Cambrai

### 5.5.3 Calcul de l'indice Multi-Aléa

Une analyse de l'indice Multi-Aléa (MH) a également été réalisée.

Les premiers calculs (Figure 33) concernent les interactions de niveau principal entre les aléas « mouvements de terrain » et « inondation » en considérant un niveau d'interaction fort entre les aléas pour le cas de Cambrai compte-tenu du retour d'expérience (à noter que pour le cas de Peypin le niveau d'interaction a été considéré faible et fort). On note que la valeur de MH augmente avec l'augmentation des niveaux d'aléas initiaux.

Aléas initiaux			Coefficient d'ajustement		Deux interactions fortes Niv. d'Interaction = Caj (1,2)	Calcul MH			
Aléa initial	MVT	INO	Interaction	Caj		Aléa	MVT	INO	MH
Faible	1	1	Faible	1		Faible	1	1	2,4
Moyen	1,2	1,2	Moyen	1,1		Faible	1,2	1,2	2,64
Fort	1,3	1,3	Fort	1,2		Faible	1,3	1,3	2,76
						Moyen	1,2	1	2,64
						Moyen	1,2	1,2	2,88
						Moyen	1,3	1,3	3
						Fort	1,3	1	2,76
						Fort	1,3	1,2	3
						Fort	1,3	1,3	3,12

Figure 33 : Indice MH pour l'interaction entre les aléas mouvements de terrain (MVT) et inondation (INO)

Les seconds calculs (Figure 34), concernent les interactions de niveau secondaire entre l'aléa « mouvements de terrain » et deux aléas « inondation » (ruissellement et remontée de la nappe). Au total 21 configurations ont été considérées. La valeur de MH varie de 4,6 à 5,62. La valeur la plus faible correspond à des aléas ayant tous un niveau faible (aléa =1) avec une interaction forte (1,2). La valeur la plus élevée correspond à des aléas ayant tous un niveau élevé (fort) excepté pour l'aléa « débordement de cours d'eau » (niveau faible). Nous avons indiqué les valeurs de MH en l'absence des aléas « inondation » et pour les trois niveaux faible, moyen et fort. La valeur de MH permet de montrer clairement l'importance de l'interaction entre les aléas.

On pourrait évidemment calculer d'autres configurations pour lesquelles seule une partie des quatre aléas existe. Pour ce site et dans ce cas, la valeur de MH serait toujours comprise entre 1 et 5,62.

Aléa initial MVT	Aléa Inondation - INO			MH
	DCE	RU	RN	
Faible				1
				4,6
				4,84
				4,96
				5,08
				5,2
				5,32
Moyen				1,2
				4,8
				5,04
				5,28
				5,16
				5,4
				5,52
Fort				1,3
				4,9
				5,14
				5,08
				5,5
				5,26
				5,62

Figure 34 : Calcul de la valeur de MH pour les aléas mouvements de terrain (MVT), l'aléa débordement de cours d'eau (DCE), l'aléa ruissellement (RU) et l'aléa remontée de nappe (RN)

## 5.6 Conclusion

L'arrondissement de Cambrai (59) présente plusieurs aléas naturels dont les aléas « inondation (INO) associés aux remontées de nappe, débordement de cours d'eau et ruissellement et « mouvements de terrain » (MVT) associés à la présence des cavités. Les interactions entre les deux aléas sont évidentes car les facteurs de prédispositions de deux aléas se croisent (craie, profondeur, nappe, cours d'eau, réseaux, etc.). De plus plusieurs événements historiques montrent que des mouvements de terrain ont été déclenchés après des périodes de fortes précipitations de remontée de nappe.

Pour établir ces interactions, la méthodologie proposée dans cette étude a été utilisée. Elle tient compte des informations disponibles sur les deux aléas.

On note que la valeur maximale de MH dans le cas de Peypin est moins importante à cause du niveau d'interaction de l'aléa mouvement de terrain sur l'inondation jugée plus élevée dans le cas de Cambrai.

La première analyse (globale) entre les deux aléas a montré que l'interaction est d'un niveau fort. L'arbre d'interaction a permis de préciser les conditions de cette interaction.

