



# **EVALUATION DE L’ALEA « MOUVEMENTS DE TERRAIN » EN WALLONIE ET EN FRANCE : COMPARAISON DES METHODES**

**Février 2023**

**DEWAIDE L.<sup>1</sup>, LEFEBVRE C.<sup>2</sup>, PINON C.<sup>3</sup>, POULARD F. <sup>3</sup>**

<sup>1</sup> : ISSeP (BE)

<sup>2</sup> : CEREMA (FR)

<sup>3</sup> : Ineris (FR)

Ce rapport a été rédigé dans le cadre du module 3, activité 3, du projet Interreg RISSC.

## **PREAMBULE**

Le présent document a été réalisé dans le cadre du projet INTERREG RISSC, soutenu financièrement par le Fonds Européen de Développement Régional, la Région Wallonne, et les opérateurs<sup>1</sup> du projet.

Ce rapport a pour but de synthétiser les observations et actions menées en lien avec le module de travail concerné.

La responsabilité des auteurs 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, les auteurs ne peuvent pas être tenus responsables en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par les auteurs dans le cadre du projet, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur éventuel. Par conséquent, la responsabilité des auteurs 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. Les auteurs dégagent également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet du projet.

---

<sup>1</sup> Les opérateurs du projet sont : l'ISSeP, l'UMONS, l'Ineris, le CEREMA, l'ACOM France et l'Université de Lille

## Table des matières

I.	Introduction.....	3
II.	L'évaluation des aléas : principes méthodologiques généraux utilisés sur les deux territoires.....	3
A.	Documents de référence .....	3
B.	Définition .....	5
C.	Hiérarchisation .....	5
1.	Les classes d'intensité .....	5
2.	Les classes de probabilité d'occurrence ou de prédisposition .....	6
3.	Les classes d'aléa.....	6
4.	Cartographie .....	7
III.	Les instabilités liées aux cavités naturelles et anthropiques .....	8
A.	Le tassement.....	8
B.	L'affaissement.....	8
C.	L'effondrement localisé.....	9
D.	L'effondrement généralisé .....	10
IV.	Méthodes de quantification de l'aléa mouvements de terrain .....	10
A.	Quantification de la prédisposition en fonction du phénomène.....	10
B.	Quantification de l'intensité en fonction du phénomène.....	12
1.	Les tassements .....	12
2.	Les affaissements .....	13
3.	Les effondrements localisés.....	13
4.	Les effondrements généralisés .....	14
V.	Application des méthodologies sur deux sites tests .....	15
A.	Application de la méthodologie wallonne sur le site de Seclin (59-France) .....	15
1.	Résumé des données analysées .....	15
2.	Evaluation de l'aléa et cartographie .....	17
B.	Application de la méthodologie française sur le site de Jemappes (Belgique).....	20
1.	Résumé des données analysées .....	21
2.	Traitement des données et démarche appliquée .....	21
3.	Evaluation de l'aléa et cartographie .....	22
4.	Principe de la cartographie d'aléa .....	23
VI.	Comparaison des démarches et conclusions .....	24
VII.	Références.....	26

# I. Introduction

Le présent rapport vise à établir une comparaison des méthodologies d'évaluation de l'aléa de type mouvements de terrain de part et d'autre de la frontière franco-belge. Un aléa, de manière générale, correspond à la qualification du niveau d'une menace (ici, les mouvements de terrain) sur un site sans prendre en compte les enjeux exposés à ladite menace. Le rapport se concentre sur l'aléa « mouvements de terrain » lié à la présence de cavités souterraines (carrières et karsts), directement lié à la thématique du projet RISSC. La première partie de ce rapport consiste en une introduction théorique qui présente les grands principes méthodologiques de l'évaluation des aléas. Les grandes étapes méthodologiques sont communes aux démarches françaises et wallonnes. Les documents de référence explicitant la méthode à appliquer sur le territoire français ont en effet servis de base au développement de la méthodologie wallonne. Par contre, les objets souterrains, les contextes et les ressources peuvent différer de part et d'autre de la frontière, impliquant des différences notables dans la manière d'aborder et de caractériser l'aléa. Dans un second temps, une application concrète de ces méthodes sera présentée : la méthode française appliquée à un site belge ; la méthode wallonne transposée à un site français. Cette application à deux sites transfrontaliers permettra d'illustrer les différences de traitement de la problématique d'évaluation des aléas sur les deux territoires.

## II. L'évaluation des aléas : principes méthodologiques généraux utilisés sur les deux territoires

### A. Documents de référence

**En France**, les méthodologies d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain sont établies comme outils nécessaires à la réalisation des Plans de Prévention de Risques (PPR) qui sont des documents à valeur réglementaire en matière de prévention des risques et qui doivent être pris en compte par les autorités compétentes dans les questions d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Les PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) concernent tout risque naturel, dont les mouvements de terrain en lien avec les cavités souterraines anthropiques (carrières) et naturelles (karsts).

L'établissement de ces plans sont basés sur des guides méthodologiques spécifiques au risque considéré ; et pour ce qui nous concerne ici, ce document de référence est le suivant :

- *Plan de Prévention des Risques Naturels. Guide méthodologique : cavités souterraines abandonnées.* (2012). Ouvrage réalisé par l'Ineris, sous l'égide du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT).

Ce guide expose la méthodologie générale d'évaluation de l'aléa et intègre son application au phénomène de mouvements de terrain et son éventuelle implication dans l'établissement des PPR. Ce document définit les types de mouvements de terrain, les mécanismes à leur origine et les critères à intégrer dans une expertise dédiée à l'évaluation de l'aléa. Ce guide est dédié à un public averti mais relativement large, développant peu les aspects techniques.

Il faut également mentionner l'existence de guides méthodologiques propres à l'évaluation des aléas liés aux objets miniers et servant de base à l'élaboration des PPRM (Plan de Prévention des Risques Miniers). Il s'agit de :

- En 2019 : *Guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers.* Guide réalisé par le Cerema et l'Ineris, sous l'égide de la DGPR (Ministère de la Transition écologique et solidaire).
- En 2018 : *Evaluation des aléas miniers.* Guide réalisé par l'Ineris, GEODERIS et les Pôles après-mine, sous l'égide de la DGPR (Ministère de la Transition écologique et solidaire).

