

Colfontaine, le 30 avril 2018

Département de l'Environnement et de l'Eau (DGO3)

**ÉLABORATION DE CARTOGRAPHIES DE
ZONES D'ALÉAS DE MOUVEMENT DE TERRAIN
ENGENDRÉS PAR LES OBJETS SOUTERRAINS
CONNUS DE WALLONIE
RAPPORT METHODOLOGIQUE**

Rapport 0326/2018

Ce rapport contient 130 pages et 1 annexe

A. KHEFFI
Attaché qualifié,
Unité « Analyse cartographique »
Direction de Colfontaine

D. PACYNA,
Attaché qualifié,
Service géologique de Wallonie
Direction des risques industriels,
géologiques et miniers (DGO3)



Wallonie

Contact

Pour toute information complémentaire, prière de prendre contact avec l'ISSEP avec les moyens et adresses mentionnées ci-dessous :

Institut Scientifique de Service Public (ISSEP)

Direction de Colfontaine

Rue du la Platinerie

B-7340 COLFONTAINE

Tél. : + 32 65 61 08 11

Courriel : colfontaine@issep.be

ÉLABORATION DE CARTOGRAPHIES DE ZONES D'ALÉAS DE MOUVEMENT DE TERRAIN ENGENDRÉS PAR LES OBJETS SOUTERRAINS CONNUS DE WALLONIE RAPPORT METHODOLOGIQUE

Date	Le 30 avril 2018
Maître d'ouvrage	Département de l'Environnement et de l'Eau (DGO3)
Référence	0326/2018
Version	2
Type	Rapport final
Auteurs	A. KHEFFI, D. PACYNA

Table des matières

1	INTRODUCTION	10
2	CADRE DE TRAVAIL	11
	2.1 Constat initial	11
	2.2 De l'arbitraire au justifié....	12
	2.3 Le Schéma de Développement du Territoire, fondement de la réflexion	13
	2.4 Les grandes inspirations	13
	2.4.1 Les contraintes karstiques	13
	2.4.2 La cartographie d'aléa d'inondation	15
	<i>A. Contexte</i>	15
	<i>B. Les cartographies relatives aux inondations</i>	16
	<i>C. L'aléa d'inondation</i>	17
	2.4.3 Les plans français de prévention des risques naturels et miniers	17
	2.4.4 Le Décret wallon du 5 décembre 2008 relatif à la gestion et la protection des sols	18
3	DÉMARCHE POURSUIVIE	19
	3.1 Objectif principal	19
	3.2 Conditions préalables	19
	3.3 Limites d'usage	20
4	LES MOUVEMENTS DE TERRAIN CAUSÉS PAR LES OBJETS SOUTERRAINS	21
	4.1 Origines	21
	4.2 Les effets (ou désordres) redoutés en surface	21
	4.2.1 Le tassement	22
	4.2.2 Le gonflement	22
	4.2.3 L'affaissement progressif	22
	4.2.4 L'effondrement localisé	25
	4.2.5 L'effondrement généralisé	26
	4.3 Relation entre objets souterrains et effets redoutés en surface	28
5	L'ALÉA DE MOUVEMENT DE TERRAIN	30
	5.1 Généralités et définitions	30
	5.2 Distinction entre « aléa » et « risque »	31
	5.3 Effets considérés pour les mouvements de terrain : nature et intensité	31
	5.4 Prédisposition locale	33

5.4.1	Signification de la prédisposition	33
5.4.2	Contribution de l'objet souterrain	34
5.4.3	Contribution des contextes des objets souterrains	35
5.4.4	L'accidentologie ou l'analyse des données des accidents passés	36
5.5	Les différents types d'aléa de mouvement de terrain	38
5.5.1	Définition et cartographie des zones d'aléa	38
	<i>A. Qualification des niveaux d'aléa</i>	38
	<i>B. Cartographie des zones d'aléa</i>	39
	<i>C. Types d'aléa considérés</i>	40
5.5.2	Le tassement	40
	<i>A. Qualification de l'intensité d'effet</i>	40
	<i>B. Qualification de la prédisposition</i>	41
	<i>C. Qualification de l'aléa « tassement »</i>	41
5.5.3	L'affaissement progressif	41
	<i>A. Qualification de l'intensité d'effet</i>	42
	<i>B. Qualification de la prédisposition</i>	42
	<i>C. Qualification de l'aléa « affaissement progressif »</i>	42
5.5.4	Effondrement localisé	43
	<i>A. Qualification de l'intensité d'effet</i>	43
	<i>B. Qualification de la prédisposition</i>	44
	<i>C. Qualification de l'aléa « effondrement localisé »</i>	49
5.5.5	Effondrement généralisé	49
	<i>A. Qualification de l'intensité d'effet</i>	49
	<i>B. Qualification de la prédisposition</i>	50
	<i>C. Qualification de l'aléa « effondrement généralisé »</i>	50
6	DONNÉES UTILISÉES ET LEUR ORIGINE	51
6.1	Données relatives aux objets	51
6.1.1	Puits de mines	51
	<i>A. Puits de mines</i>	51
	<i>B. Puits de carrières souterraines</i>	52
	<i>C. Puits d'exploitations superficielles de minerais de fer oxydés</i>	52
6.1.2	Zone de présence possible d'anciens puits de mines	52
6.1.3	Carrières souterraines de phosphate de Hesbaye (« phosphate riche »)	53
6.1.4	Marnières souterraines, carrières souterraines de craie et de tuffeau/silex	54
6.1.5	Carrières souterraines de craie phosphatée	55
6.1.6	Marnières souterraines et puits à pierres du Brabant wallon	56
6.1.7	Carrières souterraines de pierre de Gobertange	56
6.1.8	Carrières souterraines de terres plastiques	56
	<i>A. En Condroz</i>	56
	<i>B. En Hainaut</i>	57
6.1.9	Carrières souterraines de sable d'Havré	57
6.1.10	Gîtes de minerais de fer oxydés	57
6.1.11	Gîtes de minerais métalliques	58
6.1.12	Autres carrières souterraines	58
6.2	Objets non considérés par la méthodologie	58
6.3	Données relatives aux contextes	59
6.3.1	Géologie	59
6.3.2	Hydrogéologie	59
6.3.3	Données des carte géotechniques de l'Institut géotechnique de l'Etat	59
6.3.4	Données d'essais géotechniques in-situ	60
6.3.5	Données pédologiques	60
6.3.6	Proto-cartographie des formations superficielles	60

7	MÉTHODE DE CALCUL POUR UN EFFONDREMENT LOCALISÉ	62
	7.1 Les phénomènes et mécanismes concernés	62
	7.2 La remontée de fontis	62
	7.2.1 Principe et description du mécanisme	62
	7.2.2 Modélisation	63
	A. <i>Le volume disponible</i>	63
	B. <i>Le volume mobilisable</i>	66
	C. <i>La remontée du fontis jusqu'en surface</i>	67
	7.3 Le cratère d'effondrement	69
	7.3.1 Le cratère primaire	69
	7.3.2 Le cratère secondaire	70
	7.3.3 Dimensions maximales du cratère secondaire	70
8	APPLICATION À QUELQUES TYPES D'OBJETS	73
	8.1 Hypothèses générales sur le choix des paramètres	73
	8.2 Les puits	73
	8.2.1 Caractérisation de ces objets	73
	8.2.2 Hypothèses de travail et étapes de calcul d'effet	74
	A. <i>Le volume de vide disponible en surface V_r</i>	74
	B. <i>Le cratère d'effondrement primaire</i>	77
	C. <i>Le cratère d'effondrement secondaire</i>	78
	8.2.3 Étude de sensibilité	80
	A. <i>Influence de l'angle de parois β_1 sur les dimensions du cratère primaire</i>	81
	B. <i>Influence de la descente z_{vide} de la masse de remblais présente dans le puits</i>	82
	C. <i>Influence du coefficient de foisonnement des formations superficielles K_{fm}</i>	83
	D. <i>Influence de l'angle d'inclinaison β_2</i>	85
	8.2.4 Exemples numériques	86
	A. <i>Qualification de l'intensité d'effet pour l'effondrement localisé</i>	88
	B. <i>Qualification de la prédisposition locale pour l'effondrement localisé</i>	89
	C. <i>Qualification et représentation de l'aléa d'effondrement localisé</i>	89
	8.3 Les puits d'exploitation de minerais de fer oxydés (« minières de fer »)	92
	8.3.1 Qualification de l'intensité d'effet	92
	8.3.2 Qualification de la prédisposition locale	93
	8.3.3 Qualification de l'aléa d'effondrement localisé	94
	8.4 Les objets comportant des cavités souterraines	95
	8.4.1 L'aléa de tassement	95
	8.4.2 L'aléa d'effondrement localisé	95
	A. <i>Hypothèses de travail</i>	95
	B. <i>Qualification de l'intensité d'effet</i>	98
	C. <i>Qualification de la prédisposition locale</i>	104
	D. <i>Qualification de l'aléa d'effondrement localisé</i>	105
	E. <i>Les exploitations souterraines de phosphates en Hesbaye</i>	106
	F. <i>Les marnières de Hesbaye</i>	111
	8.5 Les objets souterrains susceptibles de provoquer un effondrement généralisé	114
9	CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA DE MOUVEMENT DE TERRAIN SUR LE TERRITOIRE WALLON ET APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE	116
	9.1 Objectif de la cartographie	116
	9.2 Révision de la cartographie des objets	117
	9.3 Révision de la cartographie des objets	118
	9.4 Principes généraux d'établissement de la cartographie	120
	9.5 Couches de données livrées	121
	9.6 Transposition en zones de risque naturel et de contrainte géotechnique au sens du CoDT (art. D.IV.57, 3°).	122

10	CONCLUSIONS	124
11	RECOMMANDATIONS	125
12	BIBLIOGRAPHIE	126

Figures

Figure 1 – Vue de l'application internet « CIGALE - Les thématiques sous-sol », illustrant les zones de consultation pour les puits de mines (en bleu) et les carrières souterraines (en rouge) diffusées par le Service public de Wallonie.	12
Figure 2 – Grille de détermination de l'aléa d'inondation par débordement (Source : Notice méthodologique d'élaboration des cartographies des zones soumises à l'aléa d'inondation, version du 26/02/2016).	17
Figure 3 – Illustration du phénomène d'affaissement provoqué par l'extraction d'une couche géologique ou d'un gisement (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).	23
Figure 4 – Modèle conceptuel de l'affaissement progressif provoqué par l'exploitation d'une couche sub-horizontale, proposé par le National Coal Board en 1975 (Brady & Brown, 2006).	24
Figure 5 – Illustration du phénomène d'effondrement provoqué par l'extraction d'une couche géologique ou d'un gisement (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).	25
Figure 6 – Principales étapes de l'évolution d'un fontis et de sa remontée vers la surface (Source INERIS, Didier et al, 2010).	26
Figure 7 – Photographie aérienne de l'effondrement généralisé survenu le 22 avril 2015 à Cuesmes (Mons) par la Police fédérale (Source : Rapport CACEff – Cellule d'Avis et de Conseils Effondrements du Service public de Wallonie).	27
Figure 8 – Photographie d'un bord de la zone effondrée le 22 avril 2015 à Cuesmes (Mons) en forme de « marche d'escalier ».	28
Figure 9 – Illustration didactique de l'aléa, de l'enjeu et du risque de mouvement de terrain (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).	31
Figure 10 – Tableau croisé déterminant l'intensité de l'aléa à partir de l'intensité de l'effet redouté et la prédisposition (Source : INERIS, 2006).	39
Figure 11 - Emprise de la zone de l'effondrement localisé en forme d'entonnoir, induite par l'éboulement des terrains superficiels vers la tête d'un puits vide (source INERIS).	47
Figure 12 - Développement et remontée d'un fontis au départ d'une cavité souterraine : 5 situations possibles. 1 : le fontis est en cours de remontée ; 2 : le fontis est auto-comblé ; 3 : le fontis atteint les formations superficielles ; 4 : le fontis provoque un cratère primaire ; 5 : le fontis provoque un cratère secondaire (Whittaker & Reddish, 1989).	62
Figure 13 – Principes de la modélisation de la remontée de fontis au départ du croisement de deux galeries, selon la méthode de Wittaker & Reddish (Whittaker & Reddish, 1989).	65
Figure 14 – Modèle INERIS pour la remontée de fontis : Modélisation du volume d'éboulis se répandant dans une galerie trapézoïdale et interférant avec les parois voisines (Didier et al, 2010).	65
Figure 15 – Modèle INERIS pour la remontée de fontis : Modélisation du volume d'éboulis se répandant dans la chambre d'une exploitation en chambres et piliers, et interférant avec les piliers voisins (Didier et al, 2010).	66
Figure 16 – Modélisation de la remontée de fontis : illustration des grandeurs z et z' (adapté de Didier et al, 2010).	69
Figure 17 - Illustration du volume mobilisable maximum associé au cas du puits et correspondant au développement du cratère secondaire maximal (adapté de INERIS).	71
Figure 18 - Illustration du volume disponible pour le puits (adapté de INERIS).	76
Figure 19 - Illustration du volume disponible et du volume mobilisable en forme de cône renversé pour le cas du puits (adapté de INERIS).	79
Figure 20 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_1 d'inclinaison des parois du cratère primaire sur les dimensions de ce dernier.	81
Figure 21 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_1 d'inclinaison des parois du cratère primaire sur le volume de ce dernier.	82
Figure 22 – Graphique illustrant l'influence de la descente z_{vide} des remblais présents dans le puits sur les paramètres du cratère secondaire.	83

Figure 23 – Graphique illustrant l'influence du coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles sur les paramètres du cratère primaire.....	84
Figure 24 – Graphique illustrant l'influence du coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles sur les paramètres du cratère secondaire.....	84
Figure 25 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_2 de talus naturel des formations superficielles sur les paramètres du cratère secondaire.....	85
Figure 26 – Cartographie d'une zone de Wallonie comportant des puits de mines et représentation des zones de consultation du Service public de Wallonie.....	86
Figure 27 – Modélisation de l'épaisseur des formations superficielles meubles à partir des données de la Carte géotechnique et pour le secteur de la zone-test.....	87
Figure 28 – Cartographie des zone d'aléa d'effondrement localisé (référence cratère primaire) relatives aux puits de mines d'une zone de Wallonie.....	90
Figure 29 – Cartographie des zone d'aléa d'effondrement localisé (référence cratère secondaire) relatives aux puits de mines d'une zone de Wallonie.....	91
Figure 30 – Comparaison entre les zones de consultation du Service public de Wallonie et les zones d'aléas d'effondrement localisé pour un secteur de Wallonie comportant des puits de mines.....	91
Figure 31 – Cartographie d'une zone d'aléas d'effondrement localisé pour des secteurs renfermant des puits d'exploitation de minerais de fer oxydés.....	95
Figure 32 – Principe de construction de la zone d'aléa d'effondrement localisé pour une galerie située à une profondeur constante (adapté de INERIS, 2006).....	96
Figure 33 – Principe de construction de la zone d'aléa d'effondrement localisé pour une galerie dont la profondeur est variable (INERIS, 2006).....	97
Figure 34 – Cartographie des zones d'aléas d'effondrement localisé représentées pour les marnières et les exploitation de phosphate de Hesbaye (Kheffi et al, 2018).....	114

Tableaux

Tableau 1 : Appariement entre les objets souterrains considérés en Wallonie et les types de mouvements de terrain redoutés, potentiellement produits en surface (tableau adapté de INERIS, 2006).....	29
Tableau 2 : Classes d'intensité d'effet proposées pour l'aléa de tassement (adapté de INERIS, 2006).....	40
Tableau 3 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas de tassement avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale.....	41
Tableau 4 : Classes d'intensité d'effet pour l'aléa d'affaissement progressif (Source : INERIS, 2006).....	42
Tableau 5 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas d'effondrement localisé avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale (adapté de INERIS, 2006).....	42
Tableau 6 : Classes d'intensité d'effet proposées pour l'aléa d'effondrement localisé (adapté de INERIS, 2006).....	44
Tableau 7 - Tableau des classes d'intensité pour l'effondrement localisé (INERIS, 2006).....	44
Tableau 8 : Exemple de grille d'évaluation de la prédisposition de l'aléa fontis sur le bassin ferrifère lorrain, proposée par Jean-Pierre JOSIEN de GEODERIS (Lambert et al, 2007).....	45
Tableau 9 : Proposition d'une grille d'évaluation de la prédisposition de développement d'un fontis au départ du vide d'un objet souterrain et sa remontée jusqu'en surface (adapté de Lambert et al, 2007).....	46
Tableau 10 : Proposition d'une grille d'évaluation de la prédisposition d'un puits à provoquer un effondrement localisé (adapté de Lambert et al, 2007).....	48
Tableau 11 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas d'effondrement localisé avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale.....	49
Tableau 12 : Classe d'intensité d'effet proposée pour l'aléa d'effondrement généralisé (adapté de INERIS, 2006).....	49
Tableau 13: Exemples de valeurs types de l'angle de frottement interne et de la cohésion utilisées pour plusieurs formations constitutives du sol (Source : INERIS).....	70
Tableau 14 : Tableau récapitulatif reprenant les caractéristiques et hypothèses principales pour les objets souterrains de la catégorie "puits".....	76
Tableau 15 : Données initiales des puits de mines disponibles pour l'évaluation et la cartographie des aléas de mouvement de terrain.....	87
Tableau 16 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les 5 puits de la zone-test.....	88
Tableau 17 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les 5 puits de la zone-test.....	88

Tableau 18 : Evaluation du score P de la prédisposition pour les 5 puits de la zone test.	89
Tableau 19 : Valeurs des classes d'intensité d'effet et de prédisposition, permettant la qualification du niveau d'aléa pour chacun des 5 puits de mines de la zone test.	89
Tableau 20 : Données initiales pour l'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé pour un type de puits de mines métalliques.	92
Tableau 21 : Valeur du volume et du rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que de la classe d'intensité d'effet pour un type de puits d'exploitation de minerais de fer oxydés.	93
Tableau 22 : Valeur du volume et du rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que de la classe d'intensité d'effet pour un type de puits de minerais de fer oxydés.	93
Tableau 23 : Evaluation du score P de la prédisposition pour le type de puits d'exploitation de gîtes de minerais de fer oxydés.	93
Tableau 24 : Valeurs des classes d'intensité d'effet et de prédisposition, permettant la qualification du niveau d'aléa pour le type de puits d'exploitation de gîtes de minerais de fer oxydés.	94
Tableau 25 : Données relatives aux 6 objets souterrains pris comme exemple pour évaluer l'aléa d'effondrement localisé.	97
Tableau 26 : Calcul du volume de vide disponible à partir des paramètres géométriques des 6 objets souterrains considérés.	98
Tableau 27 : Valeurs calculées des profondeurs d'auto-comblement et des volumes de vide résiduels en surface pour les 6 objets souterrains.	99
Tableau 28 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.	100
Tableau 29 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.	101
Tableau 30 : Tableau récapitulatif des diamètres de cratère d'effondrement évalués pour les cavités souterraines susceptibles de développer un fontis jusqu'en surface.	103
Tableau 31 : Qualification de la prédisposition pour les 6 objets souterrain - évaluation du score P d'après les critères.	104
Tableau 32 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.	105
Tableau 33 : Données des quatre configurations retenues pour qualifier l'aléa d'effondrement localisé pour les exploitations souterraines de phosphate en Hesbaye.	107
Tableau 34 : Qualification de l'effet d'effondrement localisé - Calcul des volumes disponible et résiduels, et des cratères d'effondrement primaire et secondaire induit par une exploitation souterraine de phosphate en Hesbaye.	109
Tableau 35 : Qualification de la prédisposition locale via le score P pour les quatres configurations envisagées pour les exploitations de phosphates en Hesbaye.	110
Tableau 36 : Qualification de l'aléa d'effondrement localisé pour l'exploitation de phosphate en Hesbaye.	110
Tableau 37 : Données géométriques de 4 typologies de marnières de Hesbaye.	111
Tableau 38 : Paramètres de la cheminée de fontis calculés pour les 4 typologies de marnières en Hesbaye.	111
Tableau 39 : Calculs des dimensions des cratères d'effonrement primaire et secondaire pour les 4 typologies de marnières de Hesbaye.	112
Tableau 40 : Qualification de la prédisposition pour les 4 configurations de marnières - évaluation du score P d'après les critères.	112
Tableau 41 : Attribution des classes d'intensité d'effet, de prédisposition et de niveau d'aléa pour les 4 typologies de marnières de Hesbaye.	113
Tableau 42 : Synthèse des effets attendus par les objets souterrains susceptibles de provoquer des effondrements généralisés ou en masse.	115

Annexe

Annexe 1 : Grille de valeurs du coefficient de foisonnement (source : INERIS)

Liste des abréviations

AGW	Arrêté du Gouvernement wallon
AR	Arrêté royal
CACEff	Cellule d'Avis et de Conseils Effondrements du SPW
CoDT	Code wallon de Développement Territorial
DGO3	Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement du SPW
INERIS	Institut National français de l'Environnement et des Risques
DGO1	Direction générale opérationnelle Routes et Bâtiments du SPW
DGO1 - DET	Département des Expertises Techniques de la DGO1
DGO1 – 61	Direction de la Géotechnique du SPW (DGO1-DET)
DGO3 - DEE	Département de l'Eau et de l'Environnement de la DGO3
DRIGM	Direction des Risques Industriels, Géologiques et Miniers de la DGO3 - DEE
ISSeP	Institut Scientifique de Service Public
SGW	Service géologique de Wallonie
SPW	Service public de Wallonie
DGO4	Direction générale opérationnelle Aménagement du Territoire, Logement, Patrimoine et Energie
DGO4 - DATU	Département de l'Aménagement du Territoire de la DGO4
DGO3 - DEMNA	Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole de la DGO3
ULB	Université Libre de Bruxelles
UMONS	Université de Mons
UNamur	Université de Namur
SDT	Schéma de Développement Territorial wallon

1 INTRODUCTION

Ce rapport méthodologique est un produit de la mission conjointement menée par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) et le Service géologique de Wallonie (SGW) de 2013 à 2017, portant sur l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation et de cartographie des zones d'aléas de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains connus en Wallonie.

Cette mission a été financée grâce aux interventions :

- De Monsieur C. Di Antonio, Ministre wallon de l'Environnement, de la Transition écologique, de l'Aménagement du Territoire, des Travaux publics, de la Mobilité, des Transports, du Bien-être animal et des Zonings ;
- du Département de l'Eau et de l'Environnement de la Direction générale opérationnelle Agriculture, Environnement, Ressources naturelles (DGO3) du Service public de Wallonie (SPW).

Le comité d'accompagnement a été présidé par Monsieur B. Tricot, Inspecteur général du Département de l'Eau et de l'Environnement, ou son délégué, Monsieur E. Lheureux, Directeur de la Direction des risques industriels, géologiques et miniers.

Ont pris part à ce comité :

- Pour l'Administration :
 - Le Service géologique de Wallonie (DGO3-DEE),
 - La Cellule Mines (DGO3-DEE),
 - La Direction de la Coordination des Données (DGO3-DEMNA),
 - La Cellule Aménagement-Environnement (DGO4-DATU),
 - La Direction de la Géotechnique (DGO1-DET) ;
- La Direction de Colfontaine de l'ISSeP ;
- Les experts indépendants :
 - Professeur Ch. Schroeder, ULB,
 - Professeur J.-P. Tshibangu, UMONS,
 - Professeur J. Yans, UNAMUR.

Le support technique de Messieurs X. Dauplet et J.-M. Watelet de la Direction du Sol et du Sous-sol de l'Institut National français de l'Environnement et des Risques (INERIS), a aussi été sollicité dans le cadre de ce travail.

2 CADRE DE TRAVAIL

2.1 Constat initial

La Wallonie possède un sous-sol géologiquement complexe qui comporte naturellement de nombreuses ressources stratégiques : charbon, métaux, craies, phosphates,.... Ces matières ont été intensément exploitées, entre le 10^{ème} et le 20^{ème} siècle, léguant aujourd'hui en guise d'héritage l'obligation d'une stratégie de gestion des risques résiduels compatible avec l'aménagement du territoire et l'attractivité économique de la Région.

Le Service public de Wallonie (SPW) applique depuis plus de 20 ans une approche de prévention des risques liés aux objets souterrains (que sont les carrières souterraines, les puits de mines, les minières, les phénomènes karstiques et autres cavités souterraines). Son but vise la réduction de l'exposition des cibles ou enjeux potentiels (population, biens ou projets immobiliers, infrastructures,...) au risque résiduel. C'est pourquoi la collecte d'une importante quantité de données relatives aux objets souterrains de Wallonie a débuté en 1994 et a permis de nombreuses cartographies documentées : karst (1994 – aujourd'hui), exploitations souterraines (2001-2017), puits de mine (1997-2017), gîtes métalliques et de fer (2009)... Ces cartographies positionnent plus ou moins précisément les objets souterrains selon la qualité des sources de données disponibles ayant servi à leur constitution.

Ces données servent de support à la remise d'avis et de recommandations portant sur la compatibilité entre les projets soumis à demande de permis et le risque local résiduel lié aux objets souterrains. Pour tenir compte de l'extension des mouvements de terrain possibles, il a été vite nécessaire de définir des zones d'influence plus larges que la zone d'emprise des objets souterrains. Pour l'exemple des puits de mines, l'Administration nationale des Mines avait arbitrairement fixé en 1973 des zones « *non aedificandi* » de 25 mètres autour des puits situés sur les sites d'activité économique désaffectés (SAED). L'Administration wallonne a ensuite étendu cette pratique à l'ensemble des puits. Conscient de l'inadéquation de cette mesure face aux contextes actuels, elle requalifie en 2010 ces zones *non aedificandi* en « zones de consultation » et module leur taille à 10, 20 ou 30 mètres de rayon selon une appréciation de la qualité géotechnique des terrains encaissants localement, à laquelle est ajoutée l'imprécision cartographique de la position du puits concerné. Un travail comparable définit des zones de consultation pour les carrières souterraines élargies de 25 mètres par rapport à leur emprise réelle (plans des exploitations) ou supposée (parcelles cadastrales, avec leur imprécision). Pour les gîtes métalliques et de fer (« minières »), il s'agit d'une zone tampon de 50 mètres par rapport à leur définition cartographique peu précise du fait des sources.

Ces zones sont diffusées publiquement sur internet par le SPW sur le portail cartographique WalOnMap, sur l'application cartographique « Les thématiques sous-sol » du Service géologique de Wallonie (voir Figure 1) et sur l'application CIGALE, afin que ses services soient sollicités pour des avis et des recommandations à destination des propriétaires, futurs acquéreurs immobiliers, auteurs de projet, bureaux d'études, architectes, notaires, pouvoirs publics et citoyens.

Ces zones ont le grand mérite d'exister et contribuent pleinement à la mise en œuvre d'une politique raisonnée de prévention des risques du sous-sol. Elles ont cependant deux inconvénients majeurs :

- 1) d'abord, comme illustré sur la Figure 1, toutes les zones de consultation sont uniquement colorées selon leur filiation à l'objet souterrain qu'elles caractérisent : elles ne renseignent donc que l'existence documentée d'un objet souterrain donné, sans donner l'intensité du danger potentiellement redouté. Aucune hiérarchie de ces zones, même relative, ne peut être établie pour fixer des priorités dans les choix de gestion. Dans ces conditions, une interprétation erronée pourrait amener à déclarer que toutes ces zones présentent un danger majeur ou une contrainte géotechnique majeure.

- 2) ensuite, leur taille est proportionnelle à l'imprécision cartographique frappant les positions des objets souterrains concernés : les zones les plus étendues correspondent aux données les plus imprécises, et non pas aux menaces les plus importantes et aux effets plus étendus. Ici aussi, une interprétation erronée pourrait amener à déclarer un danger majeur pour ces zones alors qu'elles « diluent » la faible menace potentiellement engendrée par les objets souterrains concernés sur une surface géographique disproportionnée.

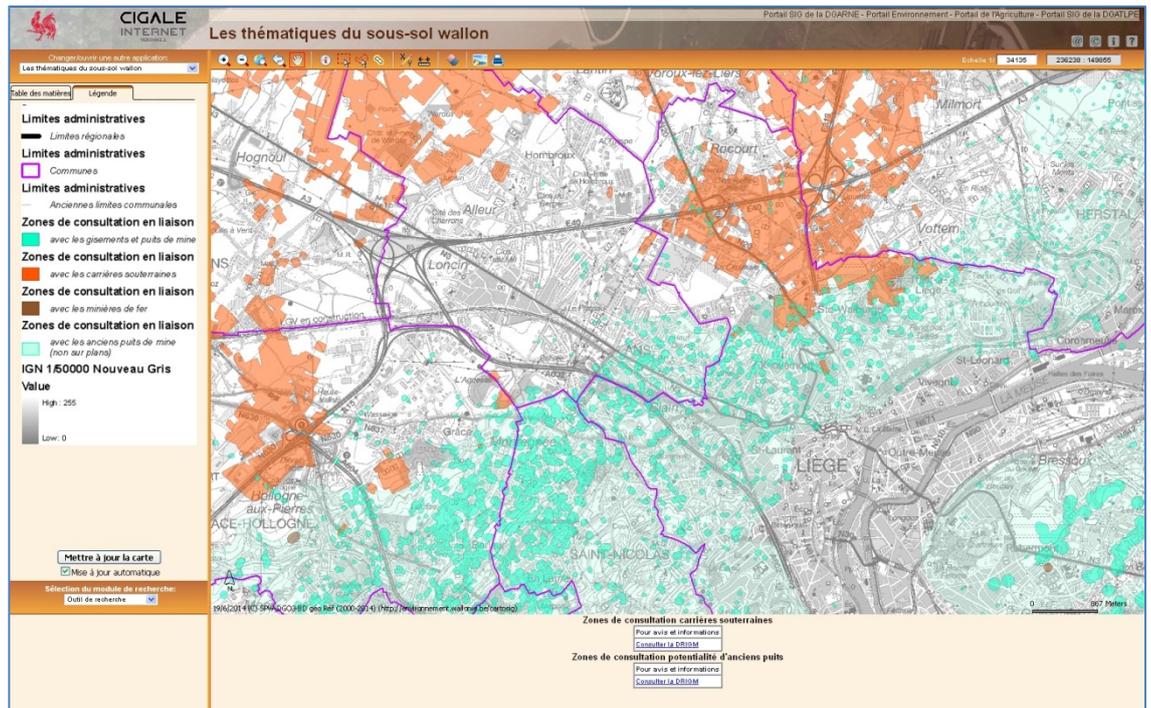


Figure 1 – Vue de l'application internet « CIGALE - Les thématiques sous-sol », illustrant les zones de consultation pour les puits de mines (en bleu) et les carrières souterraines (en rouge) diffusées par le Service public de Wallonie.

2.2 De l'arbitraire au justifié....

Les deux éléments précédents justifient l'élaboration d'une méthodologie évaluant l'aléa de mouvement de terrain, sujet de ce présent rapport. Il propose d'estimer sur base d'éléments justifiés, l'extension et l'intensité du danger induit par les objets souterrains et redouté en surface.

Le tout sera compilé dans des cartographies d'aléas qui, bien au-delà de la cartographie des objets et des zones de consultation, estimeront le danger redouté en surface. Chaque aléa est caractérisé par :

- un type,
- une intensité,
- une extension géographique.