La deuxième analyse (détaillée), prend en compte trois aléas inondation au lieu d'un seul : « débordement de cours d'eau » (DCE), « remontée de nappe » (RN) et « ruissellement » (RU). Cette analyse confirme une interaction forte entre les aléas (DCE, RN, RU et MVT). L'aléa (MVT) impacte faiblement et uniquement l'aléa (DCE). Nous avons ajusté le niveau de l'aléa (MVT) en fonction de l'interaction.

Enfin, l'indice Multi-Aléa a été calculé. Il prend en compte à la fois : les niveaux des aléas et le niveau des interactions. Il varie entre 1, pour le cas où il existe uniquement un aléa (MVT) de niveau faible et 5,62 pour le cas où les quatre aléas existent (MVT, DCE, RN et RU). D'autres calculs peuvent être envisagés. Cet indice permettrait de hiérarchiser les zones de la commune en termes de gestion des risques.

## 6 Conclusion

L'Ineris a développé, entre 2018 et 2021, une approche générale d'identification et de caractérisation des interactions entre phénomènes naturels incluant des phénomènes gravitaires (effondrements de cavités, éboulements rocheux, glissements...). Cette étude basée sur des problématiques locales, identifiées par retour d'expérience des services déconcentrés de l'État, a permis notamment de définir des interactions physiques entre les phénomènes. Il ressort de cette analyse que les interactions les plus fréquemment rencontrées sont celles entre les phénomènes « d'inondation » (ruissellement, remontée de nappes, débordement de cours d'eau, submersions brutales...) et les mouvements de terrain liés aux cavités souterraines.

Aussi, l'Ineris a engagé en 2022-2023, une réflexion spécifique sur l'analyse multi-aléa « cavités-inondation ». Une méthodologie en 6 étapes a été développée comportant l'identification et l'évaluation des interactions potentielles, la définition des scénarios pouvant se développer et le calcul de l'indice Multi-Aléa (MH).

Cette interaction est caractérisée par :

- des aléas de type dépendant (ex. : effondrement – inondation) ;
- l'effet de l'eau se traduit par une fragilisation immédiate ou différée du site, de la cavité elle-même, de son recouvrement, et du terrain de surface ;
- une interaction double qui peut se faire dans les deux directions : (inondation – MVT) cavité ou (MVT cavité– inondation).

L'évaluation des interactions possibles entre les deux aléas doit-être complétée par des observations et des études spécifiques afin d'affirmer ou non leur existence.

La méthodologie a été ensuite appliquée à deux communes concernées par ces deux aléas : il s'agit de la commune de Peypin et celle de Cambrai. Ces deux communes présentent plusieurs aléas naturels dont les aléas inondation (INO) et mouvement de terrain (MVT) associés à la présence de cavités naturelles ou anthropiques. L'interaction entre les deux aléas dans ces deux communes est évidente car les facteurs de prédispositions de deux aléas se croisent (profondeur, nappe, cours d'eau, réseaux, etc.). De plus des événements historiques pour le cas de Cambrai, montrent que des mouvements de terrain ont été déclenchés après une période de fortes précipitations ou de remontée de nappe.

Deux niveaux d'analyse ont été réalisés : la première analyse (globale) entre les deux aléas a montré que l'interaction est de niveau fort. L'arbre d'interaction a permis de préciser les conditions de cette interaction. La deuxième analyse (détaillée), plus fine, prend en compte trois aléas inondation au lieu d'un seul. L'analyse détaillée confirme l'interaction forte entre les aléas (DCE, RN, RU et MVT). Nous avons ensuite ajusté le niveau de l'aléa (MVT) en fonction de l'interaction et calculé l'indice Multi-Aléa MH. Le calcul de cet indice permettrait de hiérarchiser les zones concernées par l'interaction entre les deux aléas dans une perspective de gestion du risque à l'échelle d'un territoire.

La méthodologie développée et son application répondent aux objectifs fixés, elles présentent une première étape dans la mise en évidence de la nécessité d'appliquer l'analyse multi-aléa afin d'optimiser la gestion du risque naturel. Cette approche globale et intégratrice, qui prend en compte plusieurs aléas, permet de représenter le plus fidèlement possible les situations dans lesquelles coexistent et interagissent les aléas sur un même territoire. Néanmoins, il est nécessaire de préciser que l'application d'une telle méthodologie nécessite généralement la mobilisation de moyens techniques et humains plus importants que l'analyse mono-aléa. En revanche elle présente sans aucun doute plusieurs avantages socio-économiques pour les collectivités en termes de gestion du risque.