**En Wallonie**, un seul outil méthodologique existe depuis 2018 pour l'ensemble des objets souterrains. Il s'agit du document « Elaboration de cartographies de zones d'aléas de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains connus de Wallonie. Rapport méthodologique. » établi par l'ISSeP et la DGO3 (SPW). La rédaction de ce document a été inspirée notamment par les documents de référence français préalables cités ci-dessus. Le document traite des mouvements de terrain liés à la fois aux cavités souterraines anthropiques et aux objets miniers. Outre la méthodologie globale d'évaluation de l'aléa et les mécanismes des phénomènes de mouvement de terrain, le document présente également les méthodes de calculs qu'il convient d'utiliser pour caractériser les effets potentiels des mouvements de terrain causés par les différents types d'objets souterrains existants en Wallonie. Le document présente donc des aspects très techniques de l'évaluation de l'aléa et vise un public d'experts.

## B. Définition

L'aléa se définit comme « 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 ». Plus précisément, la caractérisation d'un aléa consiste au croisement de l'intensité prévisible du phénomène et de sa probabilité d'occurrence.

La période de référence est, pour le phénomène « mouvement de terrain », de l'ordre du long terme (dans les cent ans). La dégradation dans le temps des objets doit donc être considérée.

L'intensité du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, impacts ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. L'intensité vise donc à caractériser la gravité du phénomène (notamment par leur grandeur) et ses conséquences potentielles sur les personnes et les biens.

La probabilité d'occurrence traduit la prédisposition d'un site à être affecté par le phénomène étudié. Cette prédisposition dépend fortement de facteurs propres au site d'étude et à l'objet souterrain en question.

## C. Hiérarchisation

L'aléa étant défini comme le résultat du croisement entre l'intensité et la probabilité d'occurrence d'un phénomène, c'est sur la caractérisation de ces deux facteurs que repose l'évaluation de l'aléa. Afin d'établir une évaluation de l'aléa utilisable dans le cadre d'une gestion efficace des risques, il est opportun de définir des « classes » d'aléa permettant une hiérarchisation simplifiée. Dès lors, pour se faire, il convient de définir au préalable des classes pour l'intensité et la probabilité d'occurrence.

### 1. Les classes d'intensité

La quantification de l'intensité repose sur la définition des grandeurs physiques caractérisant le phénomène mais aussi sur leur gravité en terme de conséquences sur les enjeux en surface (les personnes et les biens).

Classiquement, cinq classes sont définies pour qualifier l'intensité d'un mouvement de terrain : très limitée, limitée, modérée, élevée et très élevée. En pratique, les deux classes

extrêmes sont peu utilisées (« très limitée » peut être utilisé pour les mouvements de très faible ampleur comme des petits affaissements ; « très élevé » est réservé à des effondrements généralisés importants). Les bornes de ces différentes classes dépendent du type d'objet et du phénomène considéré (voir chapitre III).

## 2. Les classes de probabilité d'occurrence ou de prédisposition

La difficulté de prévision des mouvements de terrain, notamment en raison de leur caractère non-périodique, rend difficile l'estimation d'une probabilité d'occurrence. Dans le cadre de l'évaluation de l'aléa propre aux mouvements de terrain, cette probabilité est remplacée par la notion de « prédisposition » du site par rapport à une rupture. La prédisposition se définit sur la base de critères relatifs à l'environnement du site étudié et de certaines caractéristiques géotechniques de l'objet considéré. L'existence d'événements passés est un facteur déterminant pour caractériser la prédisposition d'un site. Quatre classes de prédisposition sont généralement définies : très peu sensible (très rare), peu sensible, sensible, très sensible. Les seuils dépendent du type d'objet et du phénomène considéré.

Enfin, la qualité et la précision de l'information peut influencer la qualification de la prédisposition. C'est la notion de « présomption de présence » qui intègre l'incertitude liée à la non-exhaustivité de l'information.

## 3. Les classes d'aléa

En utilisant une matrice de croisement des classes d'intensité et de probabilité d'occurrence, la classe d'aléa peut être définie pour chaque objet étudié (Figure 1). Quatre classes d'aléa sont souvent définies : faible, moyen, fort, très fort. Ces classes sont associées à des couleurs dans l'idée de valoriser cette notion de manière cartographique.

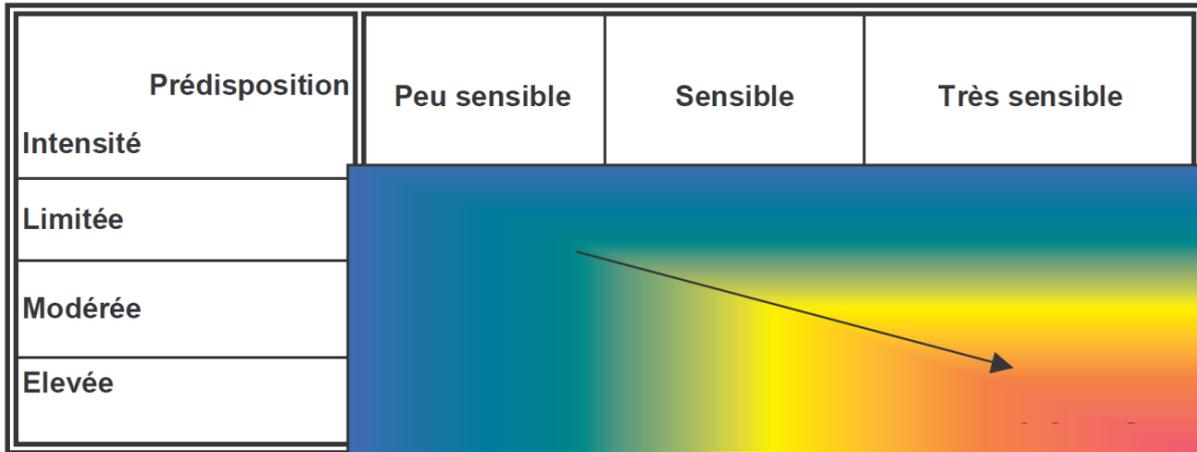


Figure 1. Illustration du principe de croisement de l'intensité et de la prédisposition pour définir l'aléa (Kheffi et Pacyna, 2018, d'après Ineris, 2006)

## 4. Cartographie

L'aléa est une notion spatialisée et donc cartographiable. Il s'agit de définir l'extension en surface des objets ou groupes d'objets souterrains considérés, des effets redoutés et de l'incertitude quant à l'extension de ces effets.

L'incertitude est une notion importante de la démarche. D'une part, il y a potentiellement une incertitude sur la position de l'objet qui dépend fortement de la qualité des données disponibles. Même lorsque des plans de localisation sont disponibles, leur calage sur le fond de carte choisi peut être incertain ; d'autant plus si ces plans sont anciens, incomplets... En conséquence de cette incertitude de localisation des vides souterrains, une marge dite « **marge d'incertitude** » doit être prévue dans le contour du zonage (avec une extension dépendante de l'évaluation de l'incertitude). D'autre part, une extension de l'emprise est également inhérente à l'extension latérale des désordres en surface : les effets ne se limitent pas forcément au terrain situé à l'aplomb de l'objet. Il convient donc de prévoir une marge dite « **marge d'influence** » qui étend le zonage de l'aléa.