Ce projet répond à une démarche de valorisation des données du SPW initiée depuis 1994 et visant une cartographie des menaces de mouvements de terrain, outil devant servir directement la prévention des risques du sous-sol.

Les citoyens, les auteurs de projets, les architectes, les autorités publiques attendent légitimement ces informations pour prévenir les menaces du sous-sol et ainsi proposer les

solutions visant à réduire le risque. C'est pourquoi ce projet propose une approche simple et opérationnelle qui peut directement être appliquée à l'aménagement du territoire.

Dans un souci de cohérence avec la définition des zones de risques naturelles et de contraintes géotechniques majeurs visés à l'article D.4 54 du Code de Développement Territorial (CoDT), nous proposerons en fin de travail une traduction des zones d'aléas définies sous forme de zones de contraintes géotechniques faible, modérée et majeure.

En guise de comparaison, il est important de noter que les zones de contraintes karstiques et d'inondation sont les seuls zonages réglementaires actuellement en vigueur en Wallonie.

2.3 Le Schéma de Développement du Territoire, fondement de la réflexion

Le Gouvernement wallon souhaite adopter un Schéma de Développement du Territoire pour préparer « *l'évolution souhaitée de la Wallonie et de ses territoires pour répondre aux aspirations de la population qui l'occupe en tenant compte des défis à moyen et à long terme auxquels elle sera confrontée. ... Il est l'outil situé au sommet de la hiérarchie des outils d'aménagement du territoire et d'urbanisme en Wallonie ... et à travers lequel les autorités régionales peuvent définir la stratégie qu'elles comptent mettre en œuvre pour traduire concrètement le projet qu'elles proposent sur le territoire. Celle-ci doit être exprimée à travers des objectifs, des principes de mise en œuvre et une structure territoriale* ».

Dans la continuité de la philosophie du Schéma de Développement de l'Espace Régional (SDER) de 1999 et du projet de SDER adopté provisoirement par le Gouvernement wallon en 2013, l'avant-projet de SDT, dans son état d'avancement du 26 octobre 2017, propose plusieurs objectifs, dont le PV.4 : « *réduire la vulnérabilité du territoire et de ses habitants aux risques naturels et technologiques et l'exposition aux nuisances anthropiques* ».

Cet objectif concerne la « *prise en compte des risques et des nuisances réellement constatés et avérés afin qu'ils soient gérés et intégrés dans la conception de l'aménagement du territoire pour éviter de geler des parties du territoire* ».

Parmi les principes de mise en œuvre, il propose « *de prendre en compte les risques liés au sol et au sous-sol lors de toute urbanisation là où cela se justifie* ».

Avec l'évaluation des aléas de mouvement de terrain, le présent travail est en mesure de répondre pleinement à ce principe par la production d'un outil opérationnel disponible à l'échelle du territoire, estimant l'intensité et l'extension géographique potentielle d'un danger redouté en surface et induit par les objets souterrains. Ces évaluations étant directement utilisables pour apprécier l'exposition du projet au danger.

2.4 Les grandes inspirations

Ce travail s'inspire largement de travaux et de réalisations existantes et en adapte les concepts à la problématique des objets du sous-sol de Wallonie.

2.4.1 Les contraintes karstiques

Depuis 1997, la Wallonie intègre la gestion des risques naturels dans sa politique d'aménagement du territoire et d'urbanisme en axant ses priorités sur la prévention. À ce propos, la DGO4 - Direction générale opérationnelle Aménagement du Territoire, Logement, Patrimoine et Energie, alors DGATLP - a commandité une série d'études pour définir des zones de contraintes autour des différents aléas, dont les contraintes karstiques.

Les zones de contraintes "aléas géologiques ou géomorphologiques", contrairement aux zones de consultation "exploitations souterraines", ont été définies sur base d'études scientifiques menées sous l'égide de la DGO4.

Ces études ont été initiées suite à l'inscription, en 1997, dans le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Énergie (CWATUPE), de plusieurs articles s'adressant spécifiquement aux risques naturels. Ainsi, l'article 136 du code, dans sa version de 2011, prévoit que : « L'exécution des actes et travaux peut être soit interdite, soit subordonnée à des conditions particulières de protection [...] lorsque les actes, travaux et permis [...] se rapportent à : 3° des biens immobiliers exposés à un risque naturel ou à une contrainte géotechnique majeurs tels que l'inondation [...], l'éboulement d'une paroi rocheuse, le glissement de terrain, le karst, les affaissements miniers ou le risque sismique ; ».

Les dispositions de l'art. 136 du CWATUPE sont reprises à l'art. D.IV.57.3° du CoDT.

Les cartographies résultant de ces études servent, dans le cadre de l'instruction des permis et actes liés à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme, à orienter les décisions ou à les conditionner.

Les zones de contraintes "aléas géologiques ou géomorphologiques" seront appelées à évoluer régulièrement en fonction des nouvelles données découvertes ou précisées ainsi qu'en fonction d'études ultérieures.

C'est dans ce cadre que l'Université de Liège (Laboratoire de Géomorphologie et de Télédétection), la Faculté Polytechnique de Mons (Service de Géologie Fondamentale et Appliquée) et la Commission wallonne d'Étude et de Protection des Sites souterrains (CWEPSS) ont été chargées, sur base du recensement effectué dans l'Atlas du Karst wallon, d'une bibliographie sélective et d'études de terrain, de définir des zones sur et à proximité des phénomènes karstiques, où la construction doit être subordonnée à des conditions particulières.

Cette étude s'est déroulée en plusieurs étapes :

- en 1995, une étude-pilote a été réalisée dans le vallon de Sprimont à Chanxhe ;
- en 1998, a été finalisée la cartographie des terrains en zones urbanisables aux plans de secteur ;
- en 2000, celle en liaison avec les carrières, les transports de fluides, les réseaux de transports publics et les sites karstiques d'intérêt scientifique et patrimonial ;
- en 2002, celle des terrains en zones agricoles ;
- en 2004, celle à proximité des phénomènes karstiques présents dans les craies du Pays de Herve ;
- en 2005, celle en liaison avec les stations d'épuration ou de pompage (PASH), les bassins d'orage, les réseaux d'égouttage et les éléments linéaires au plan de secteur.

Ces études ont permis de cartographier et de caractériser les sites karstiques et le karst surfacique repris à l'Atlas du Karst wallon.

Les phénomènes karstiques de l'Atlas sont représentés par un symbole couvrant une zone de 50 m de diamètre au sein de laquelle il est préconisé d'interdire la construction. Il en est de même au sein des périmètres reprenant l'emprise en surface des phénomènes (dépressions karstiques coalescentes, chantoirs avec une vaste dépression autour du point de perte, ...) qui ont des diamètres en surface supérieurs à 50 m.

Des périmètres de contraintes karstiques, à savoir des zones de contrainte modérée ou forte, ont été définies par la DGO4, sur bases d'études, en fonction de la nature du phénomène karstique (perte, doline, abri sous roche, ...), de la topographie (vallée sèche, plateau calcaire), de l'importance du phénomène (petite doline de tassement, vaste chantoir, ...), de

la densité de ceux-ci (cavité isolée ou champs de dolines) et du caractère évolutif du phénomène (apparition récente de pertes, activité hydrologique, ...).

- les zones de contrainte forte correspondent aux zones où toute construction doit être évitée, voire interdite, car les risques liés au karst y sont importants. Elles ont été définies lorsque la présence de plusieurs phénomènes karstiques très proches les uns des autres justifiait la coalescence de leurs aires de contrainte (les champs de dolines, ...), lorsque la formation de nouveaux phénomènes karstiques est très probable (un vallon sec sous lequel le soutirage et la dissolution liée à la circulation d'eau souterraine peuvent induire des effondrements, ...), lorsque les phénomènes karstiques sont actifs ou réactivés et que l'on peut prévoir la manière dont ils risquent d'évoluer (la tendance naturelle au recul des chantoirs vers l'amont, jusqu'à la limite entre les calcaires et la roche imperméable, le "rejeu" et l'approfondissement de certaines dolines, ...) ou lorsqu'une cavité présente des risques d'effondrement du toit, etc.;
- les zones de contrainte modérée correspondent aux zones où des risques inférieurs à ceux situés dans les zones de contrainte forte sont estimés. La dimension, la densité et l'activité des phénomènes karstiques y sont plus faibles. De telles zones ont également été définies autour de zones de contrainte forte afin de constituer un périmètre de sécurité (principe de précaution). Les demandes de permis ne doivent pas y être systématiquement refusées, mais faire l'objet d'investigations complémentaires (études géotechniques et géophysiques, ...) en vue de vérifier et de garantir la stabilité du sol et des fondations.

Dans le cas particulier du Tournaisis, les effondrements sont liés le plus souvent aux pompages des eaux des nappes souterraines. L'analyse combinée de la densité d'effondrements et du dénoyage des calcaires permet d'obtenir un bon indicateur spatial et temporel du risque d'effondrement. Trois zones de contrainte ont été définies :

- une zone de contrainte forte où la densité d'effondrements est supérieure à 15 unités/km² ;
- une zone de contrainte modérée où la densité d'effondrements est comprise entre 1 et 15 unités/km², ou bien où le dénoyage du socle calcaire est supérieur à 10 m ;
- une zone de contrainte faible où la densité d'effondrements est inférieure à 1 unité/km², ou bien où le dénoyage est supérieur à 5 m. Cette zone n'a pas d'équivalent dans le reste de la Wallonie et a été introduite pour tenir compte de l'approximation des différents modèles et du caractère évolutif de la surface piézométrique.

Enfin, les roches calcaires peuvent être altérées par les eaux météoritiques ou souterraines, le risque n'y est jamais nul. C'est la raison pour laquelle, la présence de formations carbonatées affleurantes est aussi reprise dans l'application "Thématiques sous-sol" pour attirer l'attention des gestionnaires du territoire sur la particularité de ce type de sous-sol.

2.4.2 La cartographie d'aléa d'inondation

Ce paragraphe reproduit sélectivement les informations disponibles sur le portail « Inondations » de la Wallonie, y compris la notice méthodologique d'élaboration des cartographies des zones soumises à l'aléa d'inondation et du risque de dommages dus aux inondations, version du 26/02/2016.

A. Contexte

Les inondations sont parmi les phénomènes naturels capables de frapper très durement les populations et les territoires de Wallonie, avec une certaine récurrence.

La thématique des inondations est complexe pour trois raisons principales :

- la difficulté de prédire ce type d'événements,

- le processus de genèse,
- le grand nombre d'enjeux impactés.

Pour lutter de manière optimale contre les inondations, le Gouvernement wallon adopte en 2003 le Plan PLUIES, le plan global de Prévention et de Lutte contre les Inondations et leurs Effets sur les Sinistrés, couvrant l'ensemble des enjeux concernés : aménagement du territoire, ralentissement du ruissellement, couverture des sols en interculture, entretien des berges ...

En 2007, la Directive européenne 2007/60/CE, dite « Directive Inondations (DI) » impose aux Etats membres trois phases de travail en vue d'appréhender encore mieux les risques d'inondation :

- l'évaluation préliminaire des risques d'inondation,
- les cartographies des zones inondables et des risques d'inondation,
- les plans de gestion des risques d'inondation (PGRI).

Cette directive est transposée en droit wallon dans le Code de l'Eau (articles D53.1 à D53.11) et les cartographies de référence sont approuvées par le Gouvernement wallon en décembre 2013.

Depuis le 01/06/2017 et son entrée en vigueur, le Code de Développement Territorial (CoDT) comporte plusieurs articles visant la prévention et de la lutte contre les risques d'inondation.

B. Les cartographies relatives aux inondations

Il existe 3 cartographies relatives aux inondations en Wallonie, dont les dernières versions ont été approuvées par le Gouvernement wallon en 2016 :

1) La cartographie de l'aléa d'inondation

Carte de référence en Wallonie, elle constitue un outil permettant aux autorités de prendre en compte la composante « risque d'inondation » lors de la remise d'avis ou la délivrance de permis d'urbanisme.

2) La cartographie des zones inondables

Elle représente le caractère inondable du sol wallon pour une probabilité donnée. Quatre scénarii de probabilités différentes sont envisagés à partir de quatre périodes de retour : 25, 50, 100 ans et extrême.

Pour chaque scénario, la carte des zones inondables donne la valeur de profondeur de submersion (débordement) selon 4 classes de hauteur d'eau (de 0 à 30 cm, de 30 à 130 cm, plus de 30 cm, indéterminée) et la valeur de débit de pointe (ruissellement) selon 3 classes : faible, moyen, élevé.

Alors que l'on compte quatre cartographies des zones inondables, l'aléa d'inondations intègre ces quatre scénarii en une seule cartographie.

3) La cartographie des risques d'inondation

Elle caractérise chacun des quatre scénarii de zones inondables par la présence ou non d'enjeux sensibles aux inondations.

Pour chaque scénario, la carte des risques d'inondation présente l'emprise des zones inondables propre à ce scénario ainsi que les récepteurs de risques (ou enjeux) identifiés au sein de cette emprise. Ces enjeux sont d'ordre humain, économique, environnemental et/ou patrimonial.

Les deux derniers types de cartographies sont effectivement imposés par la Directive Inondations.

C. L'aléa d'inondation

La valeur de l'aléa d'inondation résulte de la combinaison de deux facteurs :

- la récurrence (période de retour ou occurrence) de l'inondation ou de la pluie à l'origine du ruissellement,
- son importance (profondeur de submersion ou débit de pointe). Cette valeur peut être très faible, faible, moyenne ou élevée, et n'est aucunement influencée par l'affectation ou l'occupation du sol.

La grille de détermination de l'aléa d'inondation par débordement est illustrée à la Figure 2.

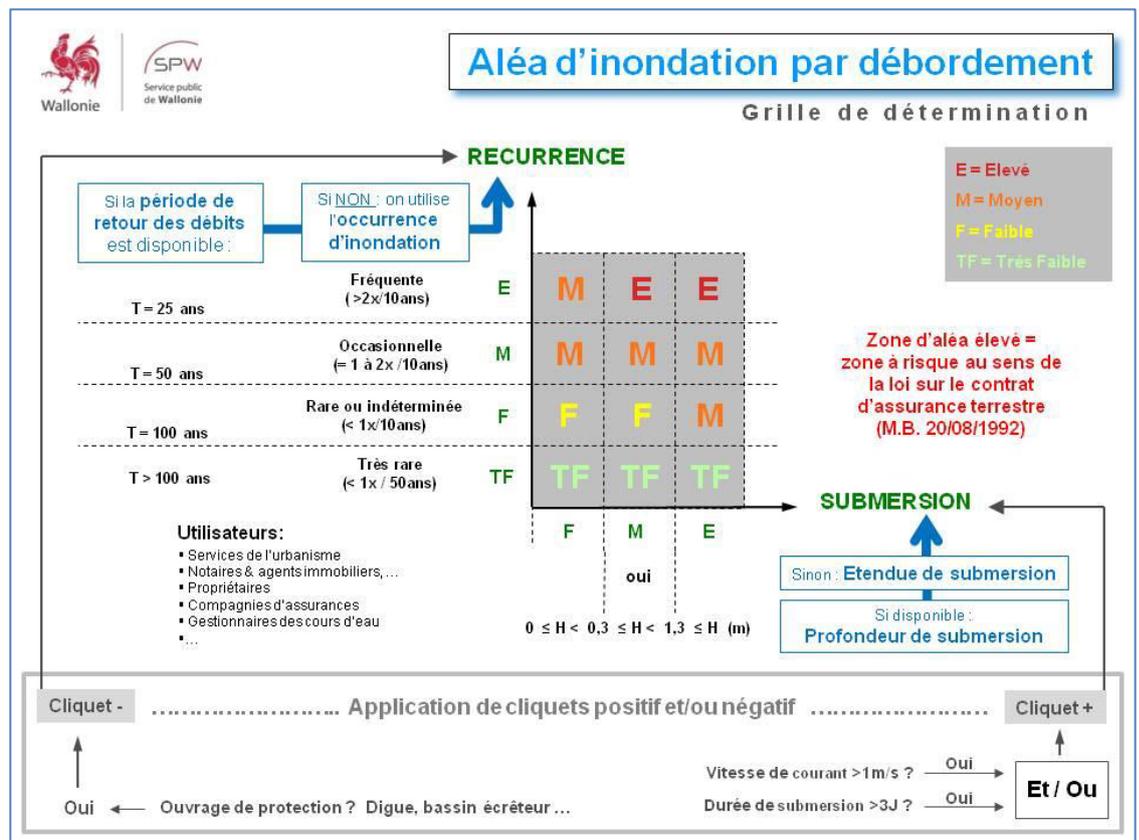


Figure 2 – Grille de détermination de l'aléa d'inondation par débordement (Source : Notice méthodologique d'élaboration des cartographies des zones soumises à l'aléa d'inondation, version du 26/02/2016)

2.4.3 Les plans français de prévention des risques naturels et miniers

La France a développé des plans de prévention pour gérer les risques naturels, accidentels et miniers dès les années 1990. Le Gouvernement français a mandaté le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) pour la mise au point d'une méthode d'évaluation des risques basée sur des outils techniques (détermination de zones d'aléas et des enjeux), et réglementaires (urbanisme et aménagement du territoire).

Dès le début des années 2000, ont été ainsi créés les plans de prévention des risques naturels (PPRN) liés aux cavités abandonnées et aux risques miniers (PPRM), suivis de leurs mises à jour. Les zones d'aléas sont déterminées sur base purement qualitative et dans le contexte d'un état de connaissance donné. L'Etat français a voulu privilégier l'efficacité, la rapidité, les économies et la mise en commun des ressources et données disponibles.

Les guides méthodologiques d'élaboration des plans de prévention des risques naturels et miniers sont la base de la démarche utilisée dans ce travail et ont été adaptés aux cas wallons.

Pendant, il est important de relever une différence importante dans la portée des cartographies d'aléas en France et en Wallonie. Les PPRM français, y compris les zonages en aléas, sont réalisés à l'échelle du territoire d'une voire plusieurs communes. Pour la Wallonie, les cartographies d'aléas seront dressées pour tout le territoire régional et seront utilisées comme un « Plan de secteur » de l'état de la menace de mouvement de terrain causé par des objets souterrains.

De plus, le retour d'expérience sur plus de 15 ans permet d'évaluer la pertinence des choix à prendre au cours de ce type d'étude. L'ISSeP et le Service géologique de Wallonie (SGW) sont en collaboration étroite avec les experts de l'INERIS et du CEREMA (Centre français d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), pour maximiser l'expérience française au profit de l'avancement de la démarche wallonne.

2.4.4 Le Décret wallon du 5 décembre 2008 relatif à la gestion et la protection des sols

Il institue notamment la Base de Données d'Etat des Sols de Wallonie (BDES) qui doit reprendre les parcelles susceptibles d'héberger une contamination. Un document, le Certificat du contrôle du sol, atteste l'état de la parcelle sur cet aspect et fournit la liste des dispositions légales et des pièces de dossier que le demandeur doit réunir pour sa démarche administrative.

Ce document a inspiré, au Service géologique de Wallonie, un outil équivalent pour inventorier les menaces issues du sous-sol, quel que soit le type d'objet responsable.

La Fiche d'Informations Sous-sol (FISs) vise à informer objectivement et préventivement le public des menaces du sous-sol encourues sur un secteur donné. La cartographie des zones d'aléas doit alimenter le contenu de la FISs en ciblant les secteurs vulnérables et participer à sa lisibilité par le public. Cela doit permettre au demandeur de constituer son dossier adéquatement (cf. les zones de contrainte karstique de la DGO4).

Actuellement, la FISs informe de la présence d'objets souterrains ou d'un contexte géologique pouvant induire des contraintes techniques et administratives à l'occasion de l'utilisation d'un périmètre. Le souhait du SGW était de pouvoir présenter d'abord un état de la menace au travers d'une cartographie synthétique mettant en avant la menace d'un effet d'une intensité donnée, au travers d'une cartographie des aléas de mouvement de terrain associé à cet objet. Pour rejoindre la démarche déjà en œuvre pour le karst à la DGO4 depuis 1996, cette cartographie serait traduite en zones de contraintes géotechniques faibles, modérées ou majeure de manière à faire directement écho aux prescriptions réglementaires du CoDT.

3 DÉMARCHE POURSUIVIE

3.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce travail est d'établir, à l'échelle de la Wallonie, une cartographie des zones d'aléas engendrés par les objets souterrains d'origine naturelle ou anthropique, pouvant générer des mouvements de la surface du sol (tassements, affaissements ou effondrements), et induire des dommages ou des nuisances pour les personnes, les biens et les infrastructures.

La démarche suivie a prioritairement ciblé les aléas engendrés par les objets anthropiques gérés directement par la DGO3, par respect de ses prérogatives propres, des budgets disponibles et des délais fixés. Les objets souterrains considérés sont les puits et galeries superficielles de mines, les carrières souterraines, les minières ayant exploités les gites de fer.

Les zones d'aléas sont classées qualitativement selon l'ordre de grandeur des déformations et nuisances générées.

La démarche vise à caractériser la menace induite par les objets souterrains en prenant en considération les caractéristiques :

- des objets considérés afin d'évaluer leur faculté et leur propension à entraîner une déformation de la surface ;
- des contextes géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques environnant ces objets afin d'évaluer la susceptibilité des terrains sus-jacents, et en particulier les plus superficiels, à modérer ou amplifier les dimensions de la déformation en surface.

Cette cartographie poursuit les objectifs suivants :

- classer qualitativement les objets à risques considérés selon leur degré de dangerosité et d'impact, sur une même échelle relative et concordante ;
- identifier les différents types de désordre (ou effets) éventuellement générés en surface par les objets souterrains considérés et l'extension respective des zones de danger ;
- permettre aux acteurs concernés (administrations, citoyens, experts, non-experts...) d'appréhender la menace du sous-sol de manière générale et transversale, à partir des désordres/effets éventuels et non plus à partir des objets comme actuellement ;
- mieux orienter la prise de mesures préventives ou protectrices afin de protéger les personnes en toutes circonstances, de concevoir adéquatement les nouveaux projets immobiliers et de conserver les installations existantes ;
- informer le public des dangers potentiels affectant les personnes et les biens immobiliers dans la zone d'emprise des objets souterrains considérés notamment via la Fiche d'Informations Sous-sol ;

3.2 Conditions préalables

Dès le départ de la mission, quatre conditions ont prévalu dans l'élaboration de la méthodologie :

- considérer l'ensemble des objets souterrains, dans un souci de cohérence, à la fois pour la compréhension par le citoyen et les décideurs, mais aussi pour comparer les situations entre elles et pouvoir les hiérarchiser ;
- travailler directement à l'échelle du territoire wallon, et non par zones-pilotes, de manière à obtenir rapidement un résultat utilisable et surtout cohérent pour tous ;

- utiliser au maximum les données existantes ou faciles à extraire de leur sources pour un premier résultat, à savoir les données cartographiques existantes, les descriptions des objets disponibles dans la bibliographie et les rapports administratifs, les descriptions des mécanismes de ruine, observations de terrain, les données relatives aux effondrements tirées de la Cellule d'Avic et de Conseils Effondrements du Service public de Wallonie (CACEff), les archives des cartes géologiques de Belgique et de Wallonie,...) ;
- fournir des sous-produits intermédiaires valorisables par eux-mêmes à savoir :
 - une mise à jour de la carte des carrières souterraines ;
 - une proto-cartographie des terrains superficiels,
 - une carte d'affleurement du socle,
 - une base de données "sondages superficiels",
 - une carte des affleurements de veines de houille,
 - une mise à jour de la cartographie des zones d'anciens puits ;
 - une mise à jour de la cartographie des zones de formations carbonatées (calcaires paléozoïques, craies du Bassin de Mons, craie et conglomérat à silex de Hesbaye).

Ces sous-produits sont utilisables soit pour l'évaluation des risques, soit pour la carte géologique, la carte géotechnique ou les thématiques sous-sols.

3.3 Limites d'usage

Ce travail se place pleinement et uniquement dans l'action préventive que mène le Service public de Wallonie en matière de gestion des risques liés au sous-sol. A ce titre, quelques limites d'usage sont d'application :

- l'objectif principal se limite à établir une caractérisation technique de la menace tandis que la gestion administrative de celle-ci reste la prérogative exclusive des services compétents du Service public de Wallonie et des législations en vigueur.
- la cartographie des zones d'aléas doit être considérée comme une information, issue de traitements de données existantes et des hypothèses proposées dans la présente étude, tel un outil complémentaire pour les acteurs concernés. Il ne s'agit pas d'une synthèse décisionnelle qui dispense d'un examen propre à chaque projet. En toutes circonstances, tout acteur de la gestion des risques du sous-sol conserve la possibilité de (re)préciser localement l'aléa en fonction de ses propres investigations et/ou interprétations.
- la cartographie est établie selon un état de connaissances donné à un moment donné et n'a aucun objectif d'exhaustivité. Des mises à jour ultérieures et des compléments de données permettront régulièrement de faire coïncider au mieux la carte avec la réalité.
- il s'agit d'un travail destiné à qualifier techniquement les désordres survenant à la surface et permettant de les hiérarchiser. Cependant, une traduction en cartographie de contraintes géotechniques est suggérée en fin de rapport comportant des seuils de coupure en trois classes. Cependant, ces seuils peuvent être évidemment adaptés en fonction de la gestion administrative envisagée.

4 LES MOUVEMENTS DE TERRAIN CAUSÉS PAR LES OBJETS SOUTERRAINS

Ce chapitre est une brève synthèse réalisée à partir des éléments bibliographiques et des retours d'expérience. Plus de détails sont disponibles dans les documents référencés en bibliographie.

4.1 Origines

Les mouvements de terrain provoqués par les objets souterrains trouvent toujours leur origine dans l'existence d'un volume souterrain, totalement ou partiellement vide. Celui-ci peut être d'origine naturelle (phénomène karstique,...) ou anthropique (exploitation souterraine, ouvrage civil, hydraulique ou militaire). Les propriétés des terrains disparus ou extraits et celles du massif encaissant vont grandement influencer la nature et l'ampleur des désordres redoutés en surface. Dans le cas d'une exploitation souterraine, la méthode d'exploitation utilisée sera un facteur d'influence très important, car elle fixera le traitement des vides et leurs géométries.

On distingue deux grands types d'objets :

- ceux dont les cavités sont remplies ou remblayées,
- ceux dont les cavités sont ou restent vides.

Le premier groupe pose assez peu de problème vu l'immobilisation et l'équilibre mécanique des matériaux. Il reprend des objets comme certaines cavités karstiques fermées et toutes les exploitations souterraines qui traitent les vides par remblayage ou foudroyage. On peut aussi y associer les exploitations de surface, du type « carrières à ciel ouvert », remblayées et les affaissements ou effondrements remblayés.

Après les affaissements contemporains du traitement ou de la disparition des vides, le tassement est souvent le seul effet résiduel redouté en surface pour ce groupe.

Le deuxième groupe est responsable de désordres de surface plus important et plus fréquent. Le maintien d'une ou plusieurs cavités vides est l'origine d'instabilités géomécaniques qui mènent plus ou moins rapidement à la rupture de la cavité et aux effets générés en surface. On y retrouve les cavités karstiques ouvertes (grottes) et les méthodes d'exploitation souterraine avec maintien de vides : galeries, chambres et piliers abandonnés, chambres vides. Il faut noter que ces vides ont été initialement dimensionnés soit pour rester en bon état juste le temps de l'exploitation, soit pour assurer un compromis entre taux de récupération du matériau extrait et maintien en état de la surface, à une époque où seules des règles empiriques étaient appliquées : c'est pourquoi leur stabilité à très long terme doit toujours être « sujette à caution » car la stabilité dépendra de l'évolution des propriétés des matériaux en fonction des sollicitations essentiellement climatiques.

4.2 Les effets (ou désordres) redoutés en surface

La méthodologie s'attèle à appréhender le danger engendré par les objets souterrains, via la qualification des effets que sont les différents types de mouvement que peut subir la surface du sol. Ces mouvements de la surface du sol, ou mouvements de terrain, sont les conséquences visibles et redoutées de phénomènes et/ou mécanismes géomécaniques auxquels les enjeux (personnes, biens, bâtiments, infrastructures...) sont potentiellement exposés en cas de danger. Ces mouvements sont liés :

- à la ruine de volumes souterrains, totalement ou partiellement vides,
- à la déstabilisation des massifs,
- aux déplacements de matériaux (par glissement, chute ou déversement) qui peuvent en résulter.

Ils se caractérisent chacun localement par :

- une intensité d'effet (par exemple le diamètre d'un effondrement),
- une extension géographique dans laquelle le mouvement de terrain est potentiellement attendu (par exemple une parcelle cadastrale exploitée ou la zone d'imprécision autour de la position d'un puits non visible).

Cette partie est un bref résumé des descriptions fournies dans la bibliographie.

4.2.1 Le tassement

Il s'agit d'un mouvement vertical de la surface du sol, de très faible ampleur (de quelques centimètres à un décimètre) et d'extension plus ou moins importante.

Il est dû à la compaction de couches géologiques, de poches de matériaux meubles naturels ou de matériaux de remblais assez poreux, sous l'effet de leur propre poids, d'une surcharge extérieure ou d'une diminution de la saturation en eau (baisse de niveau d'une nappe d'eau souterraine, longue période d'absence de précipitations).

Le tassement provoqué par des objets souterrains peut notamment se manifester suite à :

- l'exploitation d'une couche souterraine mince au sein d'un massif au comportement fluant ;
- le tassement de matériaux de remblais, utilisés pour remplir les vides souterrains, les voies d'accès (puits, galeries,...), les anciens cratères d'effondrement... ;
- un foudroyage ou une remontée de fontis qui n'a pas (encore) provoqué de mouvements notables en surface.

Ce type de tassement peut aussi être confondu avec les tassements naturels des terrains superficiels à tendances argileuse et/ou tourbeuse.

L'effet principalement redouté pour les enjeux exposés est le tassement différentiel, c'est-à-dire un tassement de grandeur inégale sur une superficie donnée, qui peut affecter les bâtiments, habitations et infrastructures.

4.2.2 Le gonflement

C'est le phénomène inverse de celui du tassement, en général dû une augmentation du degré de saturation en eau des terrains superficiels argileux et/ou tourbeux.

Vu ses causes plus naturelles, cet effet ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail.

4.2.3 L'affaissement progressif

Il s'agit d'un mouvement de terrain se marquant par une lente descente verticale de l'altitude du sol formant alors une cuvette d'affaissement, telle une dépression dans le paysage, plus ou moins étendue, aux bords souples et relevés (par exemple, les dolines et pseudo-dolines).

Ce mouvement est la conséquence de l'exploitation ou de la disparition assez étendue d'une couche géologique ou d'un gisement ; du foudroyage de l'espace resté temporairement vide, de la vidange partielle d'une poche karstique et du réarrangement consécutif des terrains géologiques surmontant cet espace foudroyé jusqu'en surface.

Cependant, ce réarrangement ne se manifestera pas toujours jusqu'à la surface en raison du phénomène de foisonnement. Il s'agit de la dilatation volumique que subit un volume de terrains éboulés par modification de la granulométrie de ses blocs et donc augmentation de sa porosité. Un coefficient permet d'estimer cette augmentation de volume pour la plupart des matériaux géologiques.

Ce mouvement se manifeste au droit de l'espace laissé libre en profondeur, augmenté d'une zone d'influence périphérique qui dépend de la profondeur de la cavité initiale et des propriétés physiques et géomécaniques des terrains la surmontant. La profondeur de cette cuvette est relativement faible par rapport à son extension géographique.