## 7 Principales références bibliographiques

Cerema, 2018. Prise en compte du risque incendie de forêts dans l'urbanisme. Éléments pour la rédaction des Porter à Connaissance de l'État, Juillet 2018.

Commission European 2011, Commission Staff working paper Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management

CSTB, 2011. Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de type affaissement progressif. [https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide\\_affaissements\\_2011\\_11\\_17.pdf](https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_affaissements_2011_11_17.pdf).

DGPR, 2014 : Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation.

DGPR, Plan de prévention des risques naturels, les risques d'inondation (le ruissellement péri-urbain).

DGPR, Plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels.

DGPR, Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux

DGPR, Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) ; guide général et guide méthodologique Risques de mouvements de terrain – La Documentation française.

Gildas Noury G., Perrin J., Luu L-H, Philippe P., Gourdiér S., 2018. Rôle of flooding on sinkholes occurrence in covered karst terrains: case study of Orléans area (France) during the 2016 metrological event and perspectives for other kart environment. 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes. and the Engineering and Environmental Impacts of Karst,

Ineris, 2007. Etude d'aléas préliminaire concernant les anciennes concessions de lignite du Bassin de Provence, détenues par Charbonnages de France Communes de Belcodène, Bouc-Bel-Air, Cadolive, Fuveau, Gardanne, Gréasque, La Bouilladisse, La Destrousse, Meyreuil, Mimet, Peynier, Peypin, Rousset, Simiane-Collongue, Saint-Savourninet Trets. INERIS-DR S-07-79371-17209A.

Ineris, 2014. Faisabilité de l'extension l'Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) de BELCODENE (13) au droit d'anciennes carrières souterraines situées au lieu-dit « Jean-Louis ». **INERIS** DRS-14-149034-12462A.

Ineris, 2018. Evaluation des aléas miniers, Guide méthodologique Ineris 17-164640-01944A, 54p.

Ineris-Cerema, 2017 : 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.

Ineris-Cerema, 2017 : Guide, Aléa versant rocheux sous-cavé. Caractérisation et évaluation. Ineris 17-IFSTTAR, 2014 : Guide technique. Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. 164712-08773A.

Plan de Prévention des risques naturels prévisibles – mouvements de terrain, effondrement sur la commune de Peypin - approuvé en 2000.

LCPC, 2002 : Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines : guide technique – Collection environnement les risques naturels du LCPC – ISSN 1151-1516 – 2002.

CEPRI : le bâtiment face à l'inondation. Guide méthodologique. Les collectivités en Europe pour la prévention du risque d'inondation.

Kappes M.S. Keiler M., von Elverfeldt K. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Nat Hazards. 64:1925-1958. Doi 10.1007/s11069-012-0294-2.

Liu B., Yim Ling Siu Y. L., Mitchell G. (2016). Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 629–642, 2016 [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/629/2016/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/629/2016/) doi:10.5194/nhess-16-629-2016.

MEDAD, 2007. Le retrait-gonflement des argiles : Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? Collection Prévention des risques naturels majeurs.

MEDAD, 2013 - Guide méthodologique pour les PPRT (Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT), Ministère de l'Ecologie, du développement et de l'aménagement durables,

MEDAD, 1999, Guide méthodologique pour le PPRI. La documentation Française.

MEDDE, Guide méthodologique. Plan de prévention des risques naturels. Cavités souterraines abandonnées.

Touili N., 2018. Management of multiples risks in urban areas: An integrated multi-risks analysis model for a general resilience. 2018 ISTE Open Science – Published by ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr. 16 P.

UNDRR (2020). Hazard definition and classification review. Technical report. Sendai framework. 88 P.

UNISDR, 2016. Terminology for disaster risk reduction [TERMINOLOGY FOR DISASTER RISK REDUCTION, UNISDR. Available from: [HTTPS://WWW.UNISDR.ORG/WE/INFORM/TERMINOLOGY](https://www.unisdr.org/we/inform/terminology).

UNISDR, 2009 : Stratégie internationale de prévention des catastrophes des Nations Unies (UNISDR), Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe, 2009.