Par ailleurs, sur un même site, la coexistence de plusieurs phénomènes potentiels est possible. Dans ce cas, plusieurs stratégies de cartographie sont applicables :

- établissement d'une carte d'aléa par type de phénomène. Ce principe est mis en avant dans le guide méthodologique wallon et proposé également en France ;
- une carte synthétisant le niveau d'aléa pour tous les phénomènes confondus, en considérant que l'aléa le plus fort supplante le plus faible. C'est l'approche valorisée sur certains sites en France.

## III. Les instabilités liées aux cavités naturelles et anthropiques

Les mouvements de terrain liés aux cavités non minières envisagés par les méthodologies française et wallonne diffèrent légèrement. En France, trois instabilités sont définies : l'affaissement, l'effondrement localisé, l'effondrement généralisé. En Wallonie, un mouvement supplémentaire est décrit, il s'agit du phénomène de tassement.

### A. Le tassement

Il s'agit d'un mouvement de sol de très faible ampleur (pluri-centimétrique à décimétrique) et d'extension variable. Ce phénomène est lié essentiellement à la compaction des matériaux (des remblais de puits pour ce qui concerne les terrains sous-cavés). Ce mouvement de faible amplitude peut avoir des conséquences sur des infrastructures si la déformation est différentielle.

La méthodologie wallonne intègre ce phénomène dans l'évaluation de l'aléa de mouvement de terrain, sans préciser le contexte d'occurrence. La France considère ce phénomène comme typique des contextes miniers, et, de ce fait, ne le prend pas en compte pour l'aléa lié aux cavités hors mines.

### B. L'affaissement

Décrit dans les deux méthodologies, l'affaissement est un phénomène qui engendre la formation de cuvettes visibles dans les terrains en surface.

Ce type de déformation est directement liée à la présence d'un vide souterrain à la suite d'une exploitation, du foudroyage de ce vide et du réarrangement consécutif des terrains sus-jacents. Il est typique au droit des exploitations minières mais peut également apparaître à l'aplomb de certaines cavités souterraines dont les vides, plus proches de la surface, ont été partiellement ou mal remblayés. Ces désordres se développent de manière progressive et non cassante. Ils ne se limitent généralement pas à l'emprise en surface du vide souterrain ; ils se développent souvent au-delà en fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains de recouvrement.

Ce sont les déformations horizontales du sol et les effets de mise en pente en périphérie de la déformation (liés à la formation d'une cuvette) qui engendrent le plus de dommages pour les biens situés en surface.

## C. L'effondrement localisé

Ce phénomène est défini par l'apparition soudaine d'un cratère d'effondrement. L'apparition du cratère est très soudaine et résulte d'un mécanisme de rupture qui se répercute de manière brutale sur les matériaux encaissants. Les parois du cratère d'effondrement initial sont généralement raides et son extension latérale se manifeste strictement à l'aplomb du vide sous-jacent. Néanmoins, les parois du cratère initial peuvent s'écrouler dans un deuxième temps et donner lieu à un cratère secondaire qui élargit la déformation. L'effondrement localisé se caractérise par une extension limitée à quelques dizaines de mètres au maximum, et une profondeur variable (dépendant essentiellement du volume de vide initial).

Les conséquences de ce phénomène sur les infrastructures peuvent être très importantes, surtout au vu de sa cinétique.

Plusieurs origines peuvent être distinguées :

- la rupture d'un ouvrage en tête de puits, ou du revêtement d'un puits accompagné de l'effondrement éventuel des terrains environnants. Ce dernier phénomène peut se produire suite au débouillage du puits (déversement des remblais dans des volumes de vides annexes au puits) ;
- la rupture du toit d'une cavité qui donne lieu à une remontée de fontis. Dans ce cas, si l'espace disponible est suffisant, le fontis créé en souterrain va remonter progressivement jusqu'à la surface où un cratère d'effondrement à paroi verticale ou inclinée peut se former brusquement (Figure 2) ;
- la rupture d'un pilier isolé (dans le cas des exploitations du type chambres et piliers). C'est un événement brutal qui peut atteindre des dimensions importantes au regard du vide existant à l'aplomb du pilier effondré.

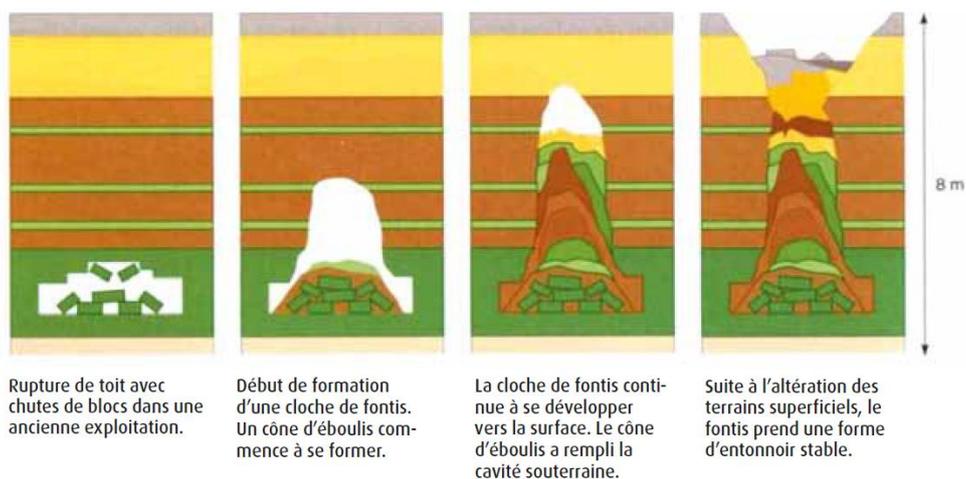


Figure 2. Schéma de développement d'une cloche de fontis (Ineris, 2012)

## D. L'effondrement généralisé

Ce phénomène, relativement rare, se caractérise par l'apparition d'un cratère de très large dimension (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres de diamètre). Les parois du cratère présentent généralement une rupture de pente nette et verticale avec une configuration « en escalier » liée au régime de cisaillement de la rupture. Comme pour l'effondrement localisé, les terrains adjacents à l'effondrement peuvent être sujets à des glissements et effondrements secondaires et élargir significativement le cratère initial.