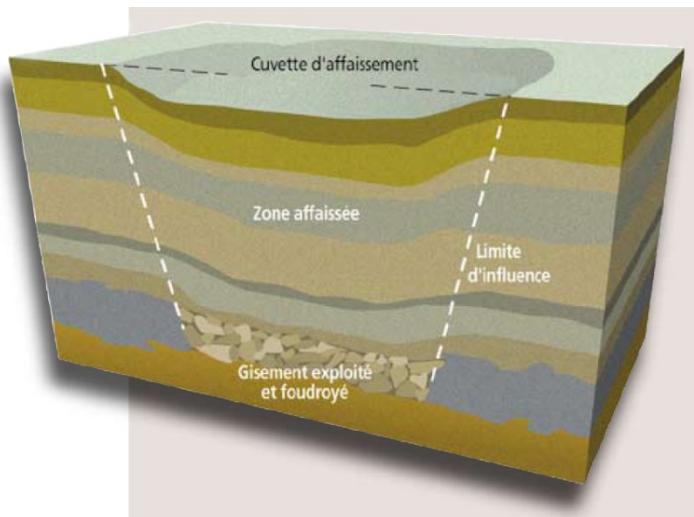


Figure 3 – Illustration du phénomène d'affaissement provoqué par l'extraction d'une couche géologique ou d'un gisement (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).

Cela concerne principalement les exploitations de gisements sédimentaires (charbon, craies, phosphates,...) et filoniens (métaux, minières,...). Les affaissements les plus importants connus en Wallonie, sont ceux résultants des extractions charbonnières et métalliques, dont le développement, qui suivait celui des travaux souterrains, a engendré les effets bien connus en surface, communément qualifiés de « dégâts miniers ».

D'après les experts, les retours d'expérience et la jurisprudence des tribunaux, il est communément admis que les affaissements, provoqués par les exploitations houillères par longue taille foudroyée ou remblayée, sont stabilisés 10 à 15 ans après l'arrêt des chantiers d'exploitation. En Wallonie, les derniers sièges ont cessé leur activité en septembre 1984 : cela signifie une stabilisation des affaissements miniers depuis la fin des années 1990 et on peut considérer que ces affaissements ont cessé d'évoluer. Cette hypothèse est aussi respectée pour les exploitations métalliques du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle.

Dans ces conditions, les affaissements générés par ces exploitations minières antérieures ne seront donc pas considérés dans le cadre de ce travail.

Les phénomènes karstiques peuvent aussi provoquer des affaissements de grande ampleur par altération du socle calcaire situé en profondeur. La caractérisation de ces affaissements sort du cadre actuel de ce travail, mais la méthodologie présentée se veut applicable à cette situation.

À la différence du tassement, le mouvement vertical de l'affaissement n'est pas toujours l'effet le plus redouté car, quand il se produit sur des importantes étendues, il ne crée pas de mouvement relatif préjudiciable aux bâtiments et infrastructures.

Cependant, le mouvement vertical du sol peut engendrer des inondations liées aux eaux souterraines et/ou de surface, mais sa caractérisation sort totalement du cadre strict de ce travail.

Par contre, les zones périphériques correspondant aux bords pentus de la cuvette d'affaissement sont potentiellement très dangereuses pour les bâtiments et les infrastructures. En effet, la surface du sol de ces zones peut subir des mouvements horizontaux, des flexions et des mises en pente, dont l'ampleur est proportionnelle à l'affaissement maximum au centre de la cuvette et inversement proportionnelle à la profondeur des exploitations.

Les effets des affaissements se produisent bien au-delà de la zone géographique située au strict l'aplomb des niveaux souterrains exploités. La cuvette d'affaissement va se développer bien au-delà de cette zone. L'angle d'influence est l'angle formé entre la droite verticale et la droite joignant la limite de la cuvette d'affaissement et la limite des travaux souterrains. Il correspond à l'angle ζ de la Figure 4 ci-dessus.

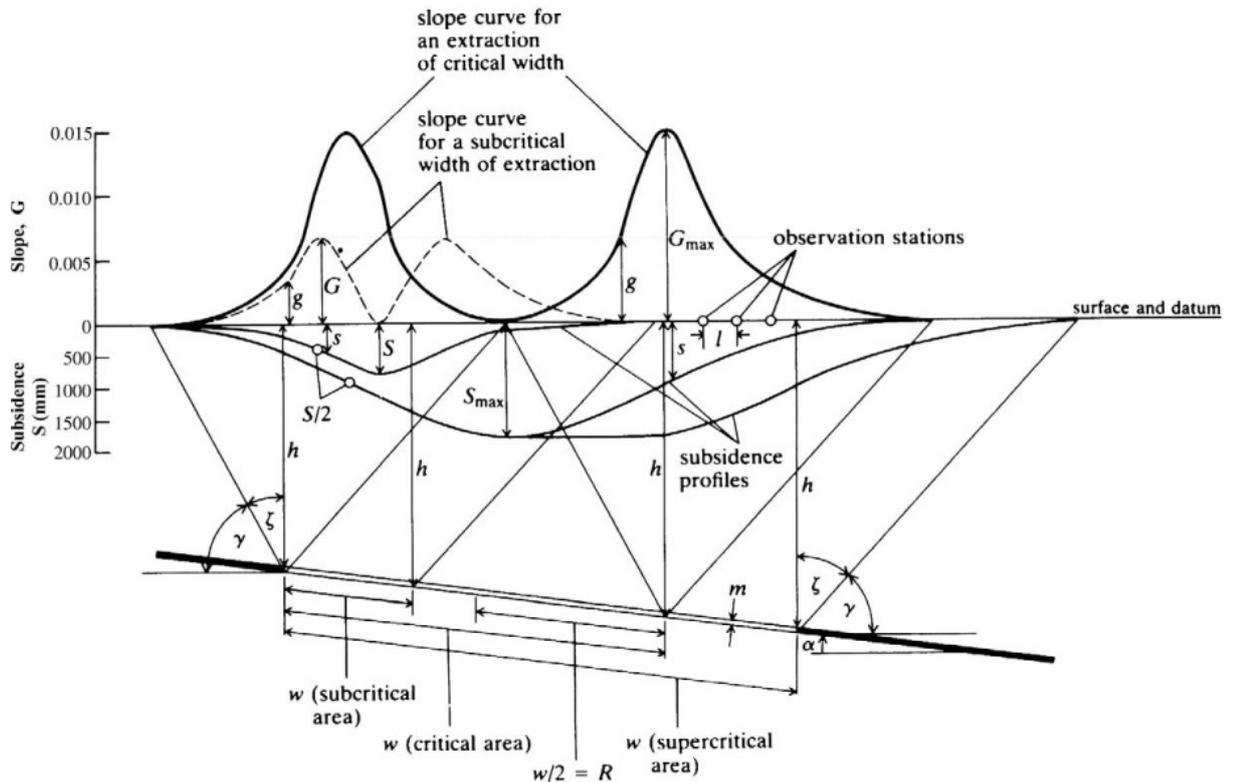


Figure 4 – Modèle conceptuel de l'affaissement progressif provoqué par l'exploitation d'une couche sub-horizontale, proposé par le National Coal Board en 1975 (Brady & Brown, 2006).

Cet angle dépend de la nature et de l'épaisseur des terrains de recouvrement. En pratique, il est généralement compris entre 25 et 40° pour des zones souterraines exploitées à l'horizontale dans un massif homogène. Le pendage des couches géologiques et la présence d'éléments tectoniques (failles, diaclases, plis) en modifient sensiblement ces valeurs.

4.2.4 L'effondrement localisé

Il s'agit d'un mouvement de terrain prenant la forme d'un cratère, plus ou moins ouvert, d'un diamètre de un à plusieurs mètres, dont l'apparition est très soudaine.

À la différence de l'affaissement, l'effondrement se manifeste strictement à l'aplomb d'une cavité naturelle ou anthropique laissée vide.

La profondeur du cratère dépend de la profondeur et du volume des « cavités initialement vides » qui sont à l'origine de l'effondrement ; et des propriétés physiques et géomécaniques des terrains surmontant ces « cavités ». Selon les conditions, la profondeur peut aller de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

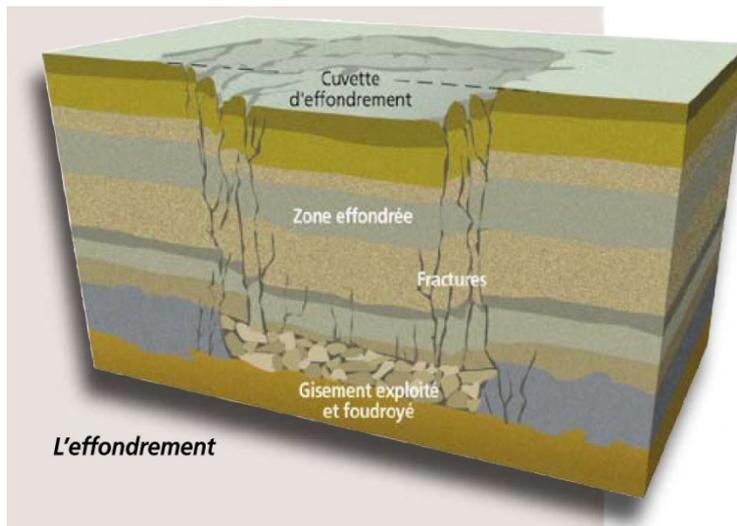


Figure 5 – Illustration du phénomène d'effondrement provoqué par l'extraction d'une couche géologique ou d'un gisement (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).

Vu la cinétique rapide de l'effondrement, les matériaux impactés se cisailent et se rompent d'un coup afin de combler le vide créé. Les parois d'un effondrement sont donc souvent très raides lorsque le cratère initial se crée à la surface. La nature des terrains meubles superficiels et l'exposition aux conditions climatiques peut amener les parois du cratère à s'écrouler à leur tour dans un deuxième temps. Le cratère initial s'élargit alors avec une pente de paroi conforme à l'angle de talus naturel du matériau encaissant.

Le mécanisme le plus connu pour initier un effondrement est le phénomène du fontis. Il trouve son origine dans l'existence d'une cavité souterraine, vide et d'origine naturelle ou anthropique. La configuration géométrique (taille de la cavité, hauteur, volume...) et la profondeur de la cavité va influencer la stabilité de son toit. Si celui-ci commence à se rompre, les matériaux le constituant s'éboulent et commencent à remplir la cavité. Si la cavité est partiellement remplie, le toit va continuer à se rompre et les matériaux situés à un niveau supérieur vont à leur tour remplir la cavité résiduelle. Ce phénomène peut se répéter un grand nombre de fois avant d'atteindre éventuellement la surface. Il donne l'impression que la cavité résiduelle « remonte vers la surface » et illustre bien la cinématique de ce type d'effondrement : c'est pourquoi on parle de remontée de fontis.

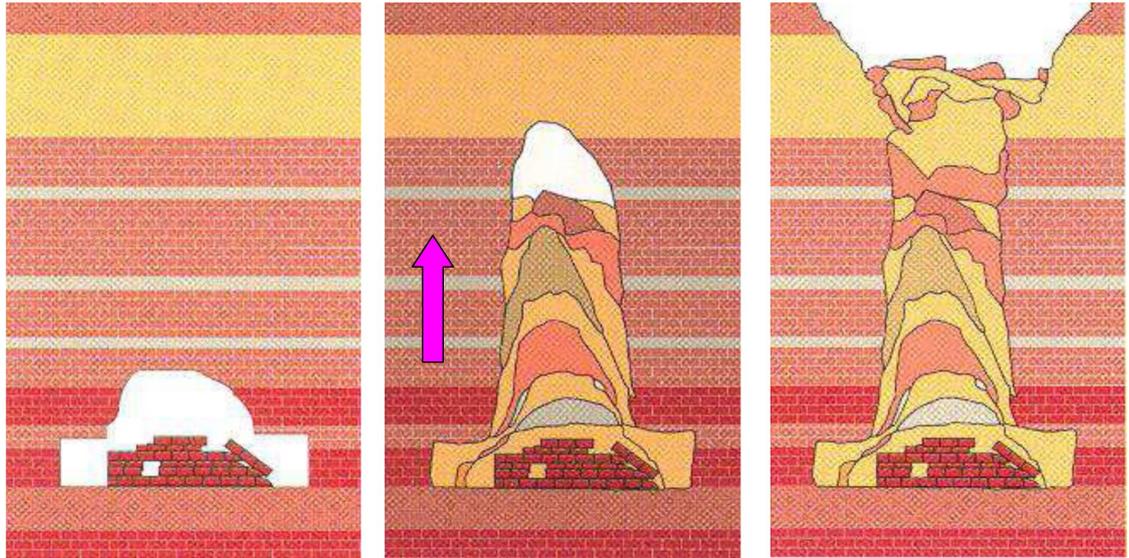


Figure 6 – Principales étapes de l'évolution d'un fontis et de sa remontée vers la surface (Source INERIS, Didier et al, 2010).

Cependant, le foisonnement intervient pour les matériaux éboulés, qui vont peu à peu réduire le volume de la cavité résiduelle, et même complètement le combler sous certaines conditions. Dans ce cas, la disparition de ce vide empêche tout mouvement de matière, ramène tous les matériaux à l'équilibre et annule la cinétique de la remontée du fontis. On parle alors « d'auto-comblement ». C'est pour cette raison que tous les fontis initiés en en-deçà d'une certaine profondeur n'atteignent pas la surface.

Dans certaines configurations, la remontée de fontis empruntera des chemins préférentiels dans le massif considérés comme faibles d'un point de vue géomécanique. Il s'agit de zones faillées, fracturées, altérées (poches et cheminées karstiques) voire excavées comme le conduit d'un puits remblayé.

Cette catégorie reprend aussi les effondrements :

- des têtes de puits causés par le débouillage de leur remblai,
- des têtes des exploitations filoniennes ou exploitées en dressant.

L'effondrement localisé est l'effet le plus rencontré et le plus redouté en Wallonie car il concerne tous les types de cavités et pratiquement tout le territoire régional : karst, carrières souterraines (dont les carrières de craie phosphatée, de silex et les marnières), puits, galeries, minières,... De plus, l'étude de ce type d'effet est très représentative de la complexité des mécanismes et des paramètres concernés par la qualification des mouvements de terrain.

C'est pourquoi il sera prioritairement étudié dans le cadre de ce travail.

4.2.5 L'effondrement généralisé

D'après les guides de l'INERIS, il s'agit de la rupture, très rapide voire quasi-instantanée, de tout ou partie d'une exploitation, affectant la stabilité des terrains de surface. La zone effondrée peut descendre de plusieurs mètres et atteindre une extension de plusieurs hectares.

On le redoute à l'aplomb des secteurs des exploitations en chambres et piliers abandonnés présentant des piliers sous-dimensionnés, par rapport à l'épaisseur de terrain de recouvrement, et des exploitations en grandes chambres sans soutènement. Ce sous-

dimensionnement est dû soit à la conception de ces piliers, soit à l'évolution de ces derniers dans le temps (écaillage),

En Belgique, quelques rares cas de d'effondrement généralisé sont connus :

- deux secteurs, d'environ un hectare, effondrés à l'aplomb des anciennes carrières souterraines de craie phosphatée de la Malogne à Cuesmes (Mons) en 1934 et 2015 (voir Figure 8) ;
- l'effondrement d'un secteur de 4 hectares de la carrière souterraine de tuffeau crétacé à Zichen-Zussen-Bolder (Riemst), survenu en 1958 ;
- l'effondrement en 1963 d'un secteur d'une carrière souterraine de marbre noir, alors en activité, à Rhisnes (Namur), sur un demi-hectare ;
- l'effondrement d'un secteur d'un hectare dans l'ardoisière Ste-Barbe, alors en activité, à Warmifontaine (Neufchâteau) en 1912.

L'effondrement généralisé se distingue fondamentalement de l'effondrement localisé par :

- l'importance de la superficie horizontale par rapport à la profondeur des vides ;
- l'existence de ruptures en chaîne provoquant les mouvements de la masse de terrain ;
- la différence dans les mécanismes de ruine des vides (échelle locale et échelle globale) ;
- la libération brutale de l'énergie stockée dans le massif ;
- la différence dans la cinétique de propagation de la déformation du massif (progressivement pour l'effondrement localisé, et en bloc pour l'effondrement généralisé).

L'effet en surface est une descente très rapide du niveau du sol à l'aplomb de la zone effondrée.

Les bords de cette zone sont bien tranchés, en forme de « marche d'escalier », car la rupture des matériaux s'est uniquement produite par cisaillement (Figure 8). Des fractures ouvertes y sont relevées.



Figure 7 – Photographie aérienne de l'effondrement généralisé survenu le 22 avril 2015 à Cuesmes (Mons) par la Police fédérale (Source : Rapport CACEff – Cellule d'Avis et de Conseils Effondrements du Service public de Wallonie).



Figure 8 – Photographie d'un bord de la zone effondrée le 22 avril 2015 à Cuesmes (Mons) en forme de « marche d'escalier ».

4.3 Relation entre objets souterrains et effets redoutés en surface

Les phénomènes souterrains à l'origine des désordres de surface sont variés mais peuvent être regroupés en quelques ensembles :

- instabilité dynamique (collapse ou éboulement de voûte) de vides souterrains francs provoquant une remontée plus ou moins rapide du vide vers la surface (ex. : remontée de fontis; limite d'effet : 30 à 50 m de profondeur pour des chambres et galeries plurimétriques ; jusqu'à plusieurs centaines de mètres pour des puits naturels) ;
- comblement progressif d'un vide étendu (chantier d'exploitation, dissolution d'une couche d'évaporites) par rupture de toit et descente des bancs sus-jacents ;
- tassement au sein d'une ou plusieurs couches sous sa propre masse et suite à une variation d'un niveau de fluide (eau, gaz, ..) ou suite à la compaction de terrains déconsolidés ;
- descente de remblais ou de terrains par soutirage (remblai de puits, de galerie ou de chantier en dressant).

On constate que des effets très similaires sont générés en surface par des objets souterrains différents qui répondent aux mêmes typologies et/ou aux mêmes mécanismes de rupture. Ce qui permet plusieurs regroupements d'objets sur base de ces critères.

Le Tableau 1 ci-dessous, adapté du guide méthodologique de l'INERIS, illustre les relations existant entre les objets souterrains connus en Wallonie et les mouvements de terrain potentiels redoutés qu'ils peuvent provoquer en surface.

Tableau 1 : Appariement entre les objets souterrains considérés en Wallonie et les types de mouvements de terrain redoutés, potentiellement produits en surface (tableau adapté de *INERIS, 2006*).

Objet souterrain	Tassement	Affaissement	Effondrement localisé	Effondrement généralisé
Exploitation totale profonde (houille, oligiste, manganèse)		x		
Cavités à faible profondeur – 30-50 m (Karst, carrières souterraines, galeries ...)	x	x	x	x
Gîtes métalliques proches de la surface (filon + remblais imparfaits)	x	x	x	
Ouvrages débouchant au jour (puits, galerie,...)	x	x	x	
Poches karstiques, « fantômes », ...	x	x	x	x
Formations géologiques particulières (retrait-gonflement)	x	x		

Les effets d'affaissement, d'effondrement localisé et d'effondrement généralisé sont à mettre directement en lien avec la ruine des objets souterrains, alors que le tassement est un effet secondaire consécutif à un de ces trois mouvements de terrain.

Selon les phénomènes et mécanismes mis en jeu, la qualification de l'aléa de mouvement de terrain, qu'un objet souterrain peut provoquer en un endroit donné de la surface, se décline donc en, au plus, quatre types d'aléa, chacun défini pour un type de mouvement de terrain présenté dans le Tableau 1 : tassement, affaissement, effondrement localisé et effondrement généralisé.

Comme illustré au Tableau 1, il est donc courant que la menace d'un même type d'objet souterrain soit qualifiée par la superposition de plusieurs types d'aléas de mouvement terrain, chacun caractérisé par une intensité et une extension géographique qui leur sont propres.

Bien entendu, selon les cas, un ou plusieurs types de mouvement de terrain peuvent se montrer relativement plus importants que d'autres et sont alors préférentiellement étudiés. Par exemple, si des objets souterrains sont capables de provoquer des tassements et des effondrements localisés sur un même endroit, par exemple le puits de mine, l'aléa « effondrement localisé » et l'aléa « tassement » y seront indépendamment et séparément qualifiés selon les mécanismes et phénomènes concernés. Cependant, l'aléa « effondrement localisé » sera très certainement bien plus fort et bien plus important que l'aléa « tassement ». Dans ces conditions, la cartographie de l'aléa d'effondrement localisé sera privilégiée à cet endroit, pour qualifier objectivement le danger de mouvement de terrain avec l'effet le plus important.

5 L'ALÉA DE MOUVEMENT DE TERRAIN

5.1 Généralités et définitions

En France, les plans de prévention des risques se basent sur une évaluation et une cartographie d'aléas en rapport avec les phénomènes concernés par les types de dangers redoutés.

Conformément à la méthodologie française en prévention des risques et aux nombreux guides méthodologiques qui y sont associés, « *l'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation de l'aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible de l'effet redouté et de sa probabilité d'occurrence.* »

Cette définition générale s'applique à tous les types d'aléas.

Dans le cadre de ce travail, l'aléa de mouvement de terrain est le seul à être étudié et sa définition est reprise d'après les guides méthodologiques français de prévention des risques miniers et naturels (pour les cavités abandonnées) :

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

L'intensité du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, impacts ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cette notion intègre à la fois une hiérarchisation des conséquences des événements mais également leur potentiel de gravité sur les personnes, les biens et l'usage du sol susceptible d'occuper le site.

La notion de probabilité d'occurrence, qui traduit pour sa part la sensibilité que présente un site à être affecté par l'un ou l'autre des phénomènes analysés, est généralement moins aisée à appréhender et à quantifier que celle d'intensité. Quelle que soit la nature des événements redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquels ou nuisances ne soient pas répétitifs expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner sur la base de probabilités quantitatives (x % de risque de développement d'un désordre). On privilégiera donc une classification qualitative caractérisant une prédisposition du site à subir tel ou tel type de désordres ou nuisances. C'est donc cette notion de prédisposition (détriment de la probabilité d'occurrence) qui sera retenue dans la suite du document. L'évaluation de cette prédisposition dépend de la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables ou défavorables à l'initiation ou au développement des mécanismes pressentis. »

« Comme établi dans le chapitre relatif aux phénomènes et mécanismes initiateurs des désordres d'origine minière, l'aléa mouvements de terrain se décline en sept phénomènes correspondant à des origines et des effets distincts :

- les tassements ;
- les affaissements progressifs ;
- les effondrements localisés ;
- les effondrements généralisés ;
- les glissements ou mouvements de pente ;
- les coulées
- les écroulements rocheux. »

Dans le cadre de la présente étude, seuls les aléas de tassement, d'effondrement localisé et d'effondrement généralisé seront effectivement traités.

5.2 Distinction entre « aléa » et « risque »

Conformément aux nombreux guides méthodologiques français sur la prévention des risques et à la notice méthodologique d'élaboration des cartographies des zones soumises à l'aléa d'inondation et du risque de dommages dus aux inondations en Wallonie, l'aléa se distingue bien du risque.

Le risque se définit par le croisement de l'intensité de l'aléa considéré et de la vulnérabilité des enjeux, actuels et futurs, potentiellement exposés. L'aléa se borne à qualifier l'importance de la menace sans tenir compte des enjeux potentiellement exposés à ladite menace.

Dans le cas d'un type de mouvements de terrain (tassement, affaissement, effondrement localisé, effondrement généralisé), le risque s'obtient par croisement de l'intensité de l'aléa considéré et de la vulnérabilité de l'enjeu, actuel ou futur, potentiellement exposé à ce type d'aléa (voir Figure 9).

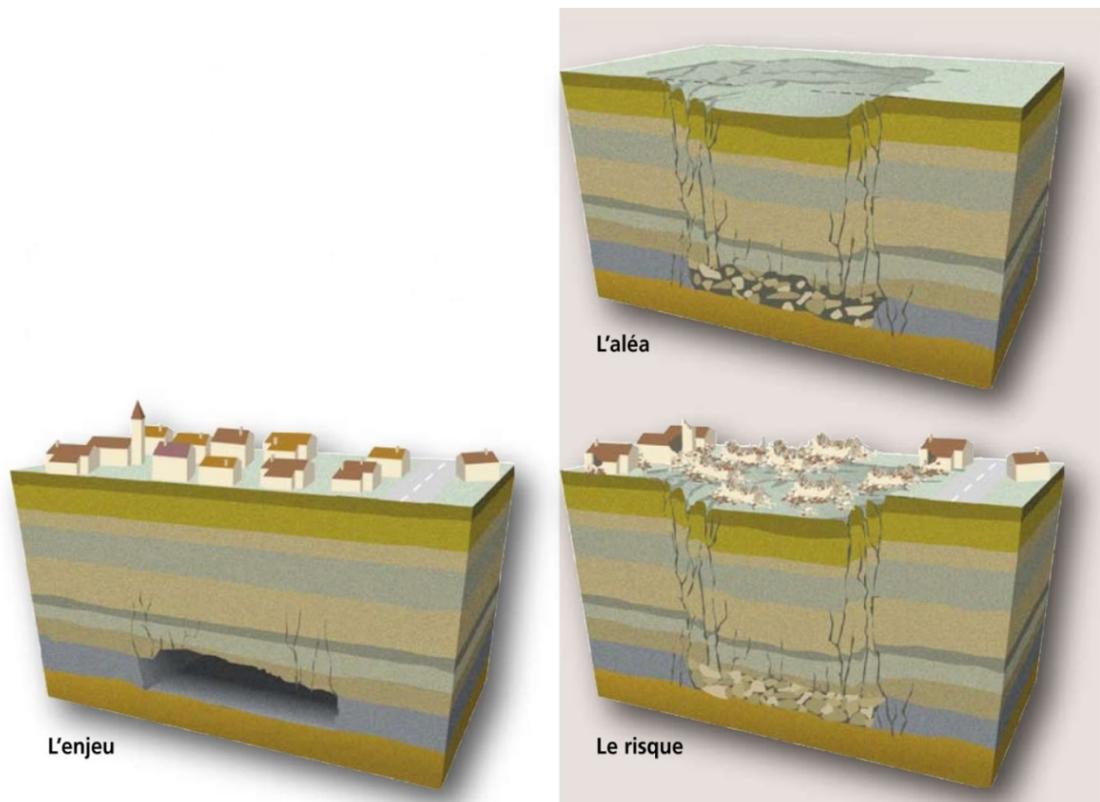


Figure 9 – Illustration didactique de l'aléa, de l'enjeu et du risque de mouvement de terrain (Source : Ministère français de l'écologie et du développement durable).

5.3 Effets considérés pour les mouvements de terrain : nature et intensité

D'après le guide méthodologique PPRM de l'INERIS, version 2006,

« l'intensité des effets caractérise l'ampleur des répercussions attendues en cas de déclenchement d'un évènement redouté. De manière à hiérarchiser les dégâts ou nuisances potentielles [...], quelques classes d'intensité (de très limitée à très élevée) [...] seront définies [...] en fonction de la nature des mécanismes et phénomènes attendus sur le site considéré.

La démarche d'évaluation de l'intensité des phénomènes consiste à identifier la ou les grandeurs physiques les plus représentatives pour caractériser les conséquences des évènements redoutés. On choisira de s'intéresser aux critères portant sur la taille des cratères d'effondrement, sur l'amplitude des déformations horizontales des terrains de surface,...

En intégrant l'ensemble des informations collectées, [...] l'expert évalue la valeur prévisible de cette grandeur pour le site concerné afin de définir à quelle classe d'intensité ce phénomène redouté correspond. [...] Ces classes d'intensité d'effet sont préalablement définies, ainsi que les valeurs seuils permettant de différencier ces classes entre elles.

Cette étape exige de se rapporter à la notion de « gravité » des phénomènes redoutés. On entend par gravité, l'importance des conséquences prévisibles sur les enjeux qui pourraient, un jour, être présents en surface. Il est essentiel de préciser ici que cette réflexion ne doit pas se limiter aux enjeux existants ni même aux projets futurs envisagés à court ou moyen terme. » (Voir Figure 9).

« Il s'agit d'une démarche d'abstraction qui s'attache à identifier la gravité intrinsèque du phénomène. Cette gravité peut s'appliquer aux personnes (victimes), aux biens (dégâts) ou à l'usage du site (limites d'usage).

Pour [...] la dangerosité des évènements redoutés sur la sécurité des personnes, [...] les phénomènes sont regroupés en fonction du nombre de victimes potentielles : pas de victimes redoutées, victimes isolées possibles, accidents collectifs, catastrophe majeure. Dans ce type de démarche, c'est la notion de dangerosité du phénomène redouté qui l'emporte. On s'appuie donc principalement sur les notions de cinétique (caractère dynamique et brutal d'un effondrement) [...].

Pour [...] les conséquences des évènements redoutés sur les biens (bâti et infrastructures), [...] les phénomènes sont regroupés en fonction de la difficulté et du coût de mise en œuvre des mesures [...] nécessaire[s] [...] pour prévenir tout désordre ou nuisances ou réparer les dommages engendrés.

Pour [...] les conséquences des évènements redoutés sur l'utilisation et la valorisation possible du site (pour ce qui concerne le sol, le sous-sol et l'eau), [...] les phénomènes sont regroupés en fonction de l'importance des nuisances engendrées et des limitations d'usage, ainsi que la difficulté et du coût de mise en œuvre des mesures [...] nécessaire[s] [...] pour envisager l'usage souhaité du site.

Le nombre de classes d'intensité retenues pour l'analyse peut varier en fonction du contexte de l'étude et notamment de la précision et de l'exhaustivité des données d'entrée. [...]

Pour définir l'intensité d'un phénomène, les classes d'intensité d'effet sont qualifiées par : très limitée, limitée, modérée, élevée.»

À partir de la démarche du guide méthodologique de l'INERIS, les classes d'intensité pour les différents désordres (ou effets) ont été déterminées pour la Wallonie, ainsi que les valeurs seuils qui permettent de distinguer ces classes.

En complément des valeurs françaises, l'exploitation des données accidentologiques en Wallonie disponibles auprès de la CACEff et du SGW a permis de comparer l'ampleur des mouvements de terrain avec la nature, la gravité et l'extension des dégâts causés à un bâtiment de référence type « habitation unifamiliale » (10 m de côté, en maçonnerie, avec de bonnes fondations) et à son terrain. Les seuils d'intensité d'effet qui seront identifiés lors de cet exercice (voir 5.5, page 38) concordent avec les valeurs françaises.

De plus, en gardant toujours cette référence, le retour d'expérience des effondrements déjà survenus en Wallonie et les travaux de la CACEff ont permis de mettre en relation les classes identifiées avec :

- des étendues d'effets par rapport aux parcelles cadastrales,

- des modes de gestion de l'incident lorsqu'il survient avec les caractéristiques considérées.

Ces éléments ont été précieux pour appréhender d'une part l'intensité considérée de chaque classe d'effet, et d'autre part, pour consolider un unique référentiel d'intensité d'effet.

Cependant, ces seuils ont été proposés sur une base purement technique. Suivant le niveau d'acceptabilité des dommages associés aux mouvements de terrain considérés, ils peuvent être revus selon les contextes rencontrés et/ou les obligations de gestion.