C'est un phénomène typique des anciennes exploitations par chambres et piliers présentant des piliers sous-dimensionnés. Il est souvent lié à la ruine simultanée de plusieurs piliers mal conçus et/ou fragilisés par le passé.

Un tel phénomène est potentiellement très dommageable pour les biens en surface et les personnes.

# IV. Méthodes de quantification de l'aléa mouvements de terrain

Comme expliqué dans la méthodologie générale, la quantification de l'aléa repose sur la caractérisation de l'intensité d'une part, et de la prédisposition d'autre part. Ces deux facteurs peuvent être quantifiés selon des critères qui varient selon le type de phénomène. La manière de réaliser cette caractérisation diffère entre le versant français et le versant wallon.

## A. Quantification de la prédisposition en fonction du phénomène

En **France**, on distingue la prédisposition d'un site à subir un mouvement de terrain et la présomption de présence d'un objet souterrain. Le croisement des deux notions définit la probabilité d'occurrence, qui, croisée à l'intensité permet in fine de définir le niveau d'aléa (Figure 3). La présomption de présence est directement prise en compte pour pondérer l'aléa. Il y a peu de détail dans les guides méthodologiques sur la manière de définir concrètement la prédisposition ; la tâche est donc laissée à l'expert en charge de l'étude.

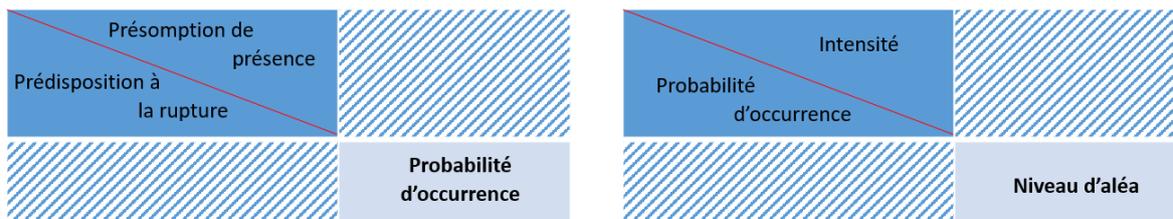


Figure 3. La probabilité d'occurrence au croisement de la présomption de présence de vides et de la prédisposition à la rupture ; et comme facteur de croisement pour la définition de l'aléa (D'après Ineris, 2012)

En **Wallonie** par contre, la présence de vide est intégrée à la notion de prédisposition. Elle est considérée comme un facteur influençant la prédisposition. Pratiquement, la prédisposition est associée à une valeur chiffrée qui est la somme de la pondération par différents facteurs. Des seuils de prédisposition (peu sensible, sensible et très sensible) sont définis sur base de ces valeurs (Figure 4).

Critères		Contribution à la prédisposition		
		Minorant	Neutre	Majorant
		$P - 1$	$P + 0$	$P + 1$
Objet	Présence du vide	Présumée	Possible	Avérée
	Largeur de la cavité	$L < 3 \text{ m}$	$3 \text{ m} < L < 5 \text{ m}$	$L > 5 \text{ m}$
	Fracturation du toit	Faible	Moyenne	Importante
	Traitement du vide	Soutènement par maçonnerie, béton ou claveaux ; Remblayage	Soutènement par cadre, boulonnage ou naturel	Absence
Contexte	Eau dans l'objet souterrain	Absence	Présence permanente	Présence + cycle de montée / rabattement de nappe
	Nature du recouvrement	Résistant	Moyen	Peu résistant
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	Non		Oui
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	Faible	Moyen	Importante

Figure 4. Proposition d'une grille d'évaluation de la prédisposition de développement d'un fontis au départ d'un vide souterrain et de sa remontée en surface (Kheffi et Pacyna, 2018).

Des deux côtés de la frontière, des facteurs divers, laissés à l'appréciation des experts et dépendant du phénomène, sont à évaluer. Le présent document ne fera pas le détail de ces différents facteurs qui sont bien décrits dans les guides méthodologiques. L'évaluation

de ces facteurs par l'expert dépend très fortement de la connaissance du site et de l'exploitation étudiée. Dès lors, une phase essentielle du travail est la collecte des données. L'importance de cette étape de travail est clairement prise en compte dans les méthodologies des deux côtés de la frontière.

Cette phase primordiale est indispensable à l'évaluation de la prédisposition et de l'aléa. Elle vise en premier lieu à rassembler des informations disponibles quant à la présence de cavités et d'éventuels événements de mouvements de terrain antérieurs. La consultation de bases de données, de rapports d'événements, de plans historiques, ou tout autre document d'information est nécessaire lors de cette phase de collecte. Il est également important de juger de la complétude de ces données afin de préciser l'incertitude sur la présence et l'extension des cavités potentielles.

Il s'agit également de préciser le contexte géologique et les caractéristiques géotechniques du site d'étude et de caractériser les objets souterrains.

L'étude préalable sera particulièrement attentive à définir le contexte géologique : types de terrain impliqués dans l'exploitation, nature des formations superficielles, épaisseur et inclinaison des couches, piézométrie... Les conditions d'altération et de fracturation des différentes couches géologiques est également un élément important.

Enfin, les conditions et modes d'exploitation sont des données essentielles. Il s'agit notamment de déterminer l'importance des vides souterrains, les éventuels modes de remblayage, la structuration des vides (chambres ou galeries), etc.

## **B. Quantification de l'intensité en fonction du phénomène**

Sur les deux versants, l'intensité d'un phénomène est définie selon l'effet en surface. Cet effet est évalué par une expertise basée sur des critères techniques variables selon l'objet considéré et dépendant du contexte. Le présent document ne détaille pas ces critères techniques.

Les classes d'intensité d'un phénomène redouté ont des bornes définies en fonction du phénomène considéré. Ces bornes diffèrent légèrement en Wallonie et en France.

### **1. Les tassements**

Ils ne sont définis qu'en Wallonie. Etant donné la faible ampleur du mouvement de terrain résultant, seules les classes d'intensité « très limitée » et « limitée » sont considérées (Figure 5).

Description	Classe d'intensité d'effet	Étendue	Enjeux impactés et type de dégâts	Gestion
Tassements limités (centimétriques)	Très Limitée	Partie de parcelle	Terrains : dégâts quasiment inexistantes Bâtiments : très limités (petites fissures)	Propriétaire seul
Tassements sensibles (décimétriques)	Limitée	Partie de parcelle ou parcelle entière	Terrains : très limités Bâtiments : limités (fissures)	Propriétaire seul + Experts consultés + éventuelle déclaration aux Autorités locales

Figure 5. Classes d'intensité définies pour le tassement (Kheffi et Pacyna, 2018).

## 2. Les affaissements

Dans le cas d'un affaissement, les infrastructures en surface sont essentiellement impactées par la mise en pente des terrains provoquée par l'affaissement. C'est donc ce critère de mise en pente qui est retenu pour la classification des intensités (Figure 6). Le tableau de référence utilisé est le même en France qu'en Wallonie :

Classe d'intensité	Mise en pente des terrains (en %)
Très limitée	$P < 1$
Limitée	$1 < P < 3$
Modérée	$3 < P < 6$
Élevée	$P > 6$

Figure 6. Intensité d'un affaissement en fonction de la mise en pente (P) des terrains (Ineris, 2012).

## 3. Les effondrements localisés

De par leur nature, ils peuvent porter atteinte aux biens et aux personnes. La grandeur représentative qui influencera au plus les effets en surface est le diamètre du cratère d'effondrement. Si ce critère est identique de part et d'autre de la frontière, les bornes des classes d'intensité sont légèrement différentes. Ainsi, l'intensité sera considérée comme

modérée pour un diamètre d'effondrement entre 3<sup>2</sup> et 10 m en France (Figure 7), alors que ce diamètre correspond à une intensité élevée en Wallonie (Figure 8).

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

Figure 7. Tableau de référence français pour définir l'Intensité d'un effondrement en fonction du diamètre du cratère (Ineris, 2012)

Diamètre cratère (m)		Classe d'intensité	Étendue	Enjeux impactés et type de dégâts	Gestion
Min	Max				
-	1,5	Limitée	Réduite	Terrains : très limités (petits trous) Bâtiments : très limités (petites fissures)	Propriétaire seul
1,5	3	Modérée	Partie de parcelle	Bâtiments : structurels	Experts consultés + déclaration aux Autorités locales
3	10	Elevée	Parcelle entière, voire plusieurs	Bâtiments : importants	Gestion par Autorités locales + Experts
10	-	Très élevée	Plusieurs parcelles, quartier	Bâtiments : très importants (Ruine)	Gestion par Autorités régionales + Experts

Figure 8. Tableau de référence wallon pour définir l'Intensité d'un effondrement en fonction du diamètre du cratère (Kheffi et Pacyna, 2018).

## 4. Les effondrements généralisés

Ces événements se caractérisent par une extension en surface de grande ampleur. Dès lors, l'intensité de ces événements est forcément très élevée avec des conséquences importantes et immédiates sur le bâti et potentiellement les personnes. Cette approche est identique sur les deux territoires.

<sup>2</sup> En France, la valeur seuil entre une intensité de niveaux limité et modéré pourrait évoluer d'un diamètre de 3 m à 5 m pour homogénéiser les approches « minier » et « naturel-cavité ».

## V. Application des méthodologies sur deux sites tests

Les précédents chapitres ont présenté les bases théoriques de l'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines sur les territoires de Wallonie et des Hauts-de-France. Ces méthodologies sont très semblables pour les deux régions avec quelques différences théoriques mineures. Par contre, comme il sera illustré au travers de ce chapitre, la mise en application des méthodes d'évaluation de l'aléa diffère de manière notable de part et d'autre de la frontière.

La démarche résumée dans le présent chapitre consiste en l'application de la méthodologie wallonne sur un site français d'une part, et de la méthodologie française sur un site wallon d'autre part. Les sites choisis sont Seclin (Nord) pour le versant français et Jemappes (Hainaut) pour le versant wallon.

Le but du chapitre suivant est donc de présenter les démarches méthodologiques appliquées pratiquement. Les cartes d'évaluation des aléas issues de ces démarches ne peuvent cependant être diffusées. En effet, il s'agit de documents de travail basés uniquement sur des archives. Depuis l'élaboration des données d'archive, la connaissance des services gestionnaires a pu évoluer. Dès lors, les documents de travail du présent exercice ne sauraient constituer une analyse suffisamment adéquate de la situation actuelle. C'est pourquoi les partenaires du projet RISSC ont décidé de ne pas le publier pour éviter toute confusion.

### A. Application de la méthodologie wallonne sur le site de Seclin (59-France)

Seclin est une commune urbaine de la région lilloise, d'environ 12.000 habitants. Elle a été le siège d'exploitations souterraines de craie au 19<sup>ème</sup> siècle essentiellement.

#### 1. Résumé des données analysées

L'étude d'aléa menée sur ce site a été établie sur base des documents (plans d'exploitations, rapports d'effondrement, cartographie, PER...) transmis par les partenaires

français du projet RISSC. Il s'agit essentiellement des données de l'ancien SDICS (service départemental des carrières souterraines) non mises à jour.

Les cavités présentes sur la zone étudiée correspondent essentiellement à des anciennes exploitations de craie sous forme de puits-bouteille (ou « catiches ») isolées ou connectées en champ d'exploitation. Les plans disponibles sont des documents anciens contenant peu d'information quant à leur localisation précise. Une série de puits ont néanmoins été reportés sur plan par le SDICS (Service de l'Inspection des Carrières Souterraines du Nord). Les caractéristiques des ouvrages souterrains sont peu ou pas renseignées et aucune information quant à l'état de leur fermeture ou de leur remblayage n'est mise à disposition.

Les désordres rapportés sur la zone de travail correspondent uniquement à des tassements et des effondrements localisés, presque toujours mis en lien avec la présence d'exploitations souterraines.

Enfin, un PER (Plan d'Exposition aux Risques) valant PPR (Plan de Prévention des risques) est disponible sur la commune.

Traitement des données et démarche appliquée

Il a été choisi de contraindre l'évaluation de l'aléa aux zones où des exploitations sont renseignées (archives, SDICS) et/ou où des événements de type mouvements de terrain ont été rapportés. Etant donné le manque d'information quant à la localisation précise des exploitations, une démarche parcellaire a été adoptée, considérant que la possibilité de présence de catiches s'étend à l'ensemble de la parcelle concernée (parcellaire actuel).

Les aléas de type mouvements de terrain retenus sont le tassement (pour les catiches remblayées) et l'effondrement localisé (catiches vides). Il a été choisi de ne pas considérer l'effondrement généralisé étant donné l'absence de ce type de désordre par le passé et la faible probabilité d'apparition de ce phénomène. Pour chaque site (parcelle) considéré, les aléas de type tassement et effondrement localisé seront analysés en parallèle, car l'information sur le remblaiement des cavités n'est pas disponible.