À titre indicatif, les données d'accidentologie connues ne renseignent aucun décès ni blessé sérieux dans l'effondrement d'un bâtiment occupé, au cours de ces 150 dernières années. Dans tous les cas connus de ruine d'un bâtiment, la qualité de construction en Belgique sur cette période a permis aux occupants d'évacuer le bien en temps utile.

5.4 Prédiposition locale

La prédiposition est une composante de l'aléa bien plus difficile à qualifier que l'intensité des effets redoutés. Celle-ci renvoie directement à la connaissance des mécanismes géomécaniques concernés par les phénomènes, à une expérience de terrain et un retour d'expérience concernant des situations passées analogues.

C'est pourquoi la prédiposition d'un site à subir des effets donnés est estimée à partir :

- des caractéristiques des objets souterrains afin d'estimer leur présomption de présence locale et leur état d'endommagement géomécanique qui les amèneraient à se ruiner, voire à s'effondrer, à court, moyen ou long terme, et qui seraient ainsi à l'origine des effets survenant en surface ;
- des contextes géologique, géotechnique et hydrogéologique des terrains environnant et surmontant l'objet souterrain, qui joueront ou non un rôle déterminant dans la transmission des mouvements de terrain vers la surface et/ou dans l'ampleur de ceux-ci en surface ;
- des données accidentologiques disponibles qui permettent l'appréciation de certaines situations et de certains paramètres par analogie à des accidents passés.

À l'instar d'autres types d'aléas naturels non récurrents (chute de blocs depuis des falaises ou les glissements de terrain), les mécanismes concernés par les mouvements de terrain considérés sont souvent complexes et les données disponibles rarement. La qualification de la prédiposition locale reste à chaque fois le domaine d'expression privilégié des experts confirmés dans la matière considérée.

5.4.1 Signification de la prédiposition

Au paragraphe 5.3, les différents effets redoutés en surface (tassement, affaissement, effondrement), engendrés par des objets souterrains, ont été qualifiés en supposant que ces objets se ruinaient et s'effondraient à tous les coups. À ce stade, on obtient des zones d'effets, uniquement définie par l'intensité de ces effets et une zone d'influence associée.

Or, tous les objets souterrains connaissent une évolution qui leur est propre, et ne sont pas susceptibles de se ruiner tous en même temps sur la totalité de leur extension ou selon le même agenda. C'est pourquoi la notion de prédiposition est introduite pour tenir compte de ces évolutions différentes et *in fine* obtenir les zones d'aléa.

Pour que ces zones d'effets deviennent des zones d'aléas, il faut aussi conférer à chacune une prédiposition locale. Celle-ci traduit comment chaque objet souterrain considéré va évoluer dans le temps et comment, avec ses contextes, il va influencer l'importance des effets redoutés pour un site en surface.

La prédisposition est qualifiée en classes croissantes : peu sensible, sensible et très sensible. Elle indique que le site considéré est susceptible de subir un effet redouté d'une certaine intensité, respectivement à long, moyen ou court terme.

Pour chaque zone d'effet obtenue pour un type d'effet redouté, la classe de prédisposition permet de relativiser l'intensité d'effet de cette zone et de moduler le niveau du danger selon une échelle relative. Il s'agit là du fondement de l'aléa : en qualifiant son intensité d'effet et sa prédisposition pour l'effet considéré, la zone d'effet cesse dès lors d'en être une et devient une zone d'aléa de type et de niveau donnés.

La qualification de l'aléa en catégories croissantes permet de hiérarchiser les différentes zones obtenues pour chaque effet considéré, selon l'intensité et la possibilité de survenance de la menace redoutée. En matière de gestion de la menace induite par le sous-sol et des actions s'y afférant, il s'agit du principal avantage des zones d'aléas sur les zones d'effets.

5.4.2 Contribution de l'objet souterrain

Au paragraphe 5.3, les caractéristiques de l'objet souterrain ont servi à qualifier l'intensité des effets redoutés en surface, en considérant que cet objet se ruinait et s'effondrait à tous les coups.

À ce stade, la qualification des objets souterrains se focalise uniquement sur leur évolution dans le temps et leur susceptibilité à se ruiner, voire s'effondrer, à court, moyen ou long terme.

Pour éviter toute redondance ou biais dans l'obtention du niveau d'aléa, l'intensité des effets n'est absolument plus considérée ici car elle l'a été dans la section précédente.

La qualification des objets souterrains, au sens de la prédisposition, se concentre uniquement sur :

- la géométrie : il s'agit de la localisation de l'objet, de l'extension géométrique du réseau de cavités auquel appartient l'objet, de sa profondeur, de sa présomption de présence, ainsi que de la précision de ces informations ;
- la géomécanique : il s'agit d'appréhender l'état géomécanique de l'objet souterrain afin d'apprécier s'il va se ruiner ou non, sur une période de temps considérée.

Par observations, mesures *in-situ* et modélisations en géomécanique, il est communément admis que la résistance géomécanique maximale d'une même cavité souterraine diminue globalement avec la taille croissante de son volume de vides et/ou son extension géométrique, en supposant constant et invariable le poids des terrains supérieurs.

Par ailleurs, dans le cas des exploitations souterraines, la méthode d'exploitation dimensionne ainsi la taille des cavités selon les propriétés géomécaniques de la roche extraite, les propriétés géomécaniques du massif encaissant, ainsi que les déformations et mouvements de terrain tolérés tant dans l'exploitation qu'en surface.

En définissant le champ des contraintes géomécanique du massif tout autour de la cavité d'un objet souterrain en régime élastique, on constate que les contraintes les plus élevées se concentrent surtout sur les parois de cette cavité. Si la résistance géomécanique maximale de cette cavité est atteinte, les parois, de même que les éventuels piliers, subissent alors de possibles endommagements sous la forme de déformations et/ou de fracturations.

Le niveau d'endommagement des parois, et éventuels piliers, qualifie donc l'objet souterrain par rapport à la charge qu'il subit. D'où l'importance des inspections systématiques des parois et des éventuels piliers des objets souterrains accessibles, sans pour autant oublier les détections directes et indirectes d'indices de mouvements de terrain depuis la surface.

L'inspection systématique reste certainement le meilleur outil pour qualifier directement et plus justement l'état géomécanique de ces objets. Répétée régulièrement dans le temps, cette inspection est déterminante pour qualifier une évolution à court, moyen ou long terme de ces vides souterrains vers une possible ruine géomécanique, et donc estimer la prédisposition à la ruine pour ces objets.

Afin de respecter les objectifs initiaux de la présente étude, seront prises en compte les seules appréciations globales disponibles sur l'état géomécanique des objets souterrains considérés. Bien entendu, une étude à portée plus spécifique pourra qualifier plus finement un site souterrain jusqu'à l'échelle de ses différents sous-secteurs.

Enfin, il existe de nombreux objets souterrains dont les positions, localisation et extension ne sont pas toujours bien connues. Ce type de situation se rencontre dès que les objets ne sont pas visibles et qu'aucun indice direct ne permet de les localiser précisément. Pourtant, certaines informations attestent de la présence de ces objets sur des périmètres géographiques assez larges mais de façon très imprécise. Dans l'exemple des puits de mines, la zone de présence d'un puits non visible est élargie à ses positions multiples tirées de sources de données peu précises. Pour l'exemple des marnières de Hesbaye, les exploitations découvertes sont situées dans les niveaux géologiques de craies situées au-dessus du niveau piézométrique. Il est pressenti dans ce cas que d'autres marnières ont été creusées dans des conditions de gisement similaires. Ce qui a permis d'ailleurs de découvrir de nouvelles cavités dans la région. Pour la majorité des carrières souterraines, seule l'extension cadastrale est connue ainsi que le fait que des travaux souterrains ont bien été menés dans ce périmètre, bien qu'aucun plan ne permette souvent de les localiser.

Afin d'exploiter ce type d'information, la présomption de présence d'un type d'objet souterrain non connu a été introduite pour appréhender le niveau de présence de cet objet, et de la menace potentiellement induite, sur un secteur particulier. Au-delà d'un certain niveau de présomption de présence, l'objet peut être considéré comme certainement présent.

Lorsque la présomption de présence d'un objet susceptible de provoquer des mouvements de terrain sur un site croît, la prédisposition locale augmente. Dans le cas contraire, elle est réduite.

5.4.3 Contribution des contextes des objets souterrains

Ici aussi, la qualification des contextes des objets souterrains se focalise uniquement sur leur épaisseur et leur susceptibilité à transmettre les effets vers la surface, à court, moyen ou long terme.

Pour éviter toute redondance ou biais dans l'obtention du niveau d'aléa, l'intensité des effets n'est absolument plus considérée ici.

La prise en compte des contextes relatifs à chaque objet souterrain au sens de la prédisposition est importante pour appréhender :

- les influences sur la ruine possible de ces objets via les caractéristiques géomécaniques et hydrogéologiques du massif environnant ;
- la susceptibilité à la propagation des effets vers la surface, avec atténuation ou amplification, via les caractéristiques géomécaniques des formations géologiques sis entre l'objet souterrain et la surface et via les caractéristiques géotechniques des formations superficielles.

Les formations géologiques comportant les objets souterrains et les surplombant sont généralement bien connues, caractérisées et cartographiées, aussi bien dans la littérature scientifique que les cartographies géologiques de Belgique et de Wallonie.

Par souci de simplification, les terrains géologiques avoisinant les objets souterrains sont regroupés en quatre catégories :

- 1) les formations géologiques, de nature cohérente et de résistance avérée, formant un bed-rock homogène et relativement solide. Capable de contenir la propagation d'effets modérés vers la surface, ce bed-rock sain réduira la prédisposition locale. Par contre, s'il est densément fracturé, le bed-rock peut laisser se propager des effets plus limités, augmentant la prédisposition locale en proportion ;
- 2) les terrains meubles situés au plus près de la surface du sol et formant généralement une couverture superficielle et/ou altérée sur le bed-rock, ne pourront pas contenir la propagation d'un effet, même limité. Ces terrains augmenteront donc la prédisposition locale d'autant que la saturation en eau augmente, que la granulométrie de ces formations diminue et qu'il existe des discontinuités (zones altérées, fracturées ou faillées) ;
- 3) les terrains meubles saturés en eau, présentant souvent des comportements bouillants (essentiellement dans les plaines alluviales). Ces terrains ont des caractéristiques qui poussent, à coup sûr, la prédisposition locale aux plus hautes sensibilités.

À ce stade, la prédisposition des formations et terrains constituant le contexte de l'objet est considérée globalement selon plusieurs aspects :

- la nature et les propriétés physiques : lithologie, granulométrie, porosité ...
- les propriétés géomécaniques : prise en compte de paramètres comme la cohésion c , l'angle de frottement interne ϕ , la granulométrie,...
- la sensibilité à l'eau de ces formations : perméabilité hydraulique, influence de l'eau sur les propriétés géomécaniques,...
- les discontinuités présentes dans les massifs concernés : présence de fractures, de failles et de singularités qui augmente la prédisposition (qu'elles soient d'origine naturelle ou induite, comme pour les massifs en zone d'influence houillère).

Il en résulte une approche multivariée de la notion de prédisposition.

À l'exception des rares zones cartographiées par les cartes géotechniques du Ministère des Travaux publics (1978-1986), les terrains superficiels ne sont pas correctement connus et caractérisés sur le plan géotechnique à l'échelle de la Wallonie. Cette information étant absolument nécessaire pour la qualification de l'aléa de mouvement de terrain, et particulièrement pour estimer l'évolution des cratères d'effondrement, cette étude a élaboré en lieu et place une proto-cartographie des terrains superficiels à partir des données de sondages géologiques, d'essais géotechniques et de données pédologiques. Cette proto-cartographie est nécessaire pour estimer l'épaisseur, la nature et le comportement géomécanique des formations superficielles.

5.4.4 L'accidentologie ou l'analyse des données des accidents passés

L'examen des accidents passés doit permettre de :

- comprendre les conditions de ces accidents ainsi que les causes qui les auraient déclenchés ;
- mettre en évidence et en déduire des paramètres menant à la ruine de l'objet à risques ou à l'extension de ses conséquences ;
- transposer les conditions de ces accidents à d'autres endroits où des contextes similaires sont réunis afin de prendre les mesures préventives adéquates

Des informations de ce type ont été et continuent d'être rassemblées par la CACEff du Service public de Wallonie. Il s'agit de rapports récents, de rapports d'archives et de tableaux de synthèse.

La construction d'une base de données géographique y est en préparation, et facilitera l'analyse des données accidentologiques.

5.5 Les différents types d'aléa de mouvement de terrain

Cette section aborde la qualification de quatre phénomènes de mouvement de terrain considérés dans cette étude, sur les aspects de l'intensité d'effet et de la prédisposition. Elle se veut être une synthèse du guide méthodologique PPRM de l'INERIS, version 2006, dont elle est largement inspirée, et invite le lecteur intéressé à s'y référer pour toute information complémentaire.

5.5.1 Définition et cartographie des zones d'aléa

A. Qualification des niveaux d'aléa

D'après le guide méthodologique PPRM de l'INERIS, version 2006,

« la qualification de l'aléa a pour objectif de hiérarchiser les niveaux d'aléa. Les termes « aléa fort » ou « aléa très fort » signifient que les zones concernées sont plus prédisposées à l'apparition de manifestations importantes en surface que les zones « d'aléa moyen » ou « aléa faible ».

L'aléa résulte du croisement d'une intensité [d'effet] avec la prédisposition correspondante. Le principe de qualification de l'aléa consiste donc à combiner les critères permettant de caractériser l'intensité d'un phénomène avec les critères permettant de caractériser sa classe de prédisposition.

Plusieurs principes, explicites ou implicites, permettent de combiner entre elles des valeurs qualitatives ou de croiser des critères qualitatifs et quantitatifs. On citera pour mémoire les techniques par cotation, par surclassement, par hiérarchisation multicritère,....

Si c'est le principe des tableaux croisés qui est retenu, on utilise une matrice de synthèse dont les principes de constitution sont illustrés dans le tableau suivant [(Figure 10)], en précisant bien, une fois encore, que chaque site peut donner lieu à des ajustements pour s'adapter au contexte spécifique qui le caractérise. [...]

Il est souhaitable de privilégier une démarche visant à faciliter une homogénéisation des classes d'aléa à l'échelle du territoire national et ce quelle que soit la nature des désordres pressentis. Les différentes valeurs guides qui seront proposées dans la suite de l'ouvrage, bien qu'elles ne soient fournies qu'à titre indicatif, ont pour objectif d'y contribuer.»

L'aléa est qualifié en classes de niveau croissant : très faible, faible, moyen ou fort. Elles sont obtenues par croisement de la classe d'intensité d'un effet donné (très limitée, limitée, modérée ou élevée) et de la classe de prédisposition locale d'un lieu (peu sensible, sensible ou très sensible) à subir cet effet. Le tableau de la Figure 10 illustre le principe général de ce croisement de classes.

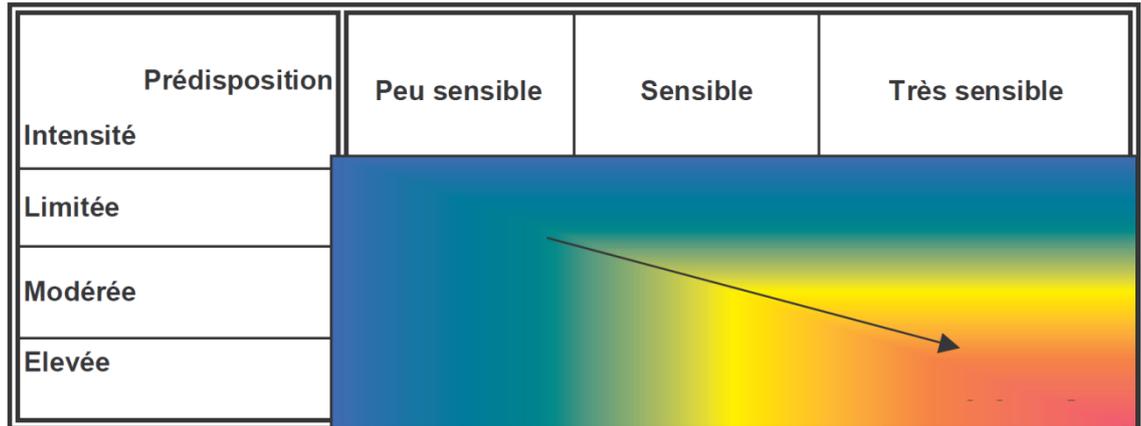


Figure 10 – Tableau croisé déterminant l'intensité de l'aléa à partir de l'intensité de l'effet redouté et la prédisposition (Source : INERIS, 2006).

Cette qualification de l'aléa permet de hiérarchiser relativement les zones dotées de niveaux d'aléas différents. Cela veut dire qu'une zone qualifiée par un aléa fort est bien plus susceptible de subir des effets d'un certain type, et d'une certaine ampleur, qu'une autre zone qualifiée par un aléa moyen ou faible.

Les zones d'aléas sont définies pour chaque type d'effets redoutés en surface : tassement, affaissement progressif, effondrement localisé et effondrement généralisé.

L'idée générale est d'établir une échelle concordante et unique des niveaux d'aléas pour les différents types d'effets qui serait utilisée par les acteurs concernés du Service public de Wallonie. Ces derniers pourront ensuite décliner ces classes selon leurs propres seuils et leurs propres significations pour les faire coïncider avec leur gestion administrative.

Ces zones se caractérisent par une intensité (très faible, faible, moyenne ou forte) et une extension géographique.

Les classes et valeurs seuils proposées ci-après sont données à titre indicatif et appellent probablement une validation par l'analyse des données accidentologiques disponibles pour la Wallonie et par les acteurs concernés du Service public de Wallonie.

B. Cartographie des zones d'aléa

Chaque zone d'aléa est cartographiée par une extension géographique cumulant :

- les dimensions et extensions de l'objet ou du groupe d'objets souterrains considéré ;
- l'emprise en surface de la zone d'influence de cet objet ou groupe d'objets souterrains selon les phénomènes de rupture considérés. Cette zone d'influence est déterminée par l'évaluation de l'intensité de l'effet produit en surface ;
- l'incertitude ou l'imprécision sur la localisation et l'extension cartographique de l'objet ou du groupe d'objets souterrains considéré. Cet élément est imposé par la qualité des sources de données disponibles.

Dans les cas où les objets ne sont pas précisément connus mais pressentis à certains endroits, les zones d'aléas sont explicitement distinguées et délimitées sur base des présomptions ou des indices de présence et du contexte géologique. Par exemple : un karst sera présumé en milieu calcaire ; un vieux puits non connu, à l'aplomb de têtes de veines dans des zones connues pour leur exploitation historique,... Les extensions de ces zones de présomption de présence seront adaptées en fonction du degré de présomption de présence des objets souterrains et des contextes considérés.

C. Types d'aléa considérés

Ce travail se focalise principalement sur les aléas de tassement, d'effondrement localisé et d'effondrement généralisé. L'effondrement localisé sera largement abordé vu son importante complexité et sa large représentativité dans le territoire wallon.

5.5.2 Le tassement

Le tassement différentiel est l'effet redouté qui menace uniquement les bâtiments et les infrastructures situés à l'aplomb des objets souterrains, et non la population.

A. Qualification de l'intensité d'effet

L'ampleur des mouvements est faible : de l'ordre de quelques centimètres. Cependant, les dégâts causés seront proportionnels à l'ampleur des tassements (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Classes d'intensité d'effet proposées pour l'aléa de tassement (adapté de INERIS, 2006)

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 inexistants 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

La première catégorie concerne les désordres de l'ordre du centimètre, jamais signalés.

Dans la deuxième catégorie, les tassements deviennent plus importants. Le propriétaire du bâtiment prend parfois des actions : mandat d'un expert en stabilité ou une entreprise de reprise en sous-œuvre. Vu leurs coûts assez importants, de tels travaux ne se justifient que quand la stabilité du bâtiment est vraiment compromise. L'ordre de grandeur des effets est de plusieurs centimètres à un décimètre.

On sera particulièrement attentif au tassement à l'aplomb des objets souterrains qui :

- comportent des cavités remblayées ;
- ont fait l'objet d'un foudroyage ;
- ont une influence sur la saturation en fluide, gaz et liquide, et la compaction des terrains superficiels (exemple du karst) ;
- ont déjà provoqué un mouvement de terrain en surface, ayant imposé un remblayage (combinaison de l'effet des remblais et de la zone déconsolidée sous-jacente).

Hors des exploitations souterraines, on y sera particulièrement attentif à l'aplomb :

- des cavités (carrières et fouilles) à ciel ouvert remblayées ;
- des formations carbonatées susceptibles d'être karstifiées en surface ;
- des formations compressibles (tourbes).

B. Qualification de la prédisposition

La prédisposition locale au tassement est souvent liée à :

- l'existence d'anciens tassements dans un secteur proche présentant des caractéristiques d'objets souterrains et de massif similaires à la situation considérée ;
- la modification lente (remontée et rabattement de nappe) ou rapide (ruptures d'une canalisation) des conditions hydrauliques du massif ;
- la présence d'anciennes exploitations provoquant le foudroyage ;
- l'effondrement avéré d'objets souterrains pour lequel le comblement des vides résiduels et la mobilisation des terrains sus-jacents sont terminés ;
- la compaction secondaire des terrains meubles superficiels.

Spécifiquement pour les objets de type « cavités exploitées depuis la surface (type carrières à ciel ouvert) et ensuite remblayées », « affaissements ou effondrements remblayés », la prédisposition sera influencée par :

- la nature des matériaux de remblayage ;
- l'épaisseur du remblai ;
- la méthode utilisée pour le remblayage, surtout avec ou sans compactage.

C. Qualification de l'aléa « tassement »

Le croisement des classes d'intensité d'effet et des classes de prédisposition, nécessaire pour obtenir les niveaux d'aléa pour le tassement, est présenté au Tableau 3.

Tableau 3 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas de tassement avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale.

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

5.5.3 L'affaissement progressif

Les affaissements progressifs sont contemporains des périodes d'exploitation. La qualification de l'aléa associé est brièvement abordée ci-après même si ce dernier ne fait pas l'objet de ce travail.

A. Qualification de l'intensité d'effet

L'affaissement progressif produit de lentes déformations de la surface du sol qui affectent principalement les bâtiments et les infrastructures. La principale grandeur retenue par l'INERIS pour qualifier ces effets est la mise en pente P de la surface du sol. Les classes d'intensité d'effet sont présentées au Tableau 4.

Tableau 4 : Classes d'intensité d'effet pour l'aléa d'affaissement progressif (Source : INERIS, 2006).

Classe d'intensité d'effet	Mise en pente (%)
Très limitée	$0 < P < 1$
Limitée	$1 < P < 3$
Moyenne	$3 < P < 6$
Elevée	$P > 6$

B. Qualification de la prédisposition

La prédisposition locale à l'affaissement progressif est favorisée par la présence :

- d'exploitations souterraines totales provoquant du foudroyage, comme dans la méthode de la longue taille (charbon) ;
- d'exploitations souterraines partielles (chambres et piliers abandonnés par exemple) menées en terrains stratifiés, caractérisées par un faible ratio (< 1) de la profondeur sur la largeur de l'exploitation, et une profondeur importante pour permettre une déformation souple et progressive des terrains de recouvrement ;
- d'exploitations filoniennes, dont les dimensions et résistance des ouvrages souterrains laissés en place, la nature et l'éventuelle fracturation des terrains encaissants et la nature des éventuels remblais utilisés sont les principaux paramètres à prendre en compte ;
- d'exploitations salines par dissolution.

Dans le cas des exploitations totales, on considère que les affaissements se stabilisent dans les 10 à 15 ans suivant l'arrêt de l'extraction et que les mouvements résiduels deviennent imperceptibles. C'est pourquoi, dans ces conditions, la prédisposition de voir apparaître un affaissement progressif en surface sera négligée.

C. Qualification de l'aléa « affaissement progressif »

Le tableau croisé construit à partir de celui de l'INERIS pour qualifier les niveaux d'aléa d'affaissement progressif à partir des classes d'intensité d'effet et des classes de prédisposition, est présenté au Tableau 5.

Tableau 5 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas d'effondrement localisé avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale (adapté de INERIS, 2006).

Effet « affaissement progressif »		Prédisposition locale		
Pente (°)	Classe d'intensité	Peu sensible	sensible	Très sensible
$0 < P < 1$	Très limitée	Très faible	Très faible	Faible
$1 < P < 3$	Limitée	Très faible	Faible	Moyen
$3 < P < 6$	Moyenne	Faible	Moyen	Fort
$P > 6$	Elevée	Moyen	Fort	Très Fort

5.5.4 Effondrement localisé

A. Qualification de l'intensité d'effet

L'intensité de l'effet provoqué en surface par un effondrement localisé d'origine naturelle ou anthropique peut se décliner qualitativement en quatre classes de référence (Tableau 6) :

- une étendue de déformation de moins de 1,5 m de diamètre ; ce sont les accidents les plus courants, et qui ont la caractéristique générale d'être gérés directement, sans connaissances techniques spéciales, par le propriétaire des lieux ou de gestionnaire de l'équipement ;
- une étendue de déformation de 1,5 à 3 m de diamètre ; ce type d'accident peut causer des dégâts structurels et amène généralement à la consultation d'experts et à en référer à l'autorité locale ;
- une étendue de déformation de plus de 3 m de diamètre ; les accidents de cette dimension sont susceptibles de créer un porte-à-faux capable d'entraîner des dommages importants à un bâtiment de référence du type « habitation unifamiliale » ;
- une étendue de déformation de plus de 10 m de diamètre et d'une profondeur d'au moins 0,5 m ; les dimensions sont telles qu'elles entraînent la ruine inéluctable du bâtiment de référence ; l'accident doit être géré au-delà de l'échelle de la parcelle ;

Tableau 6 : Classes d'intensité d'effet proposées pour l'aléa d'effondrement localisé (adapté de INERIS, 2006).

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

En France, des seuils équivalents sont considérés pour les plans de prévention des risques naturels et miniers. Cependant, ils se distribuent autrement comme indiqué au Tableau 7 :

Tableau 7 - Tableau des classes d'intensité pour l'effondrement localisé (INERIS, 2006).

Diamètre cratère \varnothing (m)	Classe d'intensité
Effondrements auto-remblayés à proximité de la surface (profondeur centimétrique)	Très limitée
$\varnothing < 3$ m	Limitée
$3 < \varnothing < 10$ m	Modérée
$\varnothing > 10$ m	Élevée

B. Qualification de la prédisposition

Dans tous les cas, la prédisposition locale à l'effondrement localisé sera toujours favorisée par :

- l'existence d'anciens effondrements localisés survenus dans un secteur proche présentant des caractéristiques d'objets souterrains et de contextes similaires à ceux de la situation étudiée ;
- la présence de terrains de surface déconsolidés sur une grande épaisseur, qui favorise l'apparition de cratères d'effondrement de grands diamètres.

Effondrement localisé initié par un fontis

La prédisposition d'un site à voir un fontis percer au jour et à former un cratère d'effondrement, dépend de deux autres prédispositions :

- la prédisposition à la rupture de l'objet souterrain concerné (cavité, galerie, chambre,...), qui débutera par la rupture, la fracturation et la chute de son toit. Celle-ci dépend principalement de :
 - la largeur du toit des objets souterrains concernés,
 - la nature, l'épaisseur et l'état de fracturation des premiers bancs rocheux qui constituent le toit de ces objets ;
- la prédisposition à la remontée de l'instabilité vers la surface (ou remontée de fontis) :
- Une fois la chute de toit initiée au sein de l'objet, sa propagation à long terme vers la surface est susceptible d'être stabilisée par deux mécanismes :
 - la formation d'une voûte stable (ou voûte de détente) : la présence de bancs épais et résistants dans les terrains de recouvrement contribue à réduire la prédisposition de voir un fontis pointer au jour,
 - l'auto-comblement engendré par le foisonnement des éboulis. Le volume de vides disponibles au sein des objets (dimension des objets), la nature (foisonnement) et l'épaisseur des terrains de recouvrement influencent cette prédisposition.

En pratique, le retour d'expérience disponible pour les cas français, et quelques cas wallons, démontre, qu'en deçà d'une profondeur de 50 mètres, la prédisposition des objets souterrains, de section (< 18 m²) et hauteur habituelles (< 4 m), à développer des fontis remontant jusqu'en surface, est généralement négligeable.

A la limite de l'apparition d'un cratère de fontis en surface et de sa non-apparition, la manifestation du fontis auto-comblé peut se limiter à un affaissement localisé. Cet effet ne sera pas considéré ici, car couvert par l'aléa d'effondrement dans la grande majorité des cas wallons (cavités à moins de 35 m de profondeur).

Le Tableau 7 donne l'exemple d'une grille d'évaluation de la prédisposition de l'aléa de fontis, au départ d'une galerie souterraine, développée par GEODERIS et l'INERIS pour le bassin ferrifère lorrain.

Tableau 8 : Exemple de grille d'évaluation de la prédisposition de l'aléa fontis sur le bassin ferrifère lorrain, proposée par Jean-Pierre JOSIEN de GEODERIS (Lambert et al, 2007)

Prédisposition	Largeur de la galerie	Phénomènes semblables connus	Nature du recouvrement	Densité du vide*	Fracturation du toit	Venue d'eau	Soutènement
Très sensible	L > 5 m	Oui	Peu résistant	Avéré	Mauvais	Importante	Cadre ou boulonnage
Sensible	3 m < L < 5 m		Moyen	Suspecté	Moyen	Moyen	
Peu sensible	L < 3 m	Non	Résistant		Bon	Faible	Maçonnerie Béton

* comprendre « Présence du vide »

Ce tableau a été adapté au contexte wallon pour proposer une qualification simple de la prédisposition du développement d'un fontis, au départ du vide d'un objet souterrain, d'origine naturelle ou anthropique telle qu'une cavité naturelle, une galerie, une chambre d'exploitation (carrières souterraines), et qui remonterait jusqu'en surface pour provoquer un effondrement localisé. C'est l'objet du Tableau 9.

Tableau 9 : Proposition d'une grille d'évaluation de la prédisposition de développement d'un fontis au départ du vide d'un objet souterrain et sa remontée jusqu'en surface (adapté de Lambert et al, 2007).

Critères		Contribution à la prédisposition		
		Minorant	Neutre	Majorant
		<i>P - 1</i>	<i>P + 0</i>	<i>P + 1</i>
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

Nous avons choisi de rassembler plusieurs paramètres relatifs aux objets souterrains et à leurs contextes car ils sont jugés significatifs pour qualifier la prédisposition de l'initiation du fontis et de sa remontée jusqu'en surface. On retrouve :

- le degré de certitude sur la présence du vide de l'objet souterrain,
- la largeur de la cavité naturelle ou anthropique,
- l'état de fracturation du toit de cette cavité,
- l'éventuel traitement du vide souterrain, et la tolérance aux déformations de la cavité initiale,
- la présence d'eau influençant la stabilité de l'objet souterrain (ou d'une partie),
- la résistance des terrains de recouvrement, surmontant la cavité,
- la présence d'eau dans ces terrains de recouvrement,
- la connaissance d'effondrements produits dans des circonstances similaires dans les environs proches.