La méthodologie wallonne basant l'évaluation des aléas sur les dimensions de l'objet souterrain notamment, et puisqu'il n'existe pas de donnée précise quant aux dimensions de chaque catiche individuelle, les calculs ont été basés sur des dimensions standards évaluées grâce aux documents historiques disponibles (Figure 9) :

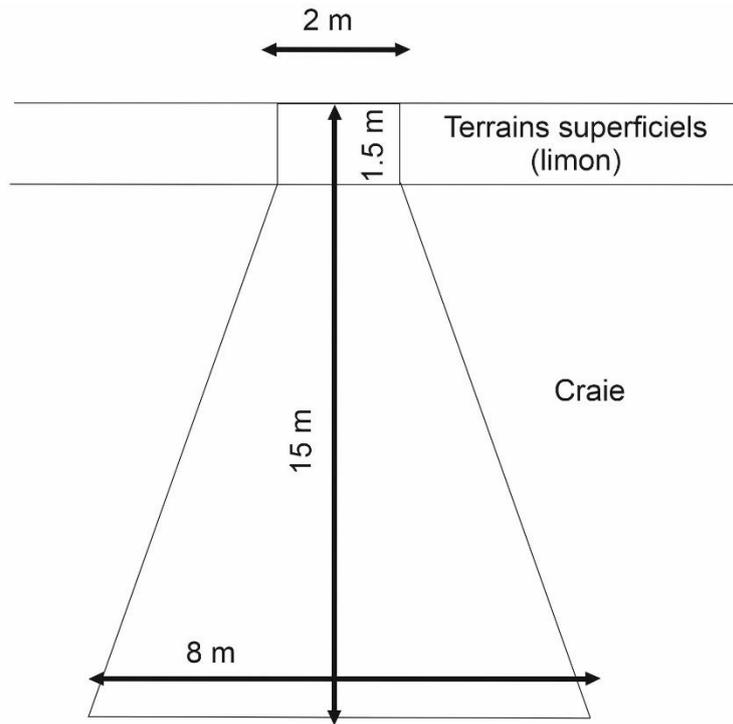


Figure 9. Standardisation des dimensions des catiches à Seclin, selon les documents historiques.

## 2. Evaluation de l'aléa et cartographie

### a. Tassement

En terme d'intensité, tous les tassements potentiels ont été considérés comme « limités », et ce sur base des observations faites sur les événements passés.

La prédisposition a été basée sur le tableau ci-après (Figure 10) :

PREDISPOSITION TASSEMENT	-1	0	+1
Anciens tassements	non	peut-être	oui
Présence de catiches remblayées	non	peut-être	oui
Type de remblayage	bon matériau et compactage		déchets divers, pas de compactage
eau dans terrains superficiels	Faible	Moyen/ponctuelle	Importante

Figure 10. Facteurs définissant la prédisposition au tassement dans le cas des catiches à Seclin.

Ces critères ont été évalués pour chaque site considéré et aboutissent à une prédisposition peu sensible (total critère < 0), sensible (total critères entre 0 et 2) ou très sensible (total critère > 2).

L'aléa de tassement, qui correspond au croisement de l'intensité et de la prédisposition, a été défini selon le tableau issu du guide méthodologique wallon (Figure 11). Pour chaque site retenu, un niveau d'aléa a été identifié selon cette grille.

Description	Classe d'intensité d'effet	Prédisposition		
		Peu sensible	sensible	Très sensible
Tassements limités	Très Limitée	Très très faible	Très Faible	Faible
Tassements sensibles	Limitée	Très Faible	Faible	Moyen

Figure 11. Définition de l'aléa de tassement.

## b. Effondrement localisé

L'intensité a été évaluée, pour chaque site abritant potentiellement des catiches vides, sur base de calculs des cratères d'effondrement primaire et secondaire.

Il a été considéré que le cratère secondaire pouvait, dans le contexte de travail présent, atteindre ses dimensions maximales basées sur le calcul :  $R_{\text{cratère2}} = r_{\text{puits}} + z_{fm} \div \tan \beta_2$ . A noter que l'angle  $\beta_2$  (angle de talus naturel) est fixé, dans la méthode wallonne, à 30° pour ce type de terrain de couverture (limoneux). L'application de ce calcul à un objet standardisé (voir ci-dessus) donne une dimension de cratère maximale de 7,2 m de diamètre. Selon la méthodologie wallonne, cette dimension rentre dans la classe d'intensité « élevée ».

La démarche sécuritaire adoptée dans la méthode wallonne considèrera que tous les sites abritant de potentielles catiches vides seront donc attachés à un niveau d'aléa d'intensité élevée.

L'évaluation de la prédisposition d'un site à voir se développer un effondrement localisé, est, comme pour le tassement, basée sur des critères pondérés. Les critères considérés

sont ceux proposés, dans le guide méthodologique wallon, pour l’objet « puits » (Figure 12).

	PREDISPOSITION	-1	0	+1
Objet	Presence de catiches	peu probable	possible	avérée
	diamètre de l’ouverture	Diam.<3m	3m<Diam <5m	5m<Diam.
	Parement	oui	provisoire	non
	Remblayage	oui	pas d info	non
Contexte	Nature des terrains environnants	résistants	Moyen	peu résistants
	eau dans terrains superficiels	Faible	Moyen/ponctuelle	Importante
	canalisations	absent	pas d info	oui
	effondrement passés	non	probable	oui

Figure 12. Facteurs définissant la prédisposition dans le cas des catiches à Seclin.

Peu d’information précises étant disponibles quant aux caractéristiques des puits-bouteille à Seclin, la prédisposition a été évaluée par défaut pour certains critères. Ainsi on considère que, pour toutes zones où des puits-bouteille ont été recensés :

- la présence de puits-bouteille vides, sans confortement (parement) et sans remblayage, est au moins possible ;
- le diamètre d’ouverture initial est inférieur à 3 m ;
- les terrains environnants (limon) sont considérés comme moyennement résistants ;
- la présence d’eau dans les terrains superficiels est au moins possible de manière ponctuelle, voire importante si des informations sont disponibles à ce propos ;
- la présence de canalisations est supposée avérée puisque nous sommes en milieu urbain ;
- la présence d’effondrements passés est évaluée sur base des documents historiques disponibles.

Ainsi, la prédisposition des terrains pour le secteur de Seclin peut varier, au cas par cas, entre 1 et 5. La prédisposition sera définie peu sensible si le total est inférieur à 0, sensible entre 0 et 4, très sensible si le total est supérieur ou égal à 4.

Le croisement de l’intensité élevée avec le niveau de prédisposition défini aboutit à un niveau d’aléa tel que précisé dans le guide méthodologique wallon (évaluation faite pour chaque site identifié) (Figure 13).