Afin de faciliter un peu l'évaluation de la prédisposition, nous proposons un système de cotation de chaque paramètre de cette liste dans le but d'établir un score final *P* qui indique la classe de prédisposition à adopter pour la zone d'aléa considérée. Pour chaque paramètre, la valeur se rapportant à :

- « Majorant » ajoute un point (+1) à *P*,
- « Minorant » retranche un point (-1) à *P*,
- « Neutre » n'apporte aucun point (0) à *P*.

La somme des points reçus et retranchés pour chaque paramètre constitue le score final P . Celui-ci est comparé aux seuils suivants pour définir la classe de prédisposition :

- $P < 0$: peu sensible ;
- $0 \leq P < 4$: sensible ;
- $4 \leq P$: très sensible.

La classe de prédisposition retenue pour l'aléa sera la classe de prédisposition la plus représentée au terme de l'évaluation de tous les paramètres. Pour les paramètres impossibles à évaluer ou jugés non pertinents, aucune valeur de classe ne leur sera octroyée.

Effondrement d'une tête de puits

Une tête de puits peut provoquer un effondrement via deux phénomènes, souvent liés :

- l'effondrement de la surface du sol situé à l'aplomb du puits : si le puits a été remblayé, cette situation peut se produire dès qu'un volume de vide apparaît dans le remblai, suite à la rupture d'une structure mise en place au sein du puits (voûte, plate-cuve,...) et/ou le déboufrage du puits provoqué par la migration du remblai vers des galeries annexes.
- l'écoulement des terrains superficiels environnants dans le puits vide suite à la rupture de ses parois latérales (voir Figure 11). À ce stade, on a la formation d'un cratère d'effondrement, conique (voire tronconique) renversé, en forme d'entonnoir.

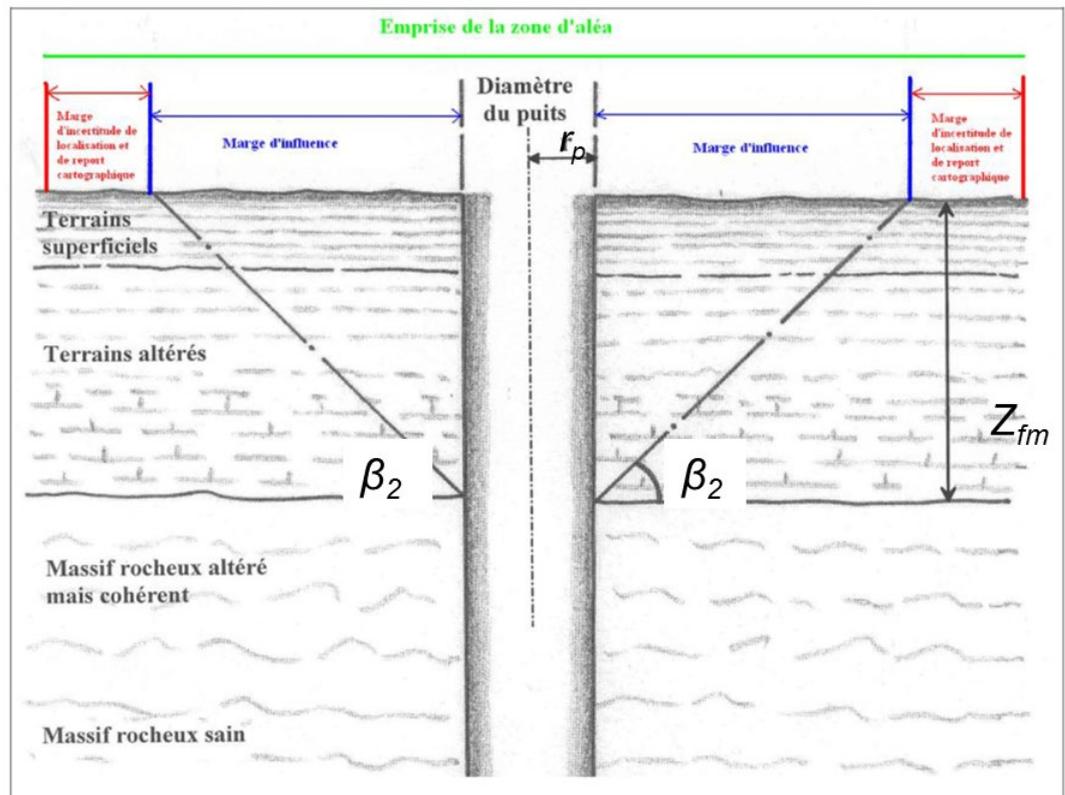


Figure 11 - Emprise de la zone de l'effondrement localisé en forme d'entonnoir, induite par l'éboulement des terrains superficiels vers la tête d'un puits vide (source INERIS).

La deuxième situation se produit généralement après la première.

La grille d'évaluation de la prédisposition d'un puits à provoquer un effondrement localisé est présentée au Tableau 9.

Tableau 10 : Proposition d'une grille d'évaluation de la prédisposition d'un puits à provoquer un effondrement localisé (adapté de Lambert et al, 2007).

Critères		Contribution à la prédisposition		
		Minorant	Neutre	Majorant
		<i>P - 1</i>	<i>P + 0</i>	<i>P + 1</i>
Objet	Présence du puits	Zone de vieux puits	Possible	visible
	Diamètre du puits	$\varnothing < 3 \text{ m}$	$3 \text{ m} < \varnothing < 5 \text{ m}$	$5 \text{ m} < \varnothing$
	Nature du parement	Soutènement par maçonnerie, béton ou claveaux ; Remblayage	Soutènement provisoire ou tolérant les déformations de la paroi	Absence
	Traitement du vide	Remblayage		Néant (puits vide)
Contexte	Nature des terrains environnants	Résistant	Moyen	Peu résistant
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	Faible	Moyen	Importante
	Anthropisation et risque d'apport extérieur en eau	Absence	Présence permanente	Présence + cycle de montée / rabattement de nappe
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	Non		Oui

On y retrouve des paramètres du puits et de ses contextes, jugés significatifs pour qualifier la prédisposition de ce puits à provoquer un effondrement localisé, à savoir :

- le degré de certitude de présence du puits ;
- le diamètre réel (section circulaire) ou équivalent (section non-circulaire) du puits ;
- la nature du parement ;
- le traitement du vide ;
- la nature des terrains environnants ;
- la présence d'eau dans les terrains de recouvrement ;
- l'apport extérieur éventuel en eau (habitations, canalisations, égouttage, drain, déversement,...) ;
- la connaissance d'effondrements survenus dans des circonstances similaires dans les environs proches.

La cotation des différents paramètres ci-dessus est identique à la démarche décrite ci-avant et le score final *P* indique la classe de prédisposition à adopter pour la zone d'aléa relative au puits considéré.

C. Qualification de l'aléa « effondrement localisé »

Le croisement entre les classes d'intensité de l'effet redouté, qu'est le cratère d'effondrement, et les classes de prédisposition locale permet d'obtenir les niveaux d'aléas à partir de la matrice du Tableau 10.

Tableau 11 : Tableau croisé liant les niveaux d'aléas d'effondrement localisé avec les classes d'intensité d'effet et les classes de la prédisposition locale.

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

5.5.5 Effondrement généralisé

Un effondrement généralisé est capable de provoquer la ruine immédiate des bâtiments et des infrastructures situés à l'aplomb. C'est le seul effet qui, en milieu urbanisé, mettra en péril la sécurité des personnes au moment de sa survenance.

A. Qualification de l'intensité d'effet

Le guide INERIS propose une seule classe d'intensité d'effet, élevée à très élevée (Tableau 11), en raison de l'absence de parades légères permettant de s'affranchir des conséquences prévisibles d'un tel phénomène en surface.

Cette proposition est retenue par ce travail pour qualifier l'effet de l'effondrement généralisé.

Tableau 12 : Classe d'intensité d'effet proposée pour l'aléa d'effondrement généralisé (adapté de INERIS, 2006).

Classe	Étendue	Enjeux impactés et type de dégâts	Gestion
Élevée à très élevée	Plusieurs hectares	Terrains : très importants Bâtiments : ruine totale	Gestion par Autorités régionales et/ou nationales + Experts

B. Qualification de la prédisposition

La prédisposition sera toujours augmentée si d'anciens effondrements généralisés se sont déjà produits dans un voisinage proche et dans des contextes similaires.

Les exploitations souterraines par chambres et piliers abandonnés sont plus enclines à développer des effondrements généralisés. Cette prédisposition est la combinaison de deux autres prédispositions :

- la prédisposition à la rupture de l'objet souterrain concerné : comme décrit pour l'effondrement localisé initié par un fontis, cette prédisposition est augmentée par :
 - les contraintes géomécaniques s'exerçant sur les piliers,
 - la configuration d'exploitation fragile (grand élancement des piliers, matériaux faibles, mauvaise répartition des piliers...),
 - le grand nombre de piliers sous-dimensionnés, voire à la limite de résistance, et leur regroupement au sein de l'exploitation,
 - l'absence de piliers barrières,
 - l'influence négative de l'eau sur la résistance des matériaux (altérations, affaiblissement de la résistance à la compression,...) ;
- la prédisposition à la rupture des terrains de recouvrement : un site sera prédisposé à subir un effondrement généralisé et dynamique, au lieu d'un affaissement progressif, si :
 - la profondeur de l'exploitation est faible (maximum 200 mètres),
 - le toit de l'exploitation contient un ou plusieurs bancs raides susceptibles de se rompre fragilement,
 - le rapport de l'extension de l'exploitation sur sa profondeur est important (≥ 1).

C. Qualification de l'aléa « effondrement généralisé »

Comme pour les autres types d'aléa, les classes de la prédisposition locale sont croisées avec les classes d'intensité d'effet. Seulement, pour l'effondrement généralisé, la prédisposition vient moduler l'unique classe d'intensité d'effet et revient à afficher ou non une zone d'aléa associée à l'effondrement généralisé lorsque les conditions ci-dessus sont réunies.

6 DONNÉES UTILISÉES ET LEUR ORIGINE

6.1 Données relatives aux objets

6.1.1 Puits de mines

A. Puits de mines

Les mines sont soumises à tenue de plans (1/1.000) depuis 1802. Ces plans sont dressés sur fond cadastral corrigé par des cheminements topographiques. Depuis 1823 environ dans le Couchant de Mons et 1884 dans toute la Belgique, ces plans étaient référencés dans un système de coordonnées « mines » (origine au Beffroi de Mons, axe des Y orienté vers l'ouest et axe des X orienté vers le nord). A partir de 1884, la projection Bonne est utilisée, puis, à partir de 1940-47, la projection Lambert.

Jusqu'en 1993, il n'existait que quelques travaux et recensements de puits dans certains arrondissements miniers (listes et cartes de G. Burton pour les bassins du Couchant et du Centre, avec les puits officiellement mis hors service de Charleroi, liste et cartes d'Adant pour Namur), toutes en coordonnées « mines ».

La procédure de retrait des concessions, dès 1992, a permis d'obtenir des listes « exhaustives » pour une quarantaine de concessions. Les données étaient extraites des plans miniers par les concessionnaires et converties en coordonnées Lambert 72/50. Parfois ces coordonnées, non listées, ont dû être lues sur les plans à 1/10.000 annexés aux dossiers. A partir de 1999/2000, des relevés au GPS ont accompagné les travaux de terrain.

L'importance d'une politique de prévention des risques résiduels « post-retrait » est apparue évidente dès 1994. Elle nécessitait aussi des données complètes et précises. Un programme en ce sens a été lancé en 1997. Après une première phase de test en 2001-2002, une mission a été confiée, de 2006 à 2011, à la Direction de Colfontaine de l'Institut scientifique de Service public (ISSeP). Elle visait à numériser un lot de 9 000 à 11 000 plans miniers et à en extraire les positions des puits et issues par géoréférencement local (une position par plan : un même puits peut ainsi avoir plusieurs occurrences).

En 2011, 2016 et 2017, l'ISSeP a été chargé de valider les positions relevées. Il n'est pas toujours possible, hors repérage et mesurage (10% des 15 000 puits et issues), de déterminer quel est la position exacte du puits ou de l'issue de mine, et ce même si elle existe. C'est pourquoi, en fonction de la qualité des plans et du géoréférencement, les occurrences des ouvrages ont été classées en occurrences :

- acceptées (positions équiprobables, cohérentes sur plan ou position mesurée sur terrain) ;
- archivées (positions cohérentes sur plan mais redondantes au sein d'un lot d'occurrences dense et compact, position d'un plan moins précis que les autres ou suite à la découverte du puits et à son levé GPS) ;
- refusées (plans aberrants, géoréférencements impossibles, objets autres qu'un puits,...).

Les résultats de ce travail ont été comparés aux listes d'avant 2005. Les occurrences liées à ces listes ont été classées de la même manière, avec en outre un « archivage technique » pour les doublons manifestes de mêmes sources.

Chaque occurrence est également caractérisée par sa précision, liée à l'échelle d'origine du plan, à sa qualité, à la qualité du géoréférencement ou du relevé sur terrain. Ces précisions sont, à la base, de 1 m pour les puits levés, 5 m pour les puits issus de plans à 1/1.000, de 20 m pour ceux issus des plans de demande et mutations de concession à 1/10 000 et de 50 à 100 m pour d'autres sources. Des variantes ont parfois été fixées par l'opérateur pour s'ajuster au mieux à la source.

Chaque puits et issue a reçu un numéro d'identification unique (six chiffres significatifs : les trois premiers étant le numéro de la concession, les trois derniers un numéro d'ordre). Chaque objet numéroté peut avoir une ou plusieurs positions.

En parallèle, la Région a mandaté à l'ASBL Service d'Etude et de Recherches des Ouvrages souterrains pour compléter la base de données géographiques de l'ISSeP en y associant les données techniques, administratives, géologiques et historiques à chaque ouvrage pour lequel de telles données étaient disponibles dans les sources consultées.

L'ensemble de ces données constituent la BD PIM (Base de Données Issues et Puits e Mines). Cette base de données évolue au fur et à mesure de travaux de terrain (retrait des concessions, découvertes en cours de travaux, accidents,...).

Seuls les puits validés comme « acceptés » sont utilisés pour la cartographie des aléas associés à ces ouvrages.

B. Puits de carrières souterraines

La tenue des plans de carrières souterraines n'est obligatoire que depuis 1935. Les carrières de ce type étaient déjà très peu nombreuses à cette époque.

Une cartographie des puits des carrières pour lesquels des plans d'exploitation ou des topographies existent a été réalisée, parallèlement au géoréférencement par le Service géologique de Wallonie de ces plans et topographies. La précision, comme celle des calages est de 1 à 5 m en général, parfois jusqu'à 10 m.

Il existe de très nombreux puits de forte section sur des carrières de « marbres » ou d'ardoises, qui ne sont pas connus mais peuvent encore être visibles sur terrain.

C. Puits d'exploitations superficielles de minerais de fer oxydés

Les puits – chantiers d'exploitation des gîtes superficiels de minerais de fer oxydés sont très nombreux, généralement groupés par paires, avec un champ d'action de quelques mètres autour. Leur section est très faible (0,5 à 1,5 m²). Il existe des plans de concessions les mentionnant (Boloy-Grancelles, Boninne) mais il est peu probable qu'ils aient été levés et reportés avec précision. Dans certains cas (Fraire), il est manifeste qu'ils ont été dessinés à la volée pour montrer le style d'exploitation. En outre, ces gîtes, exploités depuis des siècles, présentent des traces de très nombreux puits visiblement antérieurs aux plans du 19^{ème} siècle.

C'est pourquoi il est proposé de considérer la présence de ces puits non pas individuellement mais au travers de l'extension de l'enveloppe de l'exploitation dans le gîte comme précisé *infra*, au point 6.1.10. Les puits, remblayés et affaissés, ne sont qu'un aspect de cette masse déconsolidée.

6.1.2 Zone de présence possible d'anciens puits de mines

Il apparaît des données anciennes disponibles et des constats de terrains que les puits et issues repris sur les plans d'après 1802 (1822-23 en pratique), ne sont qu'une partie de ceux percés depuis au moins le milieu du 10^{ème} siècle (pour la houille).

Dans les bassins du Couchant de Mons et du Centre (Descamp, 1880), on décompte environ 1.100 puits antérieurs à 1800, soit autant que pour la période qui suit. Dans le bassin de Charleroi, on doit aussi compter 2 à 3 fois plus de puits que ceux connus. Enfin, dans la Basse-Sambre, à Namur, Andenne et surtout dans le Bassin de Liège, ce ratio passe à 3 à 5 : il y est parfois impossible de retrouver le puits mentionné sur un plan au milieu de ses semblables.

Il a donc été suggéré, en 2010, de considérer des « zones de présence possible d'anciens puits non connus sur plans », sur base des données géologiques (affleurement des veines et des couches et gîtes métallique et absence de recouvrement par des formations difficiles à traverser par les Anciens). La présence d'un puits est partout possible dans ces zones.

Ces puits anciens ont moins de 2 m² de section, sauf dans les bassins du Couchant de Mons et du Centre, où ils peuvent atteindre 3 m² de section depuis le 17^{ème} siècle (puits rectangulaire). Leur profondeur, sauf dans ces derniers bassins, est limitée par le niveau des galeries d'exhaure prises au niveau des plaines alluviales voisines (Sambre, Piéton, Meuse, Vesdre, Hoegne,...), soit 30 à 120 m.

6.1.3 Carrières souterraines de phosphate de Hesbaye (« phosphate riche »)

La cartographie des carrières souterraines de phosphate est basée sur les listes de parcelles qui ont fait l'objet d'une déclaration d'ouverture, en application de l'arrêté royal du 29 février 1852 sur les carrières souterraines.

La majorité des parcelles a été relevées dans un lot d'archives mis à disposition de la Direction de la Prévention des Pollutions (Cellule Mines 1999-2003) par le Gouvernement provincial de Liège. Ce lot comprenait les dossiers de déclaration de carrières souterraines. Ces dossiers, très peu fournis, comprenaient :

- la déclaration d'ouverture par l'exploitant, avec son identité, l'identification des parcelles cadastrales et de leur(s) propriétaire(s) ;
- le donné-acte du Gouverneur ;
- pour quelques rares dossiers, un rapport de visite des travaux et/ou une déclaration d'abandon.

Un autre lot de données, plus marginal, provenait de listes partielles de l'ex-Administration des Mines, complétant parfois le premier lot. Il s'agit de simples listes de parcelles. Nous ignorons la source primaire qui a permis d'établir ces listes.

Enfin, pour la période correspondant à la reprise d'activité lors de la Deuxième Guerre, il existe, parmi les archives conservées à la Direction des Risques industriels, géologiques et miniers, une série de plans parcellaires d'exploitation.

En 1999-2000, la Direction de la Prévention des Pollutions a construit une première base de données reprenant près de 5.000 parcelles, dont 3.800 pour les seuls phosphates de Hesbaye. La base de données a été restructurée en 2015 par le Service géologique de Wallonie.

Il est à noter que les archives de la Carte géologique de Belgique mentionnent quelques-unes de ces exploitations (avec une précision de l'ordre de 20 m).

En 2001, un marché a été confié à l'association momentanée Walphot-CIGER en vue d'établir une cartographie des carrières souterraines reprises dans la base de données, soit sur base des informations parcellaires.

En Hesbaye, faute de plans parcellaires d'époque, il a fallu se procurer auprès de l'Administration du Cadastre les feuilles du cadastre primitif. Leur géoréférencement sur le fond IGN des années 1970-80 n'a pas été sans difficultés, en particulier suite à la disparition de très nombreux chemins (opérations de remembrement et grands travaux d'infrastructures du 20^{ème} siècle). Il existe donc une certaine imprécision. Celle-ci a été réduite en 2018 par le Service géologique de Wallonie en recalant localement certains lots de parcelles par rapport à des voiries.

La cartographie globale retenue comprend deux types de zones :

- zone de présence certaine d'une carrière souterraine de phosphate (sous tout ou parties de la parcelle) :

- parcelle pour laquelle existe un plan de travaux, dont on ignore s'il s'agit de l'état final (précision : 1 à 5 m) ;
- parcelle pour laquelle existe une déclaration d'ouverture ou une autorisation (partant du principe que si un exploitant a effectué cette démarche administrative, il est logique qu'il l'ait mise en œuvre ; précision de positionnement de la parcelle d'époque : 5 à 10 m, selon les correspondances actuelles) ;
- zone de présence possible de carrières souterraines de phosphate (courbe enveloppe des zones de parcelles connues).

6.1.4 Marnières souterraines, carrières souterraines de craie et de tuffeau/silex

La quasi absence de traces administratives et de plans n'a pas permis de réaliser un inventaire exhaustif des carrières existantes de craie et tuffeau/silex. La quasi-totalité des données provient :

- des archives de l'ex-Administration des Mines, telles que transférées à la Région wallonne en 1986-87 ;
- des archives de la Carte géologique de Belgique à 1/40.000 (1890-1919) et de la Carte géologique de Wallonie à 1/25.000 (1990-1919), tenues à jour depuis la fin du 19ème siècle. Il s'agit de marnières dont le puits est localisé et d'effondrements constatés. Ces données sont localisées sur des cartes de l'Institut géographique militaire, en projection Bonne, à l'échelle du 1/20.000 (en projection Lambert 72, à 1/10.000 depuis 1990). Ces points ont été localisés par mesurages simple depuis des éléments de terrain. Leur précision est donc estimée à environ 20 m ;
- des dossiers d'archives du Service public de Wallonie, à l'occasion d'intervention sur des effondrements ou de découverte de carrières souterraines. Depuis 2014, ces dossiers sont suivis et archivés par la Cellule Avis et Conseils Effondrements. Depuis 2000 environ, les accidents font l'objet de descriptions et de repérages soignés ;
- d'une enquête de terrain menée sur 11 communes de Hesbaye, en 2008, par la Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains, sur commande de la Région wallonne (Cellule Sous-sol/Géologie) ;
- de recherches dans les archives de presse et dans la bibliographie papier (dont le travail de compilation de M. Caubergs, 1991) et internet ;
- des archives conservées par la S.A. Charbonnages du Borinage en liquidation.

Quelques dizaines de parcelles pour lesquelles une information était disponible (Bassin de Mons surtout et vallées du Geer et de la Basse-Meuse) ont été intégrées au marché qui a été confié à l'association momentanée Walphot-CIGER.

La nature des données disponibles a conduit à envisager de cartographier la présence de marnières, carrières de craie et carrières de tuffeau/silex selon la méthodologie suivante, prenant en compte le type de donnée, leur imprécision, les caractéristiques locales de l'exploitation, la géologie et la topographie :

- zone de présence certaine d'une carrière souterraine dans le périmètre :
 - périmètre enveloppe d'une carrière dont un plan à la fin des travaux ou une topographie actuelle est connue (précision 1 à 5 m) ;
 - parcelle pour laquelle existe un plan de travaux, dont on ignore s'il s'agit de l'état final (précision : 5 m) ;
 - parcelle pour laquelle existe une déclaration d'ouverture ou une autorisation (partant du principe que si un exploitant a effectué cette démarche administrative, il est logique qu'il l'ait mise en œuvre ; précision de

positionnement de la parcelle d'époque : 5 à 10 m, selon les correspondances actuelles) ;

- indice clair (effondrement, point décrit, indication bibliographique), affecté d'un cercle de 25 m de rayon, correspondant à l'extension caractéristique des marnières (auquel il faut ajouter l'imprécision de la donnée) ;
- zone de présence possible d'une ou plusieurs marnières dans le périmètre (rayon de 100 m autour de la zone de présence certaine, lorsque celle-ci est ponctuelle). Les marnières étant fréquemment groupées, la présence d'une marnière est suffisante pour estimer qu'une ou plusieurs autres sont présentes à 100 m autour ;
- zone de contexte favorable à la présence de marnières (rayon de 250 m autour de la zone de présence possible). Etant donné l'existence de marnières dans le secteur et au vu la géologie locale, les conditions étaient présentes pour en ouvrir une ou plusieurs.

Pour ce qui est des plans et topographies disponibles, le Service géologique de Wallonie poursuit leur numérisation et leur géoréférencement. Ce travail est néanmoins conséquent, faute de points de calage précis de qualité.

6.1.5 Carrières souterraines de craie phosphatée

Ces carrières souterraines, autour de Mons, ont été cartographiées, comme les carrières de craie, sur base :

- des archives de l'ex-Administration des Mines, telles que transférées à la Région wallonne en 1986-87 (dossiers administratifs et techniques, déclarations et autorisations sur base parcellaire, plans,...) ;
- d'archives privées détenues par D. Pacyna et par la S.A. Charbonnages du Borinage en liquidation ;
- des levés topographiques anciens et récents (dont les levés des carrières de la Malogne par la Direction de la Géotechnique, entre 2001 et 2018, avec l'aide de l'ASBL Malogne et de la Commission wallonne d'Etude et de Protection des Sites souterrains, et d'autres opérateurs non institutionnels). Le report sous GIS des plans anciens et récents a été assuré par D. Pacyna depuis 2011).

La nature des données disponibles a conduit à envisager de cartographier la présence de ces carrières selon la méthodologie suivante, prenant en compte le type de donnée, leur imprécision, les caractéristiques locales de l'exploitation, la géologie et la topographie :

- zone de présence certaine d'une carrière souterraine dans le périmètre :
 - périmètre enveloppe d'une carrière dont un plan à la fin des travaux ou une topographie actuelle est connue (précision : 1 à 5 m) ;
 - parcelle pour laquelle existe un plan de travaux, dont on ignore s'il s'agit de l'état final (précision : 5 m) ;
 - parcelle pour laquelle existe une déclaration d'ouverture ou une autorisation (partant du principe que si un exploitant a effectué cette démarche administrative, il est logique qu'il l'ait mise en œuvre ; précision de positionnement de la parcelle d'époque : 5 m) ;

Les parcelles pour lesquelles une information était disponible, parfois en prenant en compte les contours approchés des exploitations, ont été intégrées au marché qui a été confié à l'association momentanée Walphot-CIGER.

6.1.6 Marnières souterraines et puits à pierres du Brabant wallon

Les marnières et puits à pierres du Brabant n'ont pas laissé de traces administratives. On ne connaît d'elles que des effondrements repris dans les archives de la Carte géologique de Belgique, dans la presse et dans les dossiers du SPW. Une source d'information est la toponymie et la bibliographie géologique.

La cartographie globale retenue comprend deux types de zones :

- zone de présence certaine d'une marnière ou d'un puits à pierres sur base d'un indice clair (effondrement, point décrit, indication bibliographique), affecté d'un cercle de 50 m de rayon (imprécision de la donnée et extension caractéristique des marnières : 20 m) ;
- zone de présence possible de marnières ou de puits à pierres, sur base de la toponymie et de la géologie (zone d'affleurement des sables bruxelliens calcaires et des sables lédiens).

6.1.7 Carrières souterraines de pierre de Gobertange

Ces carrières souterraines centrées sur un puits sont limitées à la région de Gobertange. Il existe une cartographie approximative des puits, aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles, dans les archives de la Carte géologique de Belgique et de la Carte géologique de Wallonie.

La nature des données disponibles a conduit à envisager de cartographier la présence de ces carrières en deux zones :

- zone de présence certaine d'une carrière souterraine sur base d'un indice clair (effondrement, point décrit, indication bibliographique), affecté d'un cercle de 50 m de rayon (imprécision de la donnée et extension caractéristique : 25 m) ;
- zone de présence très probable d'une ou plusieurs carrières dans le périmètre (rayon de 50 m autour de la zone de présence certaine : ces carrières sont toutes regroupées sur un gisement limité, vidé).

6.1.8 Carrières souterraines de terres plastiques

A. En Condroz

Ces carrières souterraines ont exploité de vastes poches paléokarstiques (pluridécamétriques tant en largeur qu'en profondeur), à remplissage argilo-sableux au sein des calcaires primaires. Le gisement était exploité par galeries – chantiers ouverts dans les lentilles argileuses. En fin de chantier, on laissait la galerie se refermer sous l'effet de la plasticité de l'argile, tout en travaillant dans un autre secteur. Le sol descendait au fur et à mesure, suivant l'écrasement des chantiers. Au terme de l'exploitation, il ne restait plus de vides souterrains. En surface, une dépression profonde marquait le champ d'exploitation. Le gisement étant argileux, le « défoncé » était et est souvent occupé par un étang. Dans certains cas, ces dépressions ont été remblayées.

Ces carrières ne sont donc plus des carrières souterraines. Il s'agit soit d'étangs, soit de zones pouvant présenter des remblais de caractéristiques géotechniques médiocres « décharges » sous eau). L'effet de surface dominant pour les défoncés remblayés est le tassement.

La cartographie est fondée :

- sur le repérage des « défoncés » sur cartes IGM d'avant 1951, IGN 1970-80 et 1995 (précision 5 à 10 m) et sur les défoncés et dépressions de défoncés remblayés visibles sur les images LIDAR du SPW ;

- sur les parcelles pour lesquelles existe une déclaration d'ouverture ou une autorisation, croisée avec la présence de défoncé (précision : 5 à 10 m, sur feuilles cadastrales ozalid des années 1950, faciles à caler).

B. En Hainaut

Ces carrières souterraines ont exploité les formations argilo-sableuses du Groupe du Hainaut (*Wealdien*). L'exploitation était menée par puits droits de 3 à 6 m de diamètre et par puits-bouteilles. Ces puits étaient remblayés par les déchets des puits voisins et se sont refermés sur eux-mêmes, laissant des dépressions marécageuses en surface. Leur localisation précise n'est pas connue, faute de plans, car considérées comme carrières à ciel ouvert.

Il n'existe donc plus d'ouvrages souterrains mais des zones de remblais de mauvaises caractéristiques géotechniques. L'effet de surface dominant à l'aplomb de ces « puits » est le tassement.

La cartographie a été réalisée sur base parcellaire (précision 5 à 10 m).

6.1.9 Carrières souterraines de sable d'Havré

Ces carrières ont exploité une couche, d'environ 2 m d'épaisseur, de sables continentaux landéniens par tailles. Les chantiers sont considérés comme écrasés. Les cavités souterraines n'existent plus.

La cartographie est fondée sur les parcelles pour lesquelles existe une déclaration d'ouverture (précision : 5 à 10 m).

6.1.10 Gîtes de minerais de fer oxydés

La Cellule Sous-sol/Géologie avait commandé en 2008 à l'Université de Liège (J. Denayer) une cartographie des gîtes de minerais de fer, sur base des données disponibles (cfr. Denayer, 2011).

Une partie des données était de nature bibliographique (depuis les monographies des années 1830 au travail de A. Delmer de 1912). Les données cartographiques se basent :

- sur la cartographie de Rucloux (1840, 1/40.000, sur fonds Chanlaire et Capitaine) ;
- sur la cartographie de Franquoy pour la province de Liège (1869, 1/100.000) ;
- sur la cartographie de Dejaer pour la province de Namur (1870, 1/40.000 sur fonds type Chanlaire et Capitaine), se basant lui-même sur Rucloux ;
- sur la Carte géologique de Belgique à 1/40.000 (fonds IGM en projection Bonne, 1890-1919), où les gîtes se basent sur les travaux précédents et sont représentés avec une symbologie qui les fait apparaître plus larges qu'en réalité ;
- sur la cartographie de A. Delmer (1912-13), à 1/100.000, 1/40.000 et 1/20.000 (oligiste), basée sur les travaux précédents (sur fonds adaptés des fonds IGM).

Ces gîtes ont été cartographiés sur terrain grâce aux exploitations et recherches que les auteurs ont pu soit observer, soit se faire indiquer comme ayant existé par le passé. Il ne s'agissait toutefois pas d'une cartographie des exploitations mais bien d'une cartographie géologique. Les corps minéralisés ont été interprétés et extrapolés à partir des données de terrain, dont les travaux connus dans les gîtes.

La précision de ces données est donc estimée à 50 à 100 m, avec parfois des discordances d'extension ou angulaires entre les différentes occurrences d'un gîte. L'imprécision apparaît souvent très bien avec les limites des formations géologiques que devrait épouser le gîte, limites telles que cartographiées sur la Carte géologique de Wallonie. Un travail de

validation et de mise en cohérence est réalisé progressivement par le Service géologique de Wallonie.

L'ancienneté (anté gallo-romaine) de l'exploitation du minerai de fer en Belgique, conjuguée à la méthode d'exploitation par puits-chantiers rapprochés, à développement latéral limité, conduisent à considérer les gîtes connus comme étant a priori tous exploités en tout ou en partie et comme représentant des périmètres de caractéristiques géotechniques médiocres, avec, pour effet de surface dominant, le tassement, consécutifs à des phases anciennes d'affaissement, voire d'effondrement. En effet, le gîte, hétérogène au départ, souvent d'origine karstique, a été troué et remué dans la masse, avec des remblais pris *in situ*. Les puits, d'un diamètre très faible, sans revêtement durable (aires et fascines), remblayés et affaissés, ne sont qu'un aspect de cette masse déconsolidée.

6.1.11 Gîtes de minerais métalliques

La Cellule Sous-sol/Géologie avait commandé en 2008 à l'Université de Mons (Th. Martin) une cartographie des gîtes métalliques sur base des données disponibles.

Une partie des données était de nature bibliographique (depuis les monographies des années 1830 au travail de A. Delmer de 1912). Les données cartographiques se basent :

- sur la Carte géologique de Belgique à 1/40.000 (fonds IGM en projection Bonne, 1890-1919), où les gîtes se basent sur les travaux précédents et sont représentés avec une symbolologie qui les fait apparaître plus larges qu'en réalité ;
- sur les plans miniers des exploitations menées sur certains de ces gîtes ;
- sur divers travaux comportant une cartographie.

La précision de ces données est donc estimée à 5 à 100 m (5 à 50 m pour la majorité des occurrences), avec parfois des discordances d'extension ou angulaires entre les différentes occurrences d'un gîte. Il existe une correspondance avec certains gîtes de fer (« chapeau de fer »).

6.1.12 Autres carrières souterraines

Pour les autres carrières souterraines (calcaires, grès, « marbres », ardoises, coticule,...), la cartographie est fondée :

- sur des levés topographiques anciens et récents (précision 1 à 10 m) ,
- sur les parcelles pour lesquelles existe une déclaration d'ouverture ou une autorisation, croisée avec la présence de défoncé (précision : 5 à 10 m, sur feuilles cadastrales ozalid des années 1950, faciles à caler) ;
- sur des études comportant des recensements et des cartes à 1/25.000 (précision : 25 à 50 m).

6.2 Objets non considérés par la méthodologie

Dans la suite de l'étude, il est considéré d'exclure certains types d'exploitations du sous-sol de la réflexion car ils ne font pas partie des objets souterrains. Sont concernés :

- les carrières de terres plastiques du Condroz et du Hainaut,
- les exploitations de gîtes métalliques oxydés,
- les carrières souterraines de sables de Havré.

Ces objets sont en réalité soit des excavations peu profondes, exploitées à ciel ouvert, soit des affaissements importants à l'aplomb de carrières au départ souterraines écrasées sur elles-mêmes, et qui ont été par la suite remblayées de matériaux allochtones. L'emprise de ces objets est plutôt à considérer comme des zones pourvues d'un sous-sol aux propriétés géotechniques médiocres : le tassement différentiel induit par ces matériaux de remblais est en fait le seul effet à redouter dans ces zones.

6.3 Données relatives aux contextes

6.3.1 Géologie

Les données des cartes géologiques de Belgique et de Wallonie ont été utilisées pour dresser le contexte géologique local des objets souterrains.

Outre les données communément accessibles, l'ISSeP a procédé au relevé des données de sondage et des indications d'épaisseur de terrains superficiels, directement reportées sur les cartes géologiques de Belgique.

Cela a permis de créer une couche cartographique situant tous ces points de description géologique, chacun associé à un log des terrains traversés avec indication de leur épaisseur respective.

À partir de 2018, l'ISSeP s'est vu confier par le Service géologique de Wallonie une mission d'appui technique visant la valorisation numérique des descriptions géologiques d'affleurements et de sondage. Ces points sont collectés depuis 1890 par le Service géologique de Belgique et associés à une localisation cartographique.

On estime le nombre de points de description situés en Wallonie à 160 000. Ces points viendront compléter et densifier la couche cartographique des terrains superficiels créée pour ce travail.

Le renforcement de la qualité de cette donnée de contexte permet d'augmenter la qualité et la justesse des évaluations d'aléas.

6.3.2 Hydrogéologie

Les données de la Carte hydrogéologique de Wallonie ont été utilisées pour identifier les aquifères importants et leur niveau piézométrique moyen.

Par contre, les nappes d'eau hébergées dans les terrains superficiels ne sont pas toujours documentées. Mais une caractérisation de la perméabilité hydraulique de ces terrains, en niveaux perméables et imperméables, permet de proposer quelques hypothèses sur l'existence de nappes perchées et/ou temporaires

6.3.3 Données des cartes géotechniques de l'Institut géotechnique de l'Etat

Ces cartes géotechniques ont été réalisées de 1975 à 1987 à l'initiative de l'Institut géotechnique de l'Etat du Ministère national des Travaux Publics et avec la contribution de plusieurs universités : UCL, ULB, ULg, RUG.

Ces cartes décrivent précisément les terrains supérieurs du sol et du sous-sol concernés par de potentiels projets de construction de génie civil. Déterminant de nombreux paramètres géotechniques, ces cartes proposent une zone de constructibilité et attirent l'attention sur les paramètres significatifs en fonction des secteurs identifiés.

Cependant, ces cartes très documentées couvrent une faible surface de territoire à l'échelle régionale wallonne. Ces cartes sont uniquement disponibles pour les grands centres urbains : Mons, Charleroi et Liège.

De plus, ces cartes ont été établies à partir de données d'essais géotechniques collectées jusqu'en 1986. Depuis lors, de nombreux aménagements ont eu lieu apportant de nouvelles données et modifiant la topographie actuelle de certaines zones urbaines cartographiées.

Malgré la grande qualité de ces travaux, se pose de plus en plus la question de l'actualisation des données issues de ces cartes. C'est pourquoi elles seront ponctuellement utilisées aux endroits où elles sont disponibles.

6.3.4 Données d'essais géotechniques in-situ

En 2013, la Direction de la Géotechnique du Service public de Wallonie a autorisé l'ISSeP à accéder à ses archives pour en valoriser les données d'essais géotechniques in-situ contenues dans ses dossiers d'études.

Les données des essais CPT (Cone Penetration Test) ont été principalement visées car elles fournissent une description précise du comportement du sol et du sous-sol en fonction de la profondeur. Une mesure de la force à la pointe est mesurée tous les 20 cm, jusqu'à la fin de l'essai.

Les données de sondage ont aussi été reprises afin de compléter les mesures CPT.

Environ 6 800 essais CPT ont été récupérés en juillet 2013 depuis les bases de données de la Direction de la Géotechnique pour en constituer une couche géographique.

Ces données ont été couplées aux points de descriptions géologiques pour documenter une proto-carte des formations superficielles, préalable à la cartographie des zones d'aléas.

Ces données sont aussi diffusées via les applications cartographiques du Service public de Wallonie :

- Le site internet public « CIGALE – Les thématiques sous-sol » depuis 2013,
- Le site intranet « PortailRoutes » de la DGO1 depuis 2017.

La poursuite de la valorisation de ces essais fait l'objet d'un projet spécifiquement conclu entre la Direction de la Géotechnique et l'ISSeP.

6.3.5 Données pédologiques

Les données de la Carte numérique des sols de Wallonie ont été utilisées pour appréhender l'épaisseur des terrains meubles superficiels grâce à la notion de texture définie dans la nomenclature de caractérisation pédologique des sols.

Cela a permis de mettre en évidence les zones du territoire comportant un sol soit plutôt meuble, soit avec une très faible épaisseur de terrains meubles.

Ces informations ont été intégrées à la proto-cartographie des terrains superficiels

Ces informations demandent à être complétées par les données de sondages géologiques, les caractérisations de matériaux parents (à réaliser dans le cadre du projet de cartographie des sols de Wallonie menée à la Faculté des sciences agronomiques de l'Université de Liège à Gembloux) et de la mise à jour des données du projet Aardewerk.

6.3.6 Proto-cartographie des formations superficielles

Cette proto-cartographie est le fruit de la réunion des données issues :

- des points de descriptions géologiques, directement mentionnées sur la Carte géologique de Belgique,

- des données brutes des essais CPT réalisés par la Direction de la Géotechnique du Service public de Wallonie depuis 2003,
- des données tirées de la carte numérique des sols de Wallonie, et de certains logs de sondage associés

Cette carte est essentielle pour l'évaluation de l'intensité des effets redoutés en surface lors de l'estimation de l'aléa. Cette carte permet de connaître la nature et l'épaisseur locale des terrains meubles.

Cependant, le cadre de ce travail a obligé à utiliser les données existantes et à limiter leur valorisation au strict minimum. Il est donc évident que cette proto-cartographie n'a pas la prétention d'être une véritable cartographie des formations superficielles car elle ne rencontre pas les exigences qualitatives d'une telle carte, scientifiquement validée et prête à être diffusée publiquement. Cette tâche représente un projet colossal à lui seul qui sort largement du cadre de ce travail. C'est pourquoi il sera question dans la suite de ce document de « proto-cartographie des formations superficielles », soit une cartographie simplifiée.

L'apport qualitatif d'une cartographie réalisée par un tel futur projet, serait incontestable sur la qualité et la justesse des cartographies d'aléas de mouvement de terrains.

Un groupe de travail doit se monter spécifiquement à ce sujet à partir de 2018 à l'initiative du Comité de gestion des Sols de la DGO3, l'instance de consultation technique réunissant tous les services de la DGO3 actifs dans l'étude du sol et du sous-sol. Ses travaux viseront la proposition d'un référentiel de données commun entre les données issues de la géologie, l'hydrogéologie, la géotechnique, la pédologie et l'étude des sols potentiellement contaminés ; et leur mutualisation dans un système de données commun. L'établissement de ce référentiel commun sera le premier apport qualitatif et quantitatif à la proto-cartographie des formations superficielles.

7 MÉTHODE DE CALCUL POUR UN EFFONDREMENT LOCALISÉ

7.1 Les phénomènes et mécanismes concernés

Le développement d'un cratère d'effondrement en surface est l'aboutissement de deux mécanismes successifs (voir Figure 6) :

- le développement d'un fontis, à partir d'une cavité souterraine vide, et sa remontée vers la surface jusqu'à l'éventuelle création d'un cratère d'effondrement primaire aux parois bien redressées (voir 4^{ème} illustration de la Figure 12) ;
- le développement d'un cratère d'effondrement secondaire aux pentes plus inclinées (voir 5^{ème} illustration de la Figure 12).

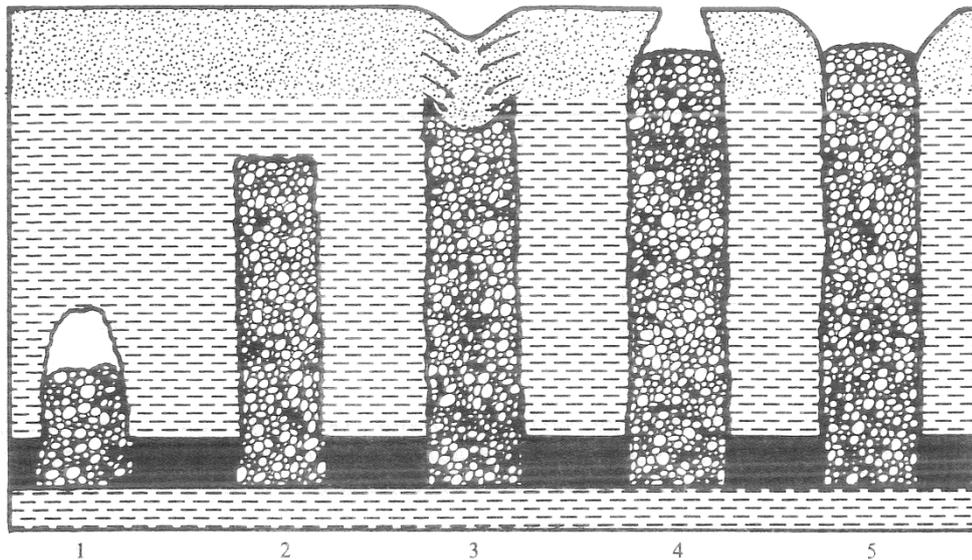


Figure 12 - Développement et remontée d'un fontis au départ d'une cavité souterraine : 5 situations possibles. 1 : le fontis est en cours de remontée ; 2 : le fontis est auto-comblé ; 3 : le fontis atteint les formations superficielles ; 4 : le fontis provoque un cratère primaire ; 5 : le fontis provoque un cratère secondaire (Whittaker & Reddish, 1989)

7.2 La remontée de fontis

7.2.1 Principe et description du mécanisme

L'origine de tout effondrement localisé, ou fontis, réside dans l'existence et la rupture mécanique d'une cavité souterraine initialement vide. Cette cavité peut exister durablement ou apparaître temporairement.

Sous certaines conditions d'instabilité, les bancs de roches qui constituent le toit de la cavité commencent ensuite à s'endommager, se fracturer et à s'ébouler. Les matériaux éboulés remplissent la cavité sous la forme d'un tas de blocs rocheux et la cavité résiduelle progresse vers la surface. C'est le démarrage de la remontée d'une cheminée de fontis (voir Figure 6, p 26).

En s'ébouillant, ces matériaux augmentent le volume qu'ils avaient lorsqu'ils étaient en place dans le toit de la cavité : c'est le foisonnement. Avec les éboulements de toit successifs, ce

phénomène va contribuer à la réduction du volume de la cavité vide résiduelle, au fur et à mesure de sa remontée vers la surface.

Si tous les éboulis arrivent à remplir la cavité résiduelle, il n'y a plus de volume de vide et la cinétique de la cheminée de fontis est arrêtée. On parle dans ce cas d'auto-comblement.

Si l'auto-comblement ne se produit pas avant que la cavité résiduelle approche trop près de la surface du sol, il y aura un effondrement sous la forme d'un cratère. Dans un premier temps, ce cratère apparaissant soudainement aura les bords assez redressés selon les propriétés des formations superficielles : il s'agit du cratère primaire. Exposées aux conditions météorologiques et sans traitement de stabilité, les parois de ce cratère primaire vont s'ébouler à leur tour et le cratère s'ouvrir d'avantage pour prendre à terme la forme d'un entonnoir : il s'agit du cratère secondaire.

Le volume du cratère primaire correspondra souvent au volume de la cavité résiduelle qui sera arrivé à la surface. Le volume du cratère secondaire a de toute façon une valeur maximale imposée par l'épaisseur locale des terrains superficiels.

L'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé prendra donc en compte :

- une estimation des volumes de vides que les objets souterrains peuvent comporter ou créer,
- la mise en place d'une remontée de fontis et l'estimation de la distance de cette remontée (modèle INERIS),
- les paramètres des matériaux éboulés,
- l'épaisseur locale des terrains superficiels et leurs paramètres physiques.

7.2.2 Modélisation

Afin de modéliser ce phénomène, l'approche et le modèle INERIS ont été utilisés.

Les paramètres ci-après concernent la méthode INERIS de modélisation de la remontée de fontis, même si certains éléments du modèle de Whittaker & Reddish sont aussi été utilisés.

Le point fort de cette modélisation réside dans la facilité de ses différentes étapes de calcul, décrites ci-après. Elles consistent à évaluer des volumes de matériaux et de vides, de formes différentes (prismatique, cylindrique, conique, tronconique...), et à les mettre en correspondance.

Elle identifie notamment le volume disponible et le volume mobilisable, tous deux présentés ci-après.

A. Le volume disponible

Le volume de vide initial est celui de la cavité originelle qui va à terme créer la remontée d'un fontis. Il peut s'agir :

- d'un ouvrage souterrain (tronçon de galerie, puits, chambres de carrières souterraines) laissé durablement vide ;
- d'un vide créé dans une masse de remblai suite à des mouvements ou de l'altération de ce dernier, le vide pouvant être franc ou être le résultat de la somme de plusieurs petits vides diffus ;
- d'une cavité naturelle qui se crée par altération ou mouvement de matériau (poches karstiques).

Il s'agit du volume de vide « disponible » pour la remontée de fontis.

Ce volume est parfois accessible et connu, mais pas toujours. Dans ce cas, des hypothèses basées sur la bibliographie, les dossiers, les études de cas similaires et le retour d'expérience sont alors nécessaires.

Lors de la rupture du toit de cette cavité, les éboulis vont commencer à remplir le volume de vide disponible :

- si le volume se réduit à une chambre, les éboulis vont y tomber afin de former un tas conique qui occupera à terme toute la chambre. Le volume disponible V_{disp} correspond au volume V_0 de la chambre, considérée de forme parallélépipédique :

$$V_{disp} = V_0 = l . L . h$$

où

- V_{disp} est le volume disponible,
- V_0 est le volume de la cavité originelle,
- l est la largeur de la chambre constituant la cavité originelle,
- L est la longueur de la chambre constituant la cavité originelle,
- h est la hauteur de la chambre constituant la cavité originelle.

- s'il existe des extensions latérales à cette chambre, comme dans un tronçon de galerie, un carrefour de galeries ou un croisement de galerie dans une carrière souterraine en chambres et piliers, les éboulis vont aussi les remplir partiellement par déversement/débordement du tas conique vers ces extensions. Le volume disponible correspondra au volume de la chambre additionnée des pans latéraux du tas déversés dans les extensions (voir les 3^{ème} et 4^{ème} illustrations de la Figure 13).

Pour modéliser le volume d'éboulis tombés dans ces extensions, Whittaker & Reddish considèrent le tas comme un volume prismatique (Figure 15) alors que l'INERIS considère que le tas d'éboulis reste conique et qu'il est simplement limité par les parois des galeries (Figure 14) ou des piliers délimitant la chambre (Figure 15).

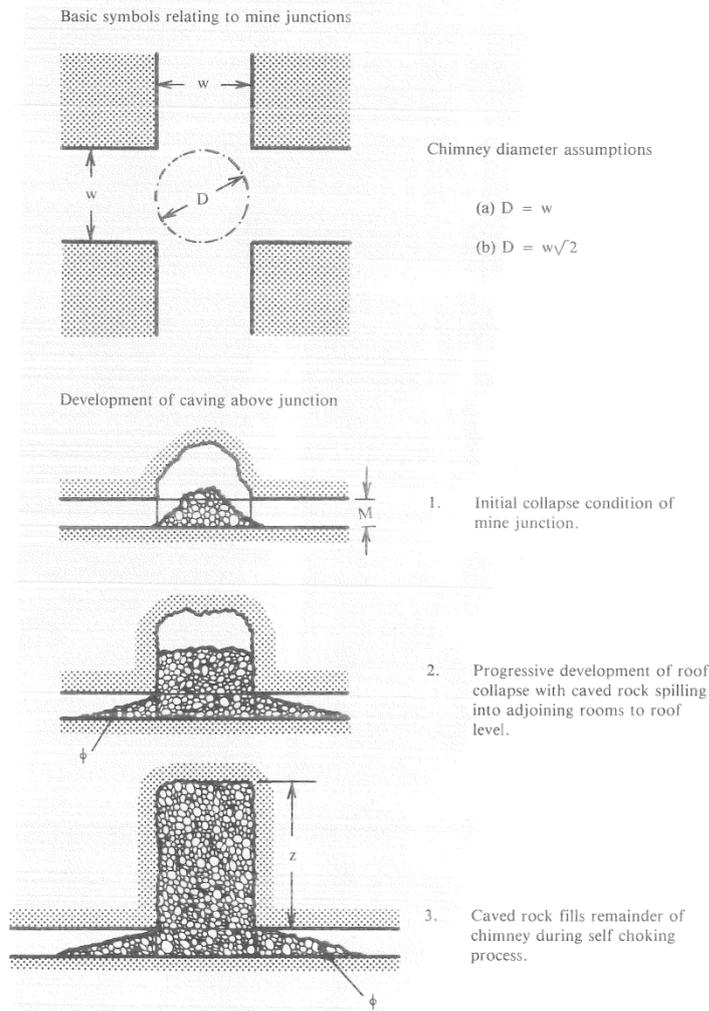


Figure 13 – Principes de la modélisation de la remontée de fontis au départ du croisement de deux galeries, selon la méthode de Wittaker & Reddish (Whittaker & Reddish, 1989)

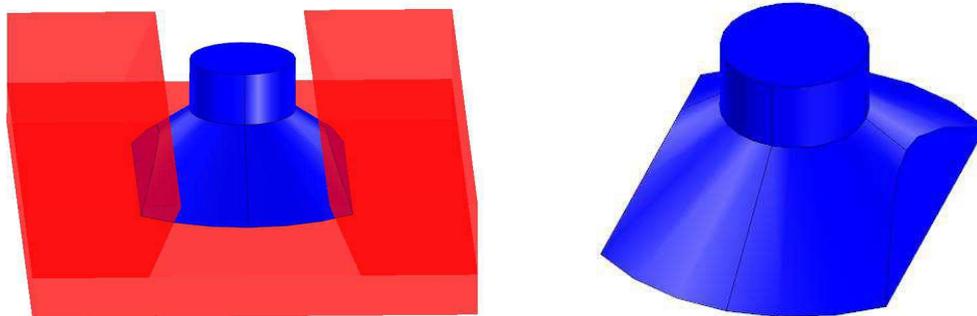


Figure 14 – Modèle INERIS pour la remontée de fontis : Modélisation du volume d'éboulis se répandant dans une galerie trapézoïdale et interférant avec les parois voisines (Didier et al, 2010).

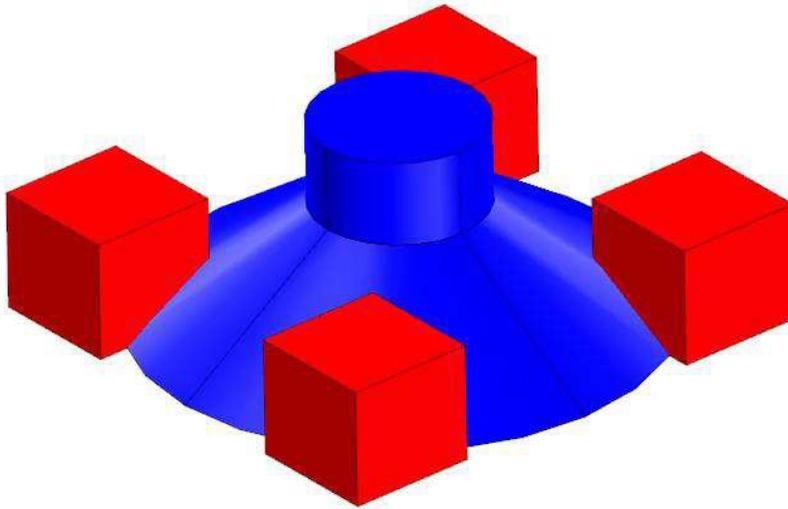


Figure 15 – Modèle INERIS pour la remontée de fontis : Modélisation du volume d'éboulis se répandant dans la chambre d'une exploitation en chambres et piliers, et interférant avec les piliers voisins (Didier et al, 2010).

Pour la suite des calculs, il a été choisi de modéliser le volume des éboulis présents dans la chambre et les extensions d'après le modèle Whittaker & Reddish car, au regard des volumes de vides dans les exploitations wallonne, la différence géométrique entre les deux modèles peut être négligée. Le volume disponible V_{disp} est donc donné par :

$$V_{disp} = \frac{h}{2 \cdot \tan \alpha} (2 \cdot l \cdot L \cdot \tan \alpha + n \cdot l \cdot h + m \cdot L \cdot h)$$

- où
- α est l'angle de talus naturel des éboulis se déversant dans les extensions,
 - n est le nombre d'extensions attenantes à la chambre initiale et de largeur l ,
 - m est le nombre d'extensions attenantes à la chambre initiale et de largeur L .

Il arrive parfois que le volume V_{disp} ne soit pas connu d'avance, ne soit pas calculable ou soit fixé arbitrairement sur base du retour d'expérience ou de données accidentologiques. Le volume de l'effondrement en surface est dès lors donc la seule information réelle disponible.

B. Le volume mobilisable

Les deux modèles du volume disponible présentés ci-avant, considèrent tous deux une section circulaire pour le volume créé dans le toit de la cavité par la chute des éboulis. Cette section circulaire est la base de la cheminée de fontis qui est considérée de forme cylindrique (conformément à ce qui est observé sur terrain). Ce cylindrique de volume V_{cf} se caractérise par :

- un diamètre (équivalent) correspondant à la largeur de la cavité, chambre ou galerie initiale,

- une hauteur correspondant à la profondeur du toit de la cavité par rapport à la surface.

Ce volume correspond au volume de tous les bancs géologiques du toit qui se mouvront, tour à tour, pour remplir successivement la cavité résiduelle lors de la remontée du fontis vers la surface. Il correspond au volume mobilisable.

$$V_{mob} = V_{cf} = \pi \cdot R_{cf}^2 \cdot z$$

où V_{mob} est le volume mobilisable,
 V_{cf} est le volume de la cheminée de fontis,
 z est la profondeur du toit de la cavité originelle,
 R_{cf} est le rayon équivalent de la cheminée de fontis et $R_{cf} = \frac{l+L}{4}$.

C. La remontée du fontis jusqu'en surface

Le fontis remonte vers la surface tant qu'il subsiste un volume disponible de vide à combler. Au fil de sa remontée, ce volume disponible diminue grâce au foisonnement des éboulis formés par les terrains géologiques sus-jacents traversés par le fontis. Lorsque le volume disponible disparaît, la remontée du fontis s'arrête dans un état d'équilibre métastable : c'est l'auto-comblement (voir 2^{ème} illustration de la Figure 12).

Pour atteindre cet état d'auto-comblement, la condition suivante doit être remplie :

$$V_{mob} \cdot (K_{fe} - 1) \geq V_{disp}$$

où K_{fe} est coefficient de foisonnement des matériaux éboulés.

L'auto-comblement est obtenu dès que le fontis est remonté dans sa cheminée sur une distance suffisante pour permettre le comblement total du volume disponible par les matériaux éboulés dans la cheminée de fontis.

La distance maximale $z_{auto-comblement}$ que doit parcourir le fontis le long de sa cheminée avant d'atteindre l'auto-comblement, s'obtient à partir de l'inéquation précédente :

$$V_{cf \text{ auto-comblement}} \cdot (K_{fe} - 1) = V_{disp}$$

$$\pi \cdot R_{cf}^2 \cdot z_{auto-comblement} \cdot (K_{fe} - 1) = V_{disp}$$

$$z_{auto-comblement} = \frac{V_{disp}}{\pi \cdot R_{cf}^2 \cdot (K_{fe} - 1)}$$

À partir d'un fontis qui démarre d'une profondeur z et à partir d'un volume disponible V_{disp} :

- soit il s'auto-comble avant d'atteindre la surface (voir 2^{ème} illustration de la Figure 12) si

$$z \geq z_{auto-comblement} + z_{fm}$$

où z_{fm} est l'épaisseur des terrains superficiels meubles et/ou altérés en surface ;

- soit il perce au jour et un cratère d'effondrement primaire apparaît en surface (voir 4^{ème} illustration de la Figure 12) si

$$z < z_{auto-comblement} + z_{fm} .$$

Le fontis peut déjà provoquer un mouvement de terrain dès qu'il atteint la base des formations superficielles meubles (voir 3^{ème} illustration de la Figure 12). C'est le terme z_{fm} est ajouté aux deux inégalités précédentes.

Dans le cas du développement d'un cratère d'effondrement, son volume de vide V_r est celui qui arrive en surface et qui a été partiellement comblé par la dilation des terrains éboulés, traversés par le fontis. Ce volume est de :

$$V_r = V_{disp} - \pi \cdot R_{cf}^2 \cdot z \cdot (K_{fe} - 1)$$

où V_r est le volume de vide résiduel, partiellement comblé par la dilation des terrains éboulés, traversés par le fontis les terrain.

Cette relation permet aussi de connaître le volume de vide résiduel V_r' après une remontée du fontis sur une distance de z' (Figure 16) :

$$V_r' = V_{disp} - \pi \cdot R_{cf}^2 \cdot z' \cdot (K_{fe} - 1)$$

où z' est la distance séparant le toit de la cavité originelle et le toit de la cavité résiduelle.

En égalant z' à la profondeur z de la cavité originelle, on obtient directement le volume résiduel qui se retrouve en surface pour former le cratère d'effondrement.

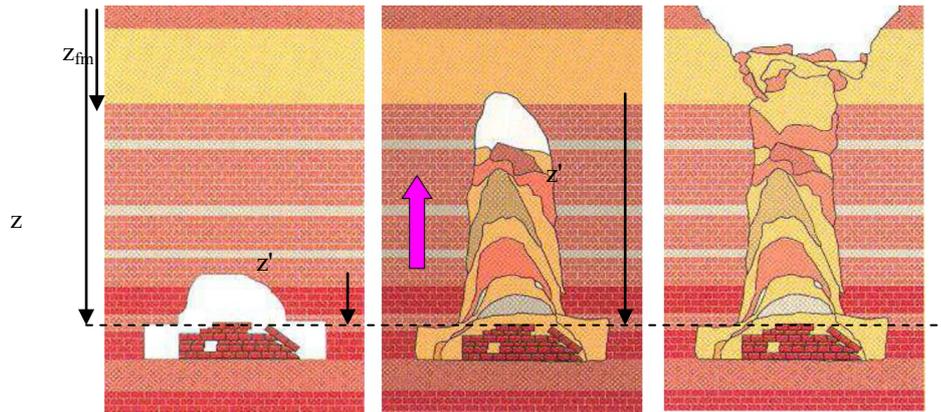


Figure 16 – Modélisation de la remontée de fontis : illustration des grandeurs z et z' (adapté de Didier et al, 2010).

7.3 Le cratère d'effondrement

7.3.1 Le cratère primaire

Le cratère d'effondrement primaire se forme en surface à partir d'un volume de vide V_r . Dans la quasi-majorité des accidents, ce volume V_r est la seule grandeur mesurable ou connue.

Par contre, la modélisation d'un éventuel effondrement provoqué par la remontée d'un fontis, après un parcours de z mètres, permet de calculer la valeur de V_r , comme présenté au chapitre 7.2.2.

Supposé de forme tronconique inversée, aux parois latérales quasi-verticales, le cratère primaire se développe dans les formations superficielles, tout au sommet de la cheminée de fontis. Son rayon et sa profondeur sont donnés par les relations suivantes :

$$r_{cratère1} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_r}{\pi \cdot K_{fm} \cdot \tan \beta_1} + R_{cf}^3}$$

$$z_{cratère1} = (r_{cratère1} - R_{cf}) \cdot \tan \beta_1$$

où β_1 est l'angle d'inclinaison des parois du cratère primaire formé dans les terrains superficiels, compté depuis l'horizontale ;

K_{fm} est le coefficient de foisonnement des formations superficielles s'éboulant dans le vide disponible et formant le cratère secondaire.