Effet « effondrement localisé »		Prédisposition locale		
Diamètre du cratère (m)	Classe d'intensité	Peu sensible	Sensible	Très sensible
		$P < 0$	$0 \leq P < 4$	$4 \leq P$
$\varnothing \leq 1,5$	Limitée	Très faible	Faible	Faible
$1,5 < \varnothing \leq 3$	Moderée	Faible	Faible	Moyen
$3 < \varnothing \leq 10$	Elevée	Faible	Moyen	Fort
$\varnothing > 10$	Très élevée	Moyen	Fort	Très fort

Figure 13. Qualification de l'aléa d'effondrement localisé (Kheffi et Pacyna, 2018)

### c. Principe de la cartographie d'aléa

Les données disponibles relatives à la présence d'effondrements/tassements passés ou à la présence avérée ou supposée de catiches ont permis d'identifier les zones où il était nécessaire d'évaluer l'aléa. Il a été choisi par ailleurs d'élaborer la cartographie d'aléa par unité parcellaire. Chaque parcelle identifiée a donc fait l'objet d'une caractérisation de l'aléa en croisant intensité et prédisposition évaluées selon les informations disponibles.

Selon la méthode wallonne, les deux aléas (tassement et effondrement localisé) peuvent être évalués pour l'ensemble des sites identifiés. Deux cartes ont donc été construites : une pour l'aléa de tassement et une pour l'aléa d'effondrement. Le principe de construction est d'attribuer à chaque parcelle un niveau d'aléa et de le symboliser par une couleur. Par ailleurs, étant donné l'incertitude quant à l'extension exacte des exploitations et considérant que ces exploitations pouvaient « déborder » de la limite parcellaire stricte, il a été considéré une zone de sécurité de 10 m supplémentaire englobée dans les zones d'aléa.

## B. Application de la méthodologie française sur le site de Jemappes (Belgique)

Jemappes est une commune de l'entité de Mons (Hainaut), d'environ 10.000 habitants. Outre l'exploitation minière de charbon qui ne sera pas évoquée ici, Jemappes a également été affectée par des exploitations de craie, au 19<sup>ème</sup> siècle essentiellement.

## 1. Résumé des données analysées

Les documents et informations ont été fournies par le SPW. Il s'agit d'archives (plans d'exploitation, autorisations d'exploiter, déclarations de carrière, échanges de courriers) et de rapport d'effondrements. Les plans existants, les parcelles concernées par une déclaration ou encore les effondrements recensés ont été replacés sur un SIG.

Les cavités décrites dans les documents d'archives sont des carrières de craie organisées en galeries filantes sinueuses et assez peu hiérarchisées partant de différents puits.

## 2. Traitement des données et démarche appliquée

Les objets souterrains consistent uniquement en des galeries de 2 à 3 m de hauteur et situées entre 25 à 30 m de profondeur pour la plupart. Les documents d'archives révèlent des galeries filantes avec peu de piliers ; et ces derniers, si existants, sont massifs.

Les événements recensés sur la zone sont uniquement des effondrements localisés, qui ne sont pas liés à des ruptures de piliers. La prédisposition à l'apparition d'effondrement généralisé sur la zone est très faible, ce type de mouvement a donc été exclu de l'évaluation des aléas. L'absence d'affaissement sur la zone a également mené à l'exclusion de ce type de mouvement. Le tassement n'est pas considéré non plus, les vides étant non remblayés.

Les effondrements localisés rapportés à Jemappes sont tous dus, selon les archives, à la présence d'anciens puits ou à des montées de voûtes. Ce sont, par ailleurs, des événements anciens puisqu'ils datent de la fin de l'exploitation (1800-1900). Le diamètre des effondrements est compris entre 3 et 5 m maximum.

Au vu de ces informations, la démarche française conduit à définir un aléa de référence basé sur les informations historiques : il s'agit de l'aléa de type effondrement localisé, d'intensité limitée (la classe d'intensité limitée étant définie sous 5 m de diamètre en France<sup>2</sup>).

La qualification de l'aléa repose sur le croisement de l'intensité prévisible (ici « limitée ») avec la probabilité d'occurrence. Cette dernière est évaluée en combinant la notion de prédisposition du site à être affecté par l'événement (ici l'effondrement localisé) et la présomption de présence de l'objet souterrain.

Pour établir cette présomption de présence, la démarche française a consisté à définir des « configurations-type » sur le site de Jemappes et à les caractériser cartographiquement (Figure 14).

<b>Configuration 1</b>	Galeries cartographiées (avec ou sans effondrement recensé), généralement issues d'une numérisation de plan de travaux	Cartographie à partir du tracé des galeries
<b>Configuration 2</b>	Secteur avec demande d'exploitation mais sans plan connu (avec ou sans effondrement recensé)	Cartographie à partir du tracé de la parcelle <sup>3</sup>
<b>Configuration 3</b>	Secteur avec carrière souterraine supposée	Cartographie à partir du tracé de la parcelle <sup>3</sup>
<b>Configuration 4</b>	Effondrements en dehors des zones de carrière avérée ou supposée	Cartographie à partir du tracé de la parcelle <sup>3</sup>

Figure 14. Définition des configurations-type sur Jemappes. <sup>3</sup> : les parcelles évoquées ici sont celles issues du cadastre actuel, globalement identique au cadastre primitif de 1834

### 3. Evaluation de l'aléa et cartographie

La probabilité d'occurrence a été établie sur base de l'analyse des experts en croisant les paramètres suivants :

- la prédisposition à la rupture du toit de la cavité ;
- la prédisposition à la remontée de l'instabilité en surface ;
- la présomption de présence de vides.

Cette analyse a été faite pour chaque configuration-type (Figure 15).

Configuration-type	Prédisposition à la rupture et à l'éboulement du toit de la cavité	Prédisposition à la remontée de l'instabilité en surface	Présomption de présence de vides	Probabilité d'occurrence
Configuration 1 : galeries cartographiées	Très sensible	Probable	Très probable à certaine	Forte
Configuration 2 : parcelle avec demande d'exploitation uniquement	Sensible	Probable	Très probable à certaine	Moyenne
Configuration 3 : galeries supposées (secteurs limitrophes aux secteurs de vides avérés)	Sensible	Probable	Supposée	Faible
Configuration 4 : effondrements hors zones de carrière avérée ou supposée	Sensible	Probable	Supposée	Faible

Figure 15. Synthèse des probabilités d'occurrence retenues pour chaque configurations-type à Jemappes.

Par ailleurs, l'intensité de l'aléa d'effondrement ayant été fixée à un niveau « limité » pour toutes les configurations retenues, le niveau d'aléa a pu être établi pour chaque configuration-type (Figure 16).

Configuration-type	Probabilité d'occurrence aux effondrements localisés	Intensité des effondrements localisés	Niveau d'aléa
Configuration 1 : galeries cartographiées	Forte	Limitée	Moyen
Configuration 2 : parcelle avec demande d'exploitation uniquement	Moyenne	Limitée	Moyen
Configuration 3 : galeries supposées (secteurs limitrophes aux secteurs de vides avérés)	Faible	Limitée	Faible
Configuration 4 : effondrements hors zones de carrière avérée ou supposée	Faible	Limitée	Faible

Figure 16. Tableau de synthèse des caractéristiques d'analyse de l'aléa effondrements localisés sur Jemappes.

#### 4. Principe de la cartographie d'aléa

L'aléa, notion spatiale, a pour vocation d'être cartographié pour faire ressortir les secteurs les plus sensibles au développement des phénomènes redoutés. La cartographie doit par ailleurs prendre en compte l'extension latérale des désordres en surface, ainsi que l'incertitude inhérente à la localisation de l'objet souterrain.

La cartographie appliquée sur le site de Jemappes dépend des configuration-type retenues. Ainsi, pour la configuration 1, l'aléa sera dessiné selon le tracé des galeries cartographiées auxquelles est ajoutée une marge de sécurité, ici définie à 10 m d'extension latérale. Les configurations 2, 3 et 4, qui sont définies selon une cartographie parcellaire, seront caractérisées par des aléas d'emprise correspondante aux parcelles concernées augmentée d'une marge de sécurité, définie à 10 m pour les 3 configurations.

## VI. Comparaison des démarches et conclusions

Malgré des bases théoriques très similaires, l'application des méthodologies françaises et wallonnes sur deux sites tests ont montré de nettes différences.

La détermination de l'intensité des événements est basée sur des calculs théoriques dans les deux cas (Wallonie et France). Néanmoins, l'approche française, intègre également le retour d'expérience et la notion d'« aléa de référence » (accident passé le plus intense). Aussi, la démarche wallonne apparaît comme plus sécuritaire notamment en utilisant un angle de talus maximisant l'extension latérale des désordres en surface. Notons également que les seuils de classes d'intensité sont plus contraignants en Wallonie pour l'effondrement localisé. Enfin, en Wallonie, les classes d'intensité sont directement associées à la notion de conséquences sur les enjeux et renvoient, dès lors, à la gestion de l'aléa. La Wallonie distingue par ailleurs l'apparition de cratères d'effondrement primaire et secondaire, alors qu'en France l'évaluation de l'intensité considère directement le cratère de dimension maximale (en lien avec l'épaisseur des terrains peu cohérents de surface).

Quant à la notion de prédisposition, l'approche wallonne est très quantitative (pondération de différents facteurs) et y inclut la présomption de présence de l'objet. La vision française, plus qualitative, se base sur les événements passés et intègre l'expertise de critères de prédisposition (caractéristiques des exploitations et des terrains de recouvrement notamment) pour qualifier la possible rupture de l'ouvrage souterrain et sa propagation vers la surface. La présomption de présence de vides est prise en compte à l'issue de cette analyse en cas de lacunes d'informations. Par ailleurs, lorsque la présence des cavités n'est que supposée, le niveau d'aléa résultant peut être diminué par le niveau de la présomption. Si la présomption de présence est faible, l'aléa sera au maximum de niveau faible.

En termes de cartographie finale, la Wallonie propose systématiquement une carte par type de phénomène. Selon les cas et le type de mouvements de terrains attendus, une même carte peut présenter, en France, plusieurs phénomènes. C'est notamment le cas, pour l'affichage des phénomènes de tassement et d'effondrement localisé, où l'aléa majorant (effondrement localisé) est privilégié car les conséquences en surface sont les plus fortes et intégreront, quoi qu'il arrive les tassements.

Dans les cas illustrés ci-avant, les données disponibles sur le site wallon de Jemappes, étaient plus précises que sur le site français de Seclin. Cela a permis la définition de différentes configurations, et de limiter, le cas échéant, la cartographie d'aléa à une emprise plus fine. Toutefois, il faut noter que la plupart des carrières souterraines de Seclin

sont encore accessibles et que dans un réelle démarche d'évaluation de l'aléa, elles feraient certainement l'objet d'un diagnostic de stabilité permettant de préciser l'emprise des vides (vérifications des plans d'archive), voire d'un diagnostic géotechnique pour définir précisément les prédispositions à la rupture et les intensité d'aléas attendues.

En conclusion, il apparait que la démarche wallonne est basée sur une approche plus sécuritaire. Si des cartographies d'aléa wallonnes étaient traduites en normes réglementaires, elles pourraient être sources de pratiques relativement contraignantes en terme d'aménagement du territoire. La démarche française, qui a été développée dans l'idée d'une gestion réglementaire de l'urbanisation, propose une approche plus pratique et plus facilement traduisible sur le terrain avec des conséquences plus raisonnées.

Si l'approche « 1 type d'aléa = 1 carte » (choisie en Wallonie et dans certains cas en France) permet de mettre en œuvre des mesures techniques ou des prescriptions de prévention très adaptées, une seule carte représentant l'aléa majorant (exemple de Jemappes), plus compliquée à établir a priori, semble plus simple à prendre en compte pour l'aménagement du territoire et lors de la mise en place des règles d'urbanisme.

Les cartographies d'aléa sont des outils essentiels de la gestion préventive du risque de type mouvements de terrain. Les régions de Wallonie et des Hauts-de-France possèdent des guides méthodologiques qui définissent comment peuvent être construites ces cartes. Le guide français est destiné à un public assez large et définit les concepts et grandes notions de l'évaluation des aléas. Par contre, l'application concrète de la méthodologie n'est pas détaillée dans le guide et est laissée à l'appréciation de l'expert en charge. Le guide wallon est quant à lui plutôt destiné à un public d'expert, détaillant les bases de calculs théoriques à appliquer dans différents cas de figure. L'application des méthodologies sur les deux sites tests, comparées dans le présent rapport, reflètent d'ailleurs cette différence : une application wallonne basée sur la théorie, une application française reposant plutôt sur le retour d'expérience.

## VII. Références

CEREMA, Ineris (2019). *Guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers*. DGPR (Ministère de la Transition écologique et solidaire).

Ineris (2012). *Plan de Prévention des Risques Naturels. Guide méthodologique : cavités souterraines abandonnées*. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT).

Ineris, GEODERIS, Pôles Après-Mine (2018). *Evaluation des aléas miniers*. DGPR (Ministère de la Transition écologique et solidaire).

KHEFFI A. et PACYNA D. (2018). *Elaboration de cartographies de zones d'aléa de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains connus de Wallonie – Rapport méthodologique*. Service Public de Wallonie, DGO 3.