L'angle β_1 dépend de la nature et de l'épaisseur des terrains superficiels. D'après les références bibliographiques, le retour d'expérience et l'avis des experts impliqués dans ce travail, il varie entre 40° pour des terrains sableux non saturés en eau et 85° (parois quasi-verticales) pour les terrains limoneux contenant une faible saturation en eau. Cette valeur de 85° est très souvent rencontrée en Wallonie et est adoptée comme typique du cratère d'effondrement primaire.

Pour une première approximation, β_1 peut même être fixé à 90° , ce qui revient à considérer un cratère d'effondrement primaire de forme cylindrique et de volume V_r .

7.3.2 Le cratère secondaire

Après une exposition prolongée aux conditions atmosphériques et en l'absence de traitement, ce cratère d'effondrement primaire va évoluer vers une forme conique renversée (entonnoir) tout en conservant le même volume. Il devient alors un cratère d'effondrement secondaire, dont les rayon et profondeur sont donnés par :

$$r_{\text{cratère2}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_r}{\pi \cdot K_{fm} \cdot \tan \beta_2}}$$

$$z_{\text{cratère2}} = r_{\text{cratère2}} \cdot \tan \beta_2$$

où β_2 est l'angle de talus naturel des terrains superficiels.

L'angle β_2 sera fonction de l'épaisseur et de la nature des terrains superficiels, ainsi que de leur saturation en eau. Apparié à l'angle de frottement interne ϕ des matériaux (voir Tableau 12), sa valeur est nettement inférieure à β_1 et est comprise entre 25 et 40°.

Tableau 13: Exemples de valeurs types de l'angle de frottement interne et de la cohésion utilisées pour plusieurs formations constitutives du sol (Source : INERIS)

	Types	ϕ (°)	C (MPa)
Sols pulvérulents	Sable très compact	35 – 40	0
	Sable compact	30 – 35	0
	Sable peu compact	25 – 30	0
	Gravier	30 – 40	0
Sols cohérents	Sable argileux	30 – 35	0,01 – 0,03
	Limon	25 – 30	0,02 – 0,05
	Argile sableuse	24 – 28	0,02 – 0,05
	Argile grasse	15 – 24	0,2 – 1
	Marne	16 – 25	0,02 – 0,2
	Vase	20 – 22	0 – 0,12

Pour la suite des calculs, β_2 est considéré à 30°. Il s'agit d'une approche très sécuritaire car, dans la réalité, de telles valeurs sont rarement atteintes. En fait, contrairement au flanc libre d'un talus ou la paroi d'une falaise, le cratère « se referme sur lui-même ». Ses parois forment une couronne de stabilité qui renforce la stabilité à la façon d'un soutènement de puits. De plus, un certain intervalle de la saturation en eau de ces matériaux permet d'augmenter leur angle de frottement interne à des valeurs proches de 40°, voire supérieures.

7.3.3 Dimensions maximales du cratère secondaire

Les relations présentées ci-avant déterminent les dimensions d'un cratère d'effondrement secondaire se développant en surface. Cependant, les dimensions maximales de ce cratère sont bornées par l'épaisseur locale des terrains superficiels z_{fm} et par la capacité du volume

de vide résiduel, atteignant à la surface, à absorber la totalité des terrains superficiels mobilisables qui s'y écroulent (voir Figure 17).

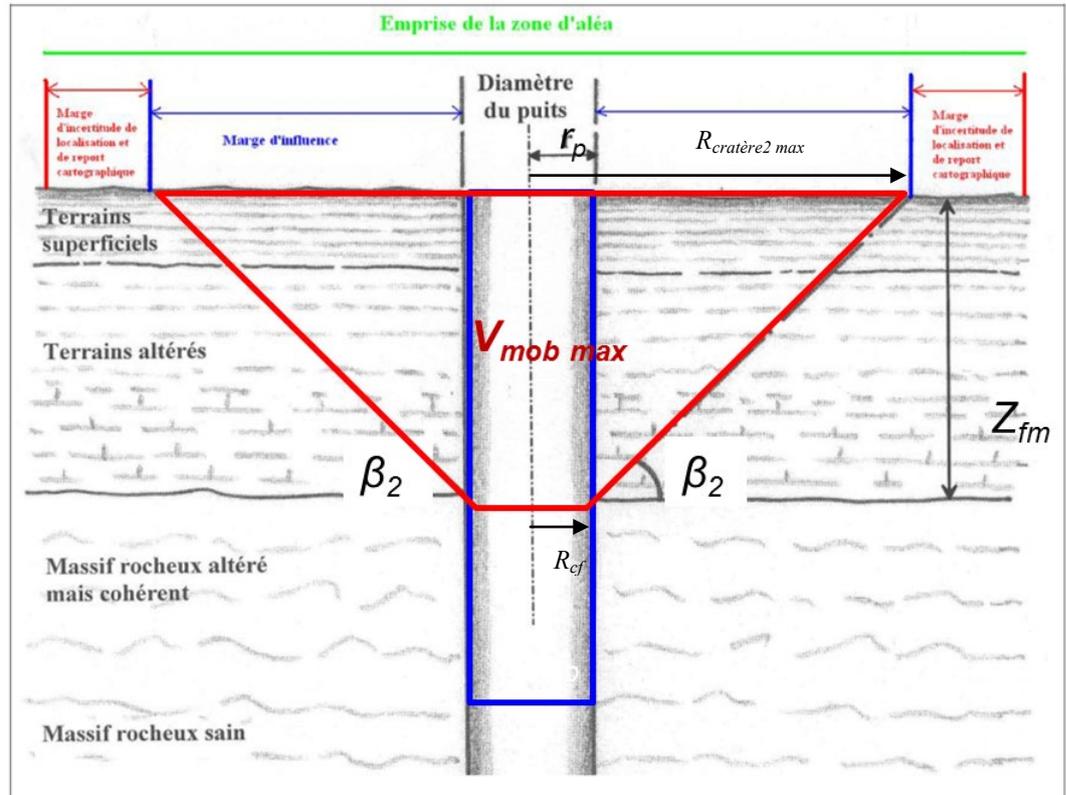


Figure 17 - Illustration du volume mobilisable maximum associé au cas du puits et correspondant au développement du cratère secondaire maximal (adapté de INERIS).

Ce cratère secondaire maximum est assimilable à un tronc de cône renversé dont la hauteur $z_{cratère2\ max}$ correspond à z_{fm} , le rayon inférieur est celui de la cheminée de fontis R_{cf} , et le rayon supérieur $r_{cratère2\ max}$ est donné par :

$$r_{cratère2\ max} = R_{cf} + \frac{z_{fm}}{\tan \beta_2}$$

avec

$$z_{cratère2\ max} = z_{fm}$$

Le volume de ce cratère maximum développé uniquement dans les formations superficielles se calcule alors par :

$$V_{cratère2\ max} = \frac{\pi}{3} \cdot z_{fm} \cdot (r_{cratère2\ max}^2 + R_{cf}^2 + r_{cratère2\ max} \cdot R_{cf})$$

Si $V_r > V_{cratère2\ max}$, cela signifie que le volume de terrains meubles superficiels contenus dans le cratère secondaire maximum est insuffisant pour combler le volume de vide résiduel qui a percé au jour.

Le volume $V_r - V_{cratère2\ max}$ se retrouve alors dans la cheminée de fontis, juste sous la base du cratère maximum. Le rayon $r_{cratère2\ max}$ du cratère secondaire maximum ne change pas, mais sa profondeur $z_{cratère2\ max}'$ devient :

$$z_{cratère2\ max}' = z_{fm} + \frac{V_r - V_{cratère2\ max}}{\pi R_{cf}^2}$$

Les relations relatives à la cheminée de fontis sont très sensibles au choix :

- du rayon de la cheminée de fontis,
- du coefficient de foisonnement utilisé pour les éboulis.

Les valeurs finales peuvent donc légèrement fluctuer selon l'ajustement de ces paramètres.

8 APPLICATION À QUELQUES TYPES D'OBJETS

8.1 Hypothèses générales sur le choix des paramètres

Les relations algébriques présentées au paragraphe 7.2.2 font intervenir quelques paramètres dont les valeurs sont adaptées ou fixées selon la famille de l'objet souterrain.

Les objets souterrains ont été rassemblés en quelques familles sur base de leur topologie et de leur nature, leur fonction étant ignorée. Par exemple, la famille « puits » reprend tout aussi bien les puits de mines, les puits de minières et d'exploitations du phosphate riche en Hesbaye.

Chaque famille fait l'objet d'un modèle propre incluant :

- un scénario désignant le ou les mécanismes mis en œuvre pour la création et la propagation du mouvement de terrain jusqu'en surface ;
- une méthode de calcul ou d'estimation du volume de vide initialement disponible (ou apparaissant) au sein de l'objet souterrain, et la modélisation de ce volume jusqu'en surface.

Les dimensions de l'objet, le volume disponible, le scénario retenu et les mécanismes géomécaniques concernés sont adaptés pour chaque cas d'objet souterrain de façon à rencontrer les constats de terrain. Pour la cartographie des aléas, ces choix sont guidés par la bibliographie, les conseils des experts, les constats de terrain et les retours d'expérience. Les tableaux suivants reprennent les valeurs de paramètre à utiliser dans les relations de calcul précédentes pour chaque famille d'objets souterrains. Dès lors où on dispose de données locales plus précises, cette méthodologie reste tout aussi valable.

8.2 Les puits

8.2.1 Caractérisation de ces objets

Le puits, de rayon r_p et de section S_p , est supposé creusé dans un massif rocheux cohérent recouvert de formations superficielles, meubles et/ou altérées, d'une épaisseur de z_{jm} .

La plupart des puits de mines sont partiellement ou totalement remblayés, à l'exception de certains puits sur galerie d'exhaure qui peuvent rester vides (puits d'entretien). Les données historiques, confirmées par la majorité des observations de terrain, montrent que les propriétaires des terrains, quels que soient les régimes anciens ou récents, exigeaient l'élimination des terrisses et le remblaiement des puits.

Les puits généralement creusés après 1850 disposent d'un parement durable. Antérieurement à cette date, les puits sont supposés de section relativement faible et surtout rarement revêtus d'un parement durable (bois, aires). En l'absence de données, pour des puits antérieurs au milieu du 19^{ème} siècle, y compris pour les puits non connus sur plan, on considérera les sections suivantes par défaut, d'après la typologie de terrain :

- mines de houille des bassins du Couchant de Mons et du Centre : 3 m² ;
- mines de houille des bassins de Charleroi, Basse-Sambre, Namur, Huy-Andenne, Liège, Herve et Condroz : 2 m² ;
- mines métalliques : 2 m² ;
- mines et minières de fer (gîtes oxydés) : 1 m².
-

Dans le cas du puits remblayé, il peut exister des vides primaires en profondeur d'origine diverse : travaux, galeries, accrochages de galerie, ancrages de remblais, planché, vides diffus au sein des remblais... Ces vides primaires mobilisent un premier volume de

remblais en profondeur dans le puits : le volume mobilisable primaire. Le départ de ce volume vers le vide primaire engendre un volume de vide secondaire au sein du puits : c'est le volume mobilisable secondaire qui devient le volume disponible secondaire. Ce dernier volume va mobiliser à son tour la colonne de remblais du puits surmontant ce volume. Il s'agit exactement du mécanisme d'une remontée de fontis canalisée dans le puits.

En pratique, l'origine précise et l'importance du volume de vide apparaissant dans la masse des remblais du puits ne sont pas connues. C'est pourquoi cette section traitera du développement du cratère qui se formera en surface à partir des volumes de vide connus en surface.

8.2.2 Hypothèses de travail et étapes de calcul d'effet

Quel que soit le type d'exploitation souterraine, le puits est un objet souterrain, assimilable à un conduit vertical. Celui-ci peut être vide, partiellement ou totalement remblayé.

A. Le volume de vide disponible en surface V_r

Si le puits est vide, le volume de vide disponible en surface V_r pour créer un cratère d'effondrement en surface correspond au volume de vide au sein de son volume intérieur. Celui-ci se calcule à partir de la section du puits S_p et de la hauteur du vide H_{vide} comptée depuis la surface :

$$V_r = z_{vide} \cdot S_p$$

où

- V_r est le volume de vide disponible en surface,
- z_{vide} est la profondeur du puits vide,
- H_{vide} est la hauteur de vide dans le puits,
- S_p est la section du puits.

En cas de rupture de la paroi latérale du puits, les formations superficielles, environnant le sommet la tête du puits, se déversent plus ou moins dans le puits selon leur degré de mobilité et de leurs propriétés géomécaniques. Un cratère en forme d'entonnoir se développe en surface.

Ce mécanisme a lieu tant que le volume disponible du puits V_{disp} est en mesure de recevoir les matières mobilisées et qu'il n'est pas comblé. Dès que c'est le cas, le mécanisme d'arrête et le cratère cesse d'augmenter en volume.

Si le puits est partiellement remblayé, il est considéré vide sur une majeure partie de sa longueur et sa partie supérieure est refermée par un horizon (ou bouchon) de remblais. L'épaisseur de ce bouchon $H_{remblais}$ est de l'ordre de 20 à 40 mètres et est généralement plus faible que la longueur de la partie vide du puits H_{vide} .

Le principal phénomène redouté est le débouillage du puits qui voit le bouchon de remblais descendre brutalement au fond du puits. Dès ce moment, on revient à la situation de puits vide, présentée ci-dessus, et le volume disponible est donné par :

$$V_r = z_{vide} \cdot S_p = (H_{vide} - H_{remblais}) \cdot S_p$$

où $H_{remblais}$ est l'épaisseur du bouchon de remblais placé au sommet du puits.

Le puits totalement remblayé contient des matériaux de remblais dans son volume intérieur et sur toute sa longueur.

Cependant, il arrive qu'un volume de vide puisse se créer dans la masse du remblai à partir de diverses causes, remonter jusqu'à la tête du puits. Il y a alors une descente du niveau supérieur des remblais dans le puits et crée un volume disponible V_{disp} :

$$V_r = z_{vide} \cdot S_p = z_{r\ sup} \cdot S_p$$

où $z_{r\ sup}$ est la profondeur de la surface supérieure de la masse des remblais qui est descendue dans le puits.

Dans ce cas, seul $z_{r\ sup}$ est mesurable car le volume de vide initialement formé dans la masse des remblais n'est jamais connu ou accessible.

D'après les constatations de terrain et les retours d'expérience, les descentes de remblais sont :

- peu fréquentes et, quand les descentes surviennent, une cause extérieure au puits (mobilisant des masses d'eau) en est généralement responsable ;
- relativement faibles avec un $z_{r\ sup}$ de l'ordre de 10 à 15 mètres, principalement pour les puits de très grands diamètres (de plus de 3 mètres).

Pour calculer l'intensité de l'effet (effondrement) de façon conservatrice pour le puits remblayé, il est supposé que la descente de remblais soit considérée à 30 mètres pour la majorité de puits et de 15 mètres pour les vieux puits.

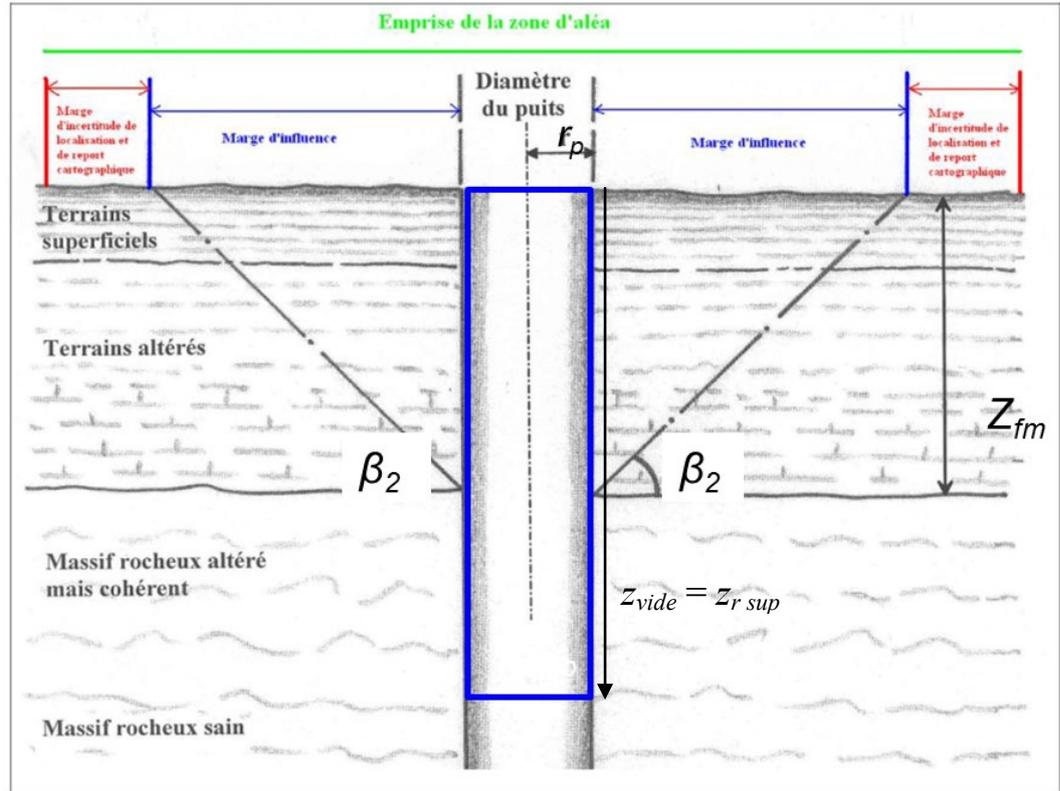


Figure 18 - Illustration du volume disponible pour le puits (adapté de INERIS).

Le Tableau 13 reprend les dimensions géométriques, les intensités d'effet, les descentes de remblais supposée et la présomption de présence pour les principaux types de puits rencontrés en Wallonie.

Tableau 14 : Tableau récapitulatif reprenant les caractéristiques et hypothèses principales pour les objets souterrains de la catégorie "puits".

Objet	Puits/fontis initial (diamètre ou section)	Intensité d'effet	Classe d'intensité d'effet	z_{vide} retenue	Présomption de présence
Puits (section connue)					
	1 – 1,5 m	0,0 – 1,5 m	Limitée	30 m	Uniforme en tous points
	1,5 – 3 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	30 m	
	3 – 8 m	3,0 – 10,0 m	Elevée	30 m	
Puits (section par défaut)					
Houille Couchant/Centre	3 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	30 m	Uniforme en tous points
Houille ailleurs	2 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	30 m	
Mines métalliques	2 m ²	1,5 – 3,0 m	Modérée	30 m	
Zones d'anciens puits (section par défaut)					
Houille Couchant/Centre	3 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	30 m	Environ 1 à 50 puits/ha
Houille ailleurs	2 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	15 m	
Mines métalliques	2 m ²	1,5 – 3,0 m	Modérée	15 m	

B. Le cratère d'effondrement primaire

Le cratère d'effondrement primaire apparaît juste à l'aplomb de la section du puits.

Si la tête du puits est située juste au niveau de la surface du sol, le rayon du cratère primaire se limite à l'orifice du puits :

$$r_{cratère1} = r_p$$

Sa profondeur correspond à la profondeur z_{vide} du vide présent dans le puits :

$$z_{cratère1} = z_{r\ sup} = z_{vide}$$

Il arrive souvent que des matériaux de remblais recouvrent les têtes de puits sur une certaine épaisseur. Lors de l'effondrement du puits, ils s'éboulent dans le volume de vide du puits et sont mobilisés pour former le cratère primaire.

Pour tenir compte de certaines situations rencontrées sur le terrain, il est considéré pour la suite des calculs que la tête de puits est enfouie sous 3 mètres de terrain de recouvrement ou de remblais. Le volume mobilisable V_{mob1} désigne les terrains de recouvrement mobilisés pour former le cratère primaire. V_{mob1} est de forme tronconique renversée, dont :

- la base inférieure est la section du puits,
- la hauteur est fixée à 3 mètres,
- le rayon supérieur r_{mob1} correspond au rayon du cratère d'effondrement primaire et est déterminé par :

$$r_{mob1} = r_{cratère1} = r_p + \frac{3}{\tan \beta_1}$$

Avec $\beta_1 = 85^\circ$, on obtient :

$$r_{mob1} = r_{cratère1} = r_p + 0,2625$$

V_{mob1} est déterminé par :

$$V_{mob1} = \pi \cdot (r_{mob1}^2 + r_p^2 + r_{mob1} \cdot r_p)$$

$$V_{mob1} = 9 \cdot \pi \cdot \left(\frac{r_p^2}{3} + \frac{r_p}{\tan \beta_1} + \frac{1}{\tan \beta_1^2} \right)$$

Et la profondeur du cratère d'effondrement primaire est déterminée par :

$$z_{cratère1} = z_{r\ sup} - \frac{K_{fm} \cdot V_{mob1}}{S_p}$$

avec K_{fm} , le coefficient de foisonnement des terrains meubles superficiels éboulés dans le puits.

C. Le cratère d'effondrement secondaire

Le volume mobilisable $V_{mob2 max}$

Le volume mobilisable $V_{mob2 max}$ correspond au volume maximum de terrains superficiels, meubles et/ou altérés, qui se déverseraient dans le puits en cas de rupture et qui correspond au cratère d'effondrement secondaire pouvant se développer si le puits :

- ne dispose pas de parement et de soutènement, menant à la rupture de ses parois latérales sur toute l'épaisseur des terrains superficiels z_{fm} ;
- est en mesure d'absorber complètement les terrains superficiels mobilisés.

En pratique, ce cratère d'effondrement maximum est rarement atteint car le volume de vide disponible au sein du puits lui est nettement inférieur.

Ce volume $V_{mob2 max}$ a la forme d'un tronc de cône renversé et percé par un cylindre concentrique (voir Figure 17).

Son développement est proportionnel à la profondeur sur laquelle les parois latérales du puits pourraient se rompre. Au plus, cette profondeur correspond à l'épaisseur des terrains superficiels meubles et/ou altérés z_{fm} et le volume mobilisable devient maximum, correspondant au volume du cratère secondaire maximum tel que défini au chapitre 7.3.3 (p. 70). En reprenant les équations de ce chapitre et en remplaçant R_{cf} par r_p , on détermine le rayon, la profondeur et le volume de ce volume disponible maximum $V_{mob2 max}$:

$$r_{mob2 max} = r_p + \frac{z_{fm}}{\tan \beta_2}$$

$$z_{mob2 max} = z_{fm}$$

L'angle β_2 de talus naturel des terrains superficiels meubles et/ou altérés est fixé à 30° .

$$V_{mob2 max} = \frac{\pi}{3} \cdot z_{fm} \cdot (r_{cratère2 max}^2 + r_p^2 + r_{cratère2 max} \cdot r_p)$$

Et finalement, on obtient :

$$V_{mob2 max} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{z_{fm}^2}{\tan \beta_2^2} \cdot \left(\frac{z_{fm}}{\tan \beta_2} + 3 \cdot r_p \right)$$

Comparaison de V_r et V_{mob}

La comparaison des volumes V_r et $V_{mob2 max}$ est très importante car le plus petit des deux fixe le volume du cratère d'effondrement secondaire qui peut se développer en surface. On distingue :

- 1) $V_r \geq (K_{fm} \cdot V_{mob2 max})$: tous les matériaux superficiels sont mobilisés dans le vide créé dans le puits et n'arrivent pas à le combler. Le cratère d'effondrement secondaire prend ses dimensions maximales $r_{cratère2 max}$ et $z_{cratère2 max}$:

$$r_{cratère2 max} = r_{mob2 max}$$

$$z_{cratère2\ max} = z_{vide} - \frac{K_{fm} \cdot V_{mob2\ max}}{S_p}$$

avec obligatoirement, $z_{fm} \leq z_{cratère2\ max}$

- 2) $V_r < (K_{fm} \cdot V_{mob2}) < (K_{fm} \cdot V_{mob2\ max})$: une partie seulement des matériaux superficiels compris dans $V_{mob2\ max}$ est nécessaire pour combler le vide créé dans le puits. Le cratère d'effondrement prend la forme d'un entonnoir conique (voir Figure 19) avec les dimensions suivantes (voir relations du 7.3.2 à la p. 70) :

$$r_{mob2} = r_{cratère2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_r}{\pi \cdot K_{fm} \cdot \tan \beta_2}}$$

$$z_{mob2} = z_{cratère2} = r_{cratère2} \cdot \tan \beta_2$$

avec obligatoirement, $z_{mob2} \leq z_{fm}$

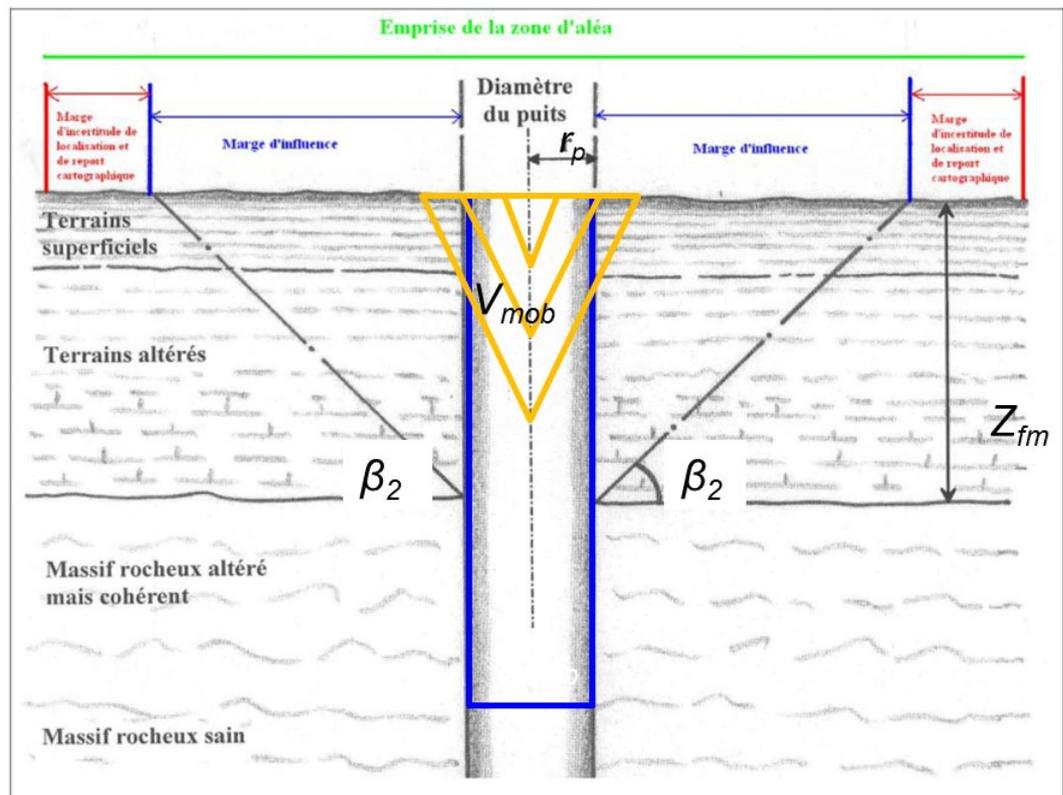


Figure 19 - Illustration du volume disponible et du volume mobilisable en forme de cône renversé pour le cas du puits (adapté de INERIS).

La zone d'aléa d'effondrement localisé associée à ce type de puits est alors cartographiée sous la forme d'une zone circulaire centrée sur le puits si celui-ci est visible ou sur sa position la plus probable si le puits n'est pas visible. Le rayon de cette zone est de $r_{\text{cratère}2}$, augmenté du rayon d'imprécision cartographique de la position du puits.

Prise en compte du parement et de sa solidité

D'après les nombreuses observations de terrain, la présence d'un parement et/ou d'un soutènement latéral dans le puits permet de cantonner le volume de vide V_r au seul volume intérieur du puits. Tout au plus, le sommet de ces parements peut s'altérer ou s'effondrer sur un à deux mètres laissant un peu de terrains superficiels entrer dans le puits. Cela permet le développement d'un petit cratère secondaire, en forme de tronc de cône renversé, qui élargira un peu l'orifice du puits.

Pour tenir compte de cette situation, on adopte une hypothèse de travail conservatoire: en présence d'un puits pourvu d'un parement, on considère qu'il peut quand même se développer le cratère secondaire correspondant à l'altération et/ou l'éboulement du parement sur les 3 derniers mètres de hauteur.

Ce volume mobilisable $V_{\text{mob}2 \text{ max}'}$ se calcule alors à partir de la formule de $V_{\text{mob}2 \text{ max}}$ pour laquelle $z_{fm} = 3$, pour être ensuite comparé au volume disponible V_r :

$$V_{\text{mob}2 \text{ max}'} = \frac{9 \pi}{\tan \beta_2^2} \cdot \left(\frac{1}{\tan \beta_2} + r_p \right)$$

Et le rayon maximal de ce cratère secondaire est :

$$r_{\text{mob}2 \text{ max}'} = r_p + \frac{3}{\tan \beta_2} = r_p + 5,2$$

8.2.3 Étude de sensibilité

Les différentes équations présentées ci-avant font intervenir plusieurs paramètres pour lesquelles les valeurs possibles sont comprises dans un intervalle.

Afin de respecter l'objectif principal de ce travail, à savoir l'évaluation des effets redoutés en surface à l'échelle du territoire wallon, des hypothèses ont été nécessairement formulées pour fixer les paramètres concernés à des valeurs les plus crédibles et sécuritaires.

Cependant, les valeurs choisies constituent en fait une proposition, susceptible d'être revue par les experts, que ce soit au niveau général ou au niveau local, selon leur retour d'expérience et la réalité des observations de terrain. Cette révision ne mettant en doute ni la méthode de calcul, les équations à utiliser.

À ce stade, il est important de connaître l'influence et la sensibilité de ces paramètres sur les résultats finaux, afin que l'expert soit conscient des conséquences directes en cas de modifications sur les valeurs proposées.

L'étude de sensibilité ci-après se base notamment sur le puits n°1, présenté en exemple au paragraphe 0 et dont les données sont disponibles au Tableau 14.

A. Influence de l'angle de parois β_1 sur les dimensions du cratère primaire

Par défaut ce paramètre est estimé à 85° et ne s'applique qu'aux trois derniers mètres supérieurs du cratère primaire, pour répondre au léger évasement souvent constaté sur le terrain à la partie supérieure du fontis qui vient de se manifester en surface.

Les équations du paragraphe 8.2.20 et les graphiques ci-dessous (Figure 20 et Figure 21) montrent que l'angle β_1 d'inclinaison des parois du cratère d'effondrement primaire intervient de façon proportionnelle sur le rayon et la profondeur de ce cratère :

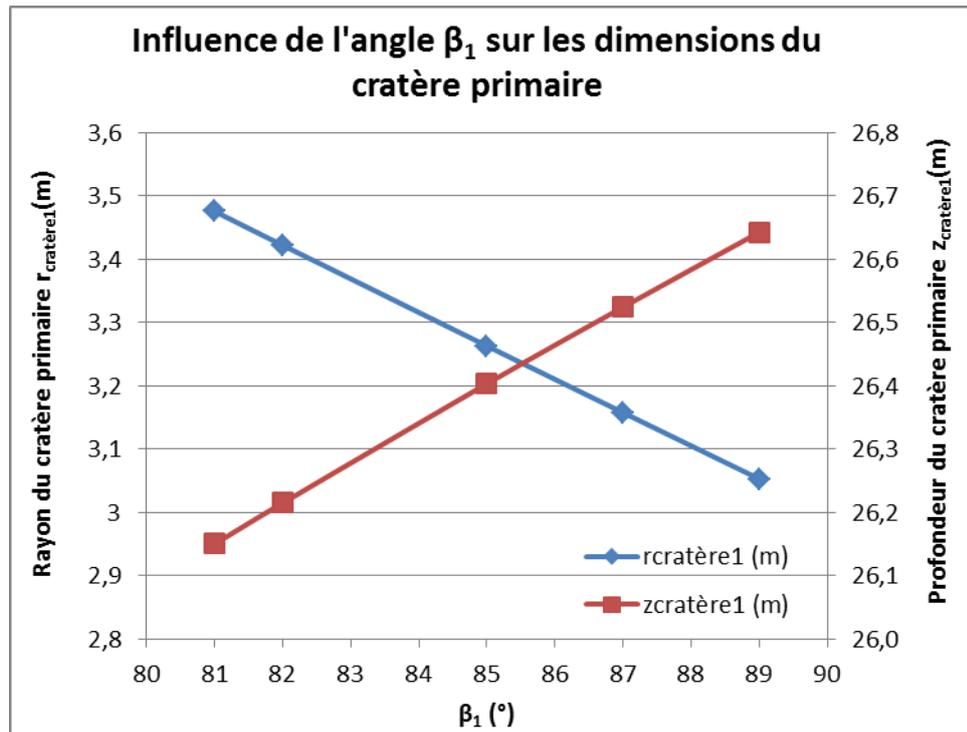


Figure 20 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_1 d'inclinaison des parois du cratère primaire sur les dimensions de ce dernier.

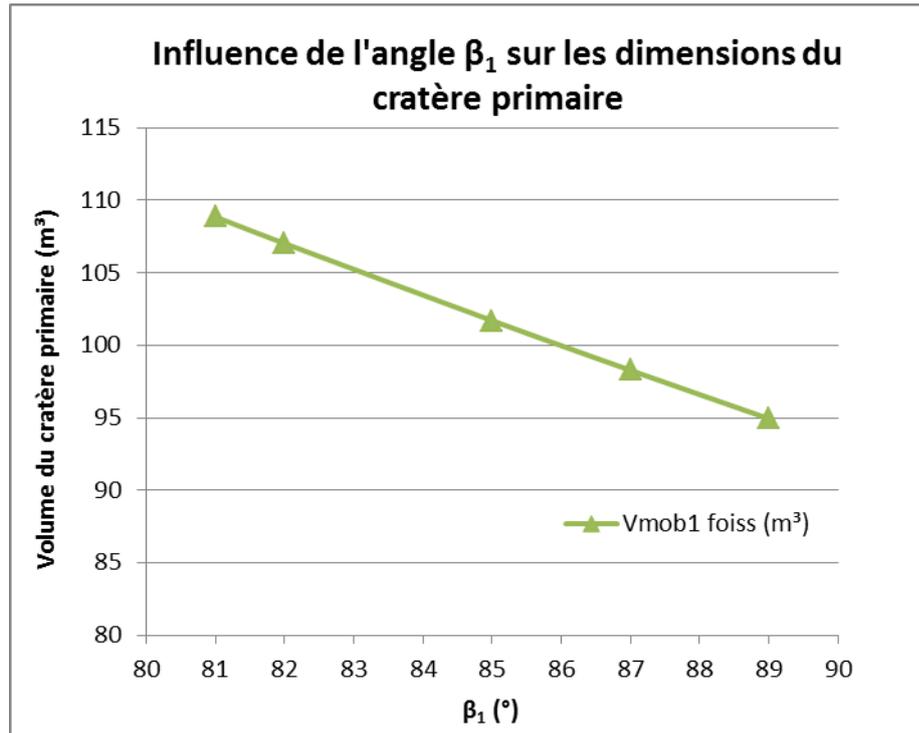


Figure 21 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_1 d'inclinaison des parois du cratère primaire sur le volume de ce dernier.

On constate qu'une augmentation de 5° sur β_1 a une influence sur le cratère primaire :

- - 0,26 m sur le rayon ;
- + 0,31 m sur la profondeur ;
- - 8,72 m³ sur le volume du cratère.

Il s'agit là de sa seule influence, car β_1 n'intervient pas pour les calculs concernant le cratère secondaire.

B. Influence de la descente z_{vide} de la masse de remblais présente dans le puits

La descente z_{vide} de la masse de remblais présente dans le puits remblayé est une hypothèse fondamentale pour évaluer les dimensions des cratères d'effondrement primaire et secondaire, et donc fixer les intensités d'effets redoutés en surface.

Le cratère primaire se forme proportionnellement à z_{vide} .

Le graphique de la Figure 22 montre l'influence d'une augmentation de z_{vide} de 5 à 60 mètres, sur le cratère secondaire. On y distingue deux parties.

De 5 à 12,9 mètres, le cratère secondaire se développe en surface sous la forme d'un entonnoir de volume V_{mob2} et de rayon r_{mob2} . À partir de 12,9, le volume de vide V_r présent dans le puits devient supérieur au volume mobilisable maximum $V_{mob2\ max}$ qui forme le cratère secondaire le plus étendu.

De 13 à 60 mètres, le volume $V_{mob2\ max}$ reste constant : le cratère ne grandit plus, mais il s'approfondit proportionnellement (z_{mob2}).

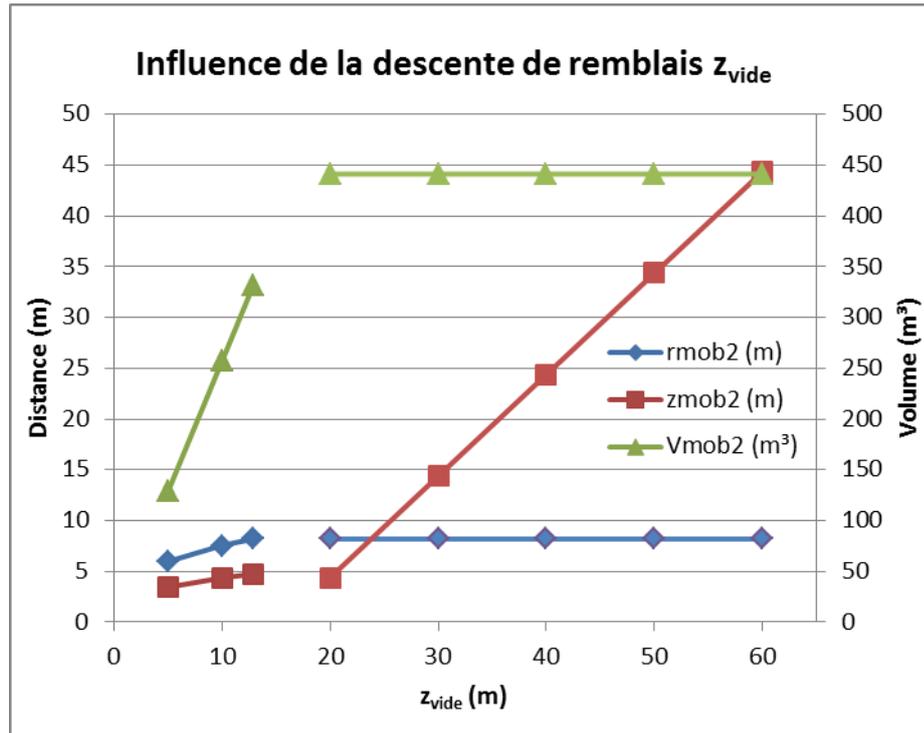


Figure 22 – Graphique illustrant l'influence de la descente z_{vide} des remblais présents dans le puits sur les paramètres du cratère secondaire.

On constate que ce n'est pas tant la valeur absolue de z_{vide} qui est significative pour le cratère secondaire, mais plutôt la désignation de l'un des deux cas de figures (voir 8.2.2 0) :

- $V_r \geq (K_{fm} \cdot V_{mob2\ max})$
- $V_r < (K_{fm} \cdot V_{mob2}) < (K_{fm} \cdot V_{mob2\ max})$

C. Influence du coefficient de foisonnement des formations superficielles K_{fm}

Le coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles intervient sur les cratères primaire et secondaire (Figure 23 et Figure 24).

Dans les hypothèses de travail, K_{fm} a été fixé à 1,1 de façon conservatoire.

On constate que la variation de K_{fm} influence très peu le rayon des cratères primaire et secondaire. Par contre, les volumes mobilisables V_{mob1} et V_{mob2} sont directement influencés : ce qui se traduit dès lors par une augmentation des valeurs de z_{mob1} et z_{mob2} .

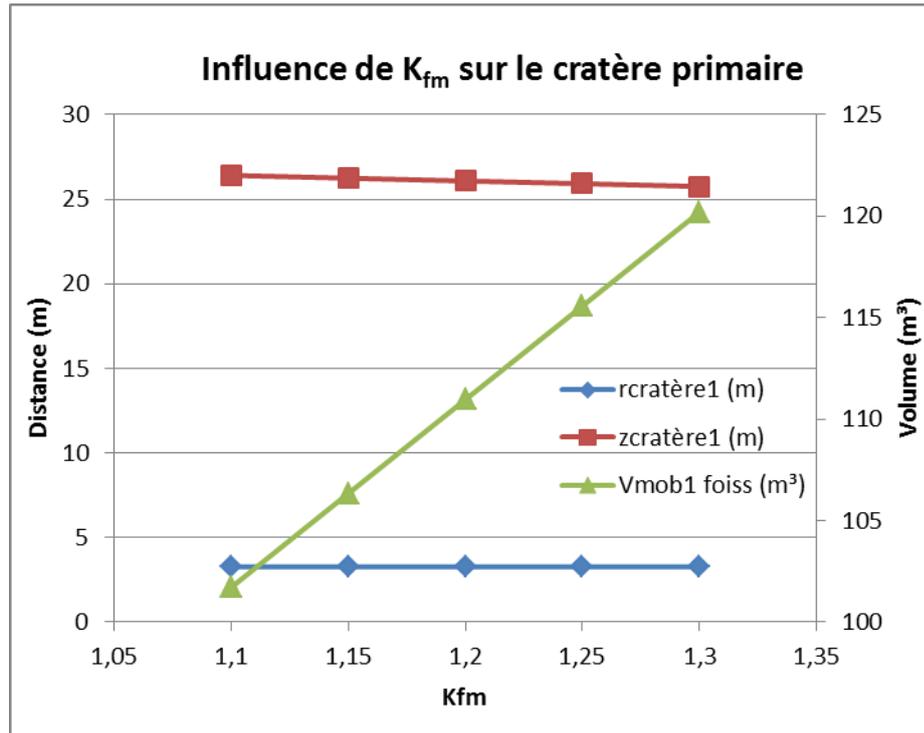


Figure 23 – Graphique illustrant l'influence du coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles sur les paramètres du cratère primaire.

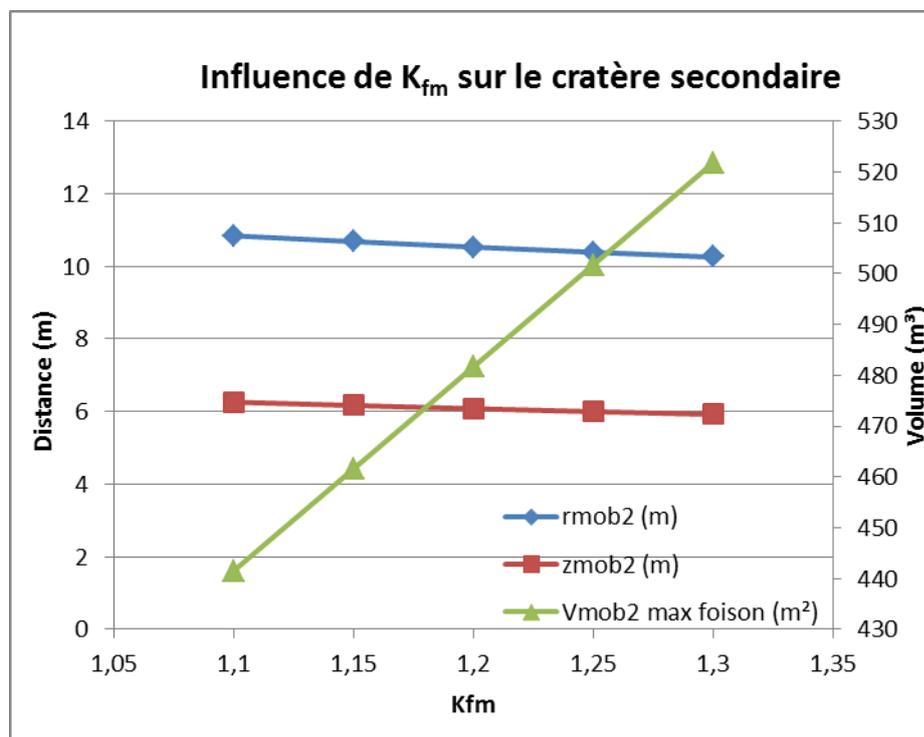


Figure 24 – Graphique illustrant l'influence du coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles sur les paramètres du cratère secondaire.

D. Influence de l'angle d'inclinaison β_2

L'angle β_2 correspond à l'inclinaison des parois stabilisées du cratère d'effondrement secondaire. Il correspond à l'angle de talus naturel des formations superficielles dans lesquelles le cratère secondaire se développe.

La Figure 25 illustre l'influence de β_2 sur le rayon, le volume et la profondeur du volume mobilisable formant le cratère secondaire.

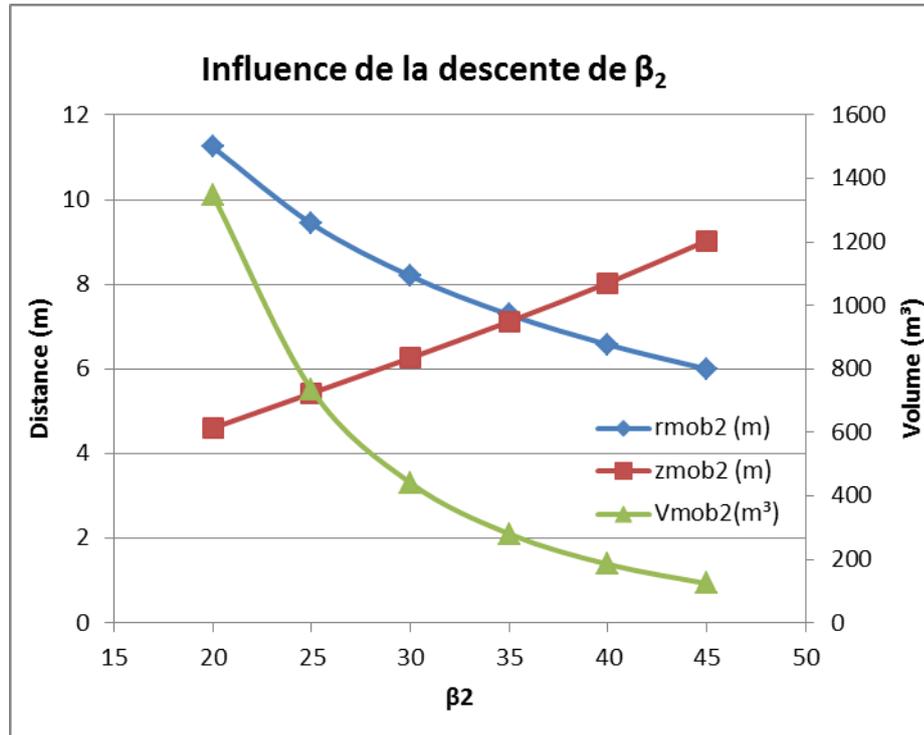


Figure 25 – Graphique illustrant l'influence de l'angle β_2 de talus naturel des formations superficielles sur les paramètres du cratère secondaire.

On constate surtout que le volume mobilisable et son rayon ont un comportement exponentiel décroissant : décroissance très rapide jusqu'à $\beta_2 = 30^\circ$ et au-delà, tendance vers une valeur asymptotique.

8.2.4 Exemples numériques

Voici ci-après l'exemple d'un secteur de la région de Liège, illustré à la Figure 26, comportant plusieurs puits de mines.



Figure 26 – Cartographie d'une zone de Wallonie comportant des puits de mines et représentation des zones de consultation du Service public de Wallonie.

La donnée cartographique des puits de mines du Service public de Wallonie y apparaît via des occurrences cartographiques, multiples et non validées, de la couche géographique. Les zones de consultation, représentées en bleu, sont dessinées par défaut autour de toutes les occurrences.

Avant de dresser une cartographie d'aléas sur ce secteur, l'ISSeP a d'abord mené un important travail de validation de la donnée des puits de mines dans ce secteur, en sélectionnant uniquement les occurrences qui :

- correspondent effectivement à des puits de mines ;
- désignent le plus précisément la position véritable ou présumée de ces puits ;
- renseignent leur source de données, permettant ainsi d'apprécier la qualité de l'information, et donc l'imprécision cartographique sur la localisation des puits.

Après validation, il reste 5 puits de mines dans le secteur.

Des informations sont disponibles dans la Base de données « Puits et Issues de Mines » du Service public de Wallonie pour trois d'entre eux : un à grand diamètre (6 mètres) et deux à petit diamètre (2 mètres). Leur remblayage est certain.

Les deux derniers puits sont des vieux puits, moins bien connus : leur position est donnée avec une imprécision de 10 mètres et la présence d'un parement est incertaine. Dans ce cas,

on considère par défaut que ces puits n'ont pas de parement, qu'ils sont remblayés et que leur section est de 2 m².

Les données disponibles sur les 5 puits sont reprises au Tableau 14.

Tableau 15 : Données initiales des puits de mines disponibles pour l'évaluation et la cartographie des aléas de mouvement de terrain.

ID	r_p (m)	S_p (m ²)	Parement	Remblayage	z_{fm} (m)
1	3	28,27	Oui	Oui	13
2	1	3,14	Oui	Oui	11
3	1	3,14	Oui	Oui	20
4	(0,79)	2	Non	Oui	15
5	(0,79)	2	Non	Oui	13

Les valeurs d'épaisseurs de terrains meubles superficiels sont données à partir de la proto-cartographie des formations superficielles, qui a été modélisées sur ce secteur à partir des données de la Carte géotechnique (Figure 27).

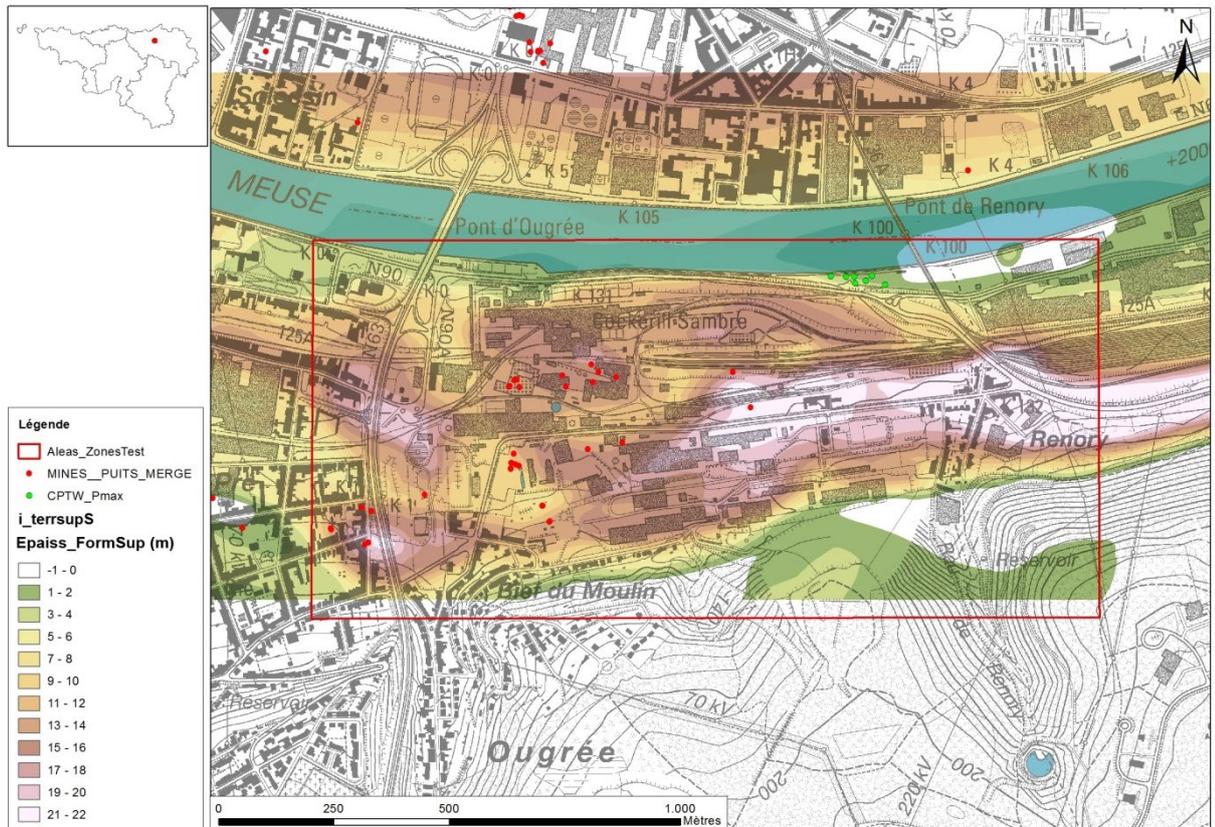


Figure 27 – Modélisation de l'épaisseur des formations superficielles meubles à partir des données de la Carte géotechnique et pour le secteur de la zone-test.

A. Qualification de l'intensité d'effet pour l'effondrement localisé

Pour évaluer l'intensité d'un effondrement localisé, à savoir le rayon d'un cratère d'effondrement, on calcule le volume disponible V_{disp} en supposant une descente du niveau de remblais

Le Tableau 15 donne les valeurs du cratère primaire calculées et les classes d'intensité d'effet pour les 5 puits.

Tableau 16 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les 5 puits de la zone-test.

ID	S_p (m)	z_{vide} (m)	V_r (m ³)	z_{fm} (m)	V_{mob1} (m ³)	$r_{cratère1}$ (m)	$z_{cratère1}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Rayon imprécis. (m)	Rayon zone aléa (m)
1	28,27	30	848	13	92	3,26	26,40	Élevée	0,25	3,51
2	3,14	30	94	11	12	1,26	25,76	Modérée	0,5	1,76
3	3,14	30	94	20	12	1,26	25,76	Modérée	0,5	1,76
4	2	15	30	15	8	1,06	10,49	Modérée	10	11,06
5	2	15	30	13	8	1,06	10,49	Modérée	10	11,06

Le volume de mobilisable V_{mob1} est assez inférieur au volume de vide V_r pour les 5 puits et le cratère primaire se développe bien pour chacun.

Si le cratère secondaire est plutôt pris en compte pour évaluer l'intensité d'effet, les valeurs calculées pour les 5 puits, ainsi que les classes d'intensité d'effet respectives, sont disponibles au Tableau 16.

Tableau 17 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les 5 puits de la zone-test.

ID	S_p (m)	z_{vide} (m)	V_r (m ³)	z_{fm} (m)	$V_{mob2\ max}$ foisonné (m ³)	$r_{mob2\ max}$ avec parement (m)	$r_{mob2\ max}$ sans parement (m)	r_{mob2} (m)	Classe d'intensité d'effet	Rayon imprécis. (m)	Rayon zone aléa (m)
1	28,27	30	848	13	442	8,20	-	-	Très élevée	0,25	8,45
2	3,14	30	94	11	252	6,20	-	5,21	Très élevée	0,5	5,71
3	3,14	30	94	20	232	6,20	-	5,21	Très élevée	0,5	5,71
4	2	15	30	15	22 060	-	26,78	3,56	Élevée	10	13,56
5	2	15	30	13	14 547	-	23,31	3,39	Élevée	10	13,31

Les puits 1, 2 et 3 sont pourvus d'un parement, que l'on considère altéré et/ou éboulés sur 3 mètres uniquement. Cela réduit le volume $V_{mob2\ max}$ à celui décrit au paragraphe 0 de la page 78. Pour les deux autres puits, on considère la rupture du parement sur toute l'épaisseur des formations superficielles z_{fm} .

Le puits 1 se distingue des autres car son volume de vide V_r est supérieur au volume maximum mobilisable $V_{mob2\ max}$. Son cratère d'effondrement secondaire atteint donc ses dimensions maximales.

B. Qualification de la prédisposition locale pour l'effondrement localisé

La qualification de la prédisposition locale à l'effondrement localisé relative aux 5 puits de la zone test requiert une évaluation du score P présentée au Tableau 17.

Tableau 18 : Evaluation du score P de la prédisposition pour les 5 puits de la zone test.

Critères de la prédisposition		Puits				
		1	2	3	4	5
Objet	Présence du puits	1	1	1	-1	-1
	Diamètre du puits	1	-1	-1	-1	-1
	Nature du parement	-1	-1	-1	1	1
	Traitement du vide	-1	-1	-1	-1	-1
Contexte	Nature des terrains environnants	1	1	1	1	1
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	1	1	1	1	1
	Anthropisation et apport extérieur en eau	1	1	1	1	1
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	-1	-1	-1	-1	-1
Total : Score P		2	0	0	0	0
Classe de prédisposition		Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible

Suite à la grille d'évaluation du score P , les 5 puits sont tous *a priori* classés en catégorie « Sensible ». En fait, seul le puits 1 l'est vraiment avec un score P de 2. Les quatre autres ont obtenu un score P de 0 qui les rend moins sensibles que le puits 1.

Bien entendu, un jugement d'expert peut passer outre cette proposition et moduler la classe de prédisposition proposée. Dans cet exemple, la proposition des classes de prédisposition ne sera pas modifiée.

C. Qualification et représentation de l'aléa d'effondrement localisé

Le niveau d'aléa d'effondrement localisé est déterminé pour chacun des 5 puits à partir des classes d'intensité d'effet, et de prédisposition locale, autant pour les cratères primaires et secondaires. Le Tableau 18 reprend toutes valeurs.

Tableau 19 : Valeurs des classes d'intensité d'effet et de prédisposition, permettant la qualification du niveau d'aléa pour chacun des 5 puits de mines de la zone test.

ID	r_p (m)	z_{vide} (m)	Rayon impréc. (m)	Classe de prédisp	Cratère primaire				Cratère secondaire			
					$r_{cratère1}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Niveau d'aléa	Rayon zone aléa (m)	$r_{cratère2}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Niveau d'aléa	Rayon zone aléa (m)
1	3	30	0,25	Sensible	3,26	Élevée	Moyen	3,51	8,20	Très élevée	Fort	8,45

2	1	30	0,5	Sensible	1,26	Modérée	Faible	1,76	5,21	Très élevée	Fort	5,71
3	1	30	0,5	Sensible	1,26	Modérée	Faible	1,76	5,21	Très élevée	Fort	5,71
4	0,79	15	10	Sensible	1,06	Modérée	Faible	11,06	3,56	Élevée	Moyen	13,56
5	0,79	15	10	Sensible	1,06	Modérée	Faible	11,06	3,39	Élevée	Moyen	13,31

Le niveau d'aléa qualifié pour le cratère primaire est toujours supérieur dès que le cratère secondaire est considéré.

De plus, l'aléa qualifié pour le cratère primaire offre plus de nuances dans les niveaux obtenus et permet une véritable hiérarchisation parmi les 5 zones d'aléa. Par contre, pour l'aléa qualifié sur base du cratère secondaire, il y a d'avantage d'uniformité dans le niveau d'aléa et toutes les zones ont le même niveau.

Quant à la taille des zones d'aléa, elles sont très sensibles au rayon d'imprécision cartographique et au choix du cratère (primaire ou secondaire).

Graphiquement, les zones d'aléas sont représentées à la Figure 28 pour les cratères primaires et à la Figure 29 pour les cratères secondaires.

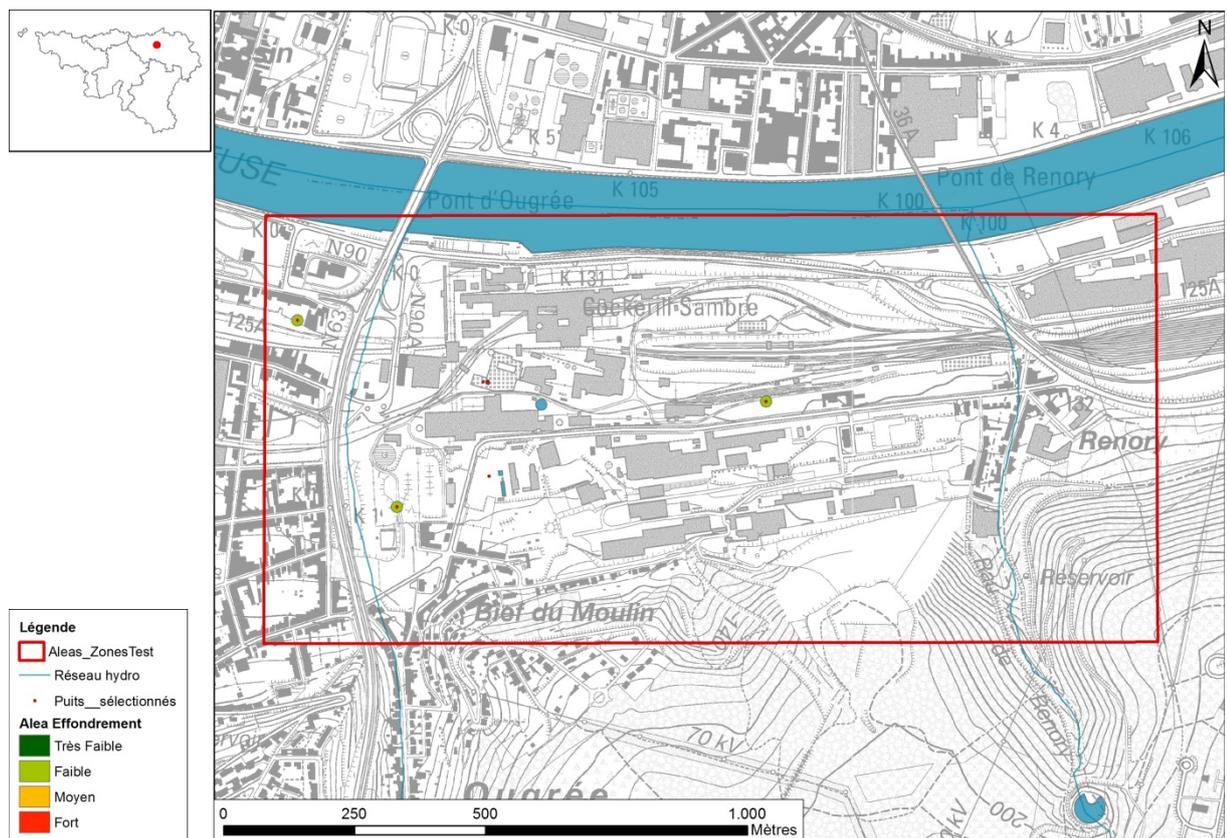


Figure 28 – Cartographie des zone d'aléa d'effondrement localisé (référence cratère primaire) relatives aux puits de mines d'une zone de Wallonie.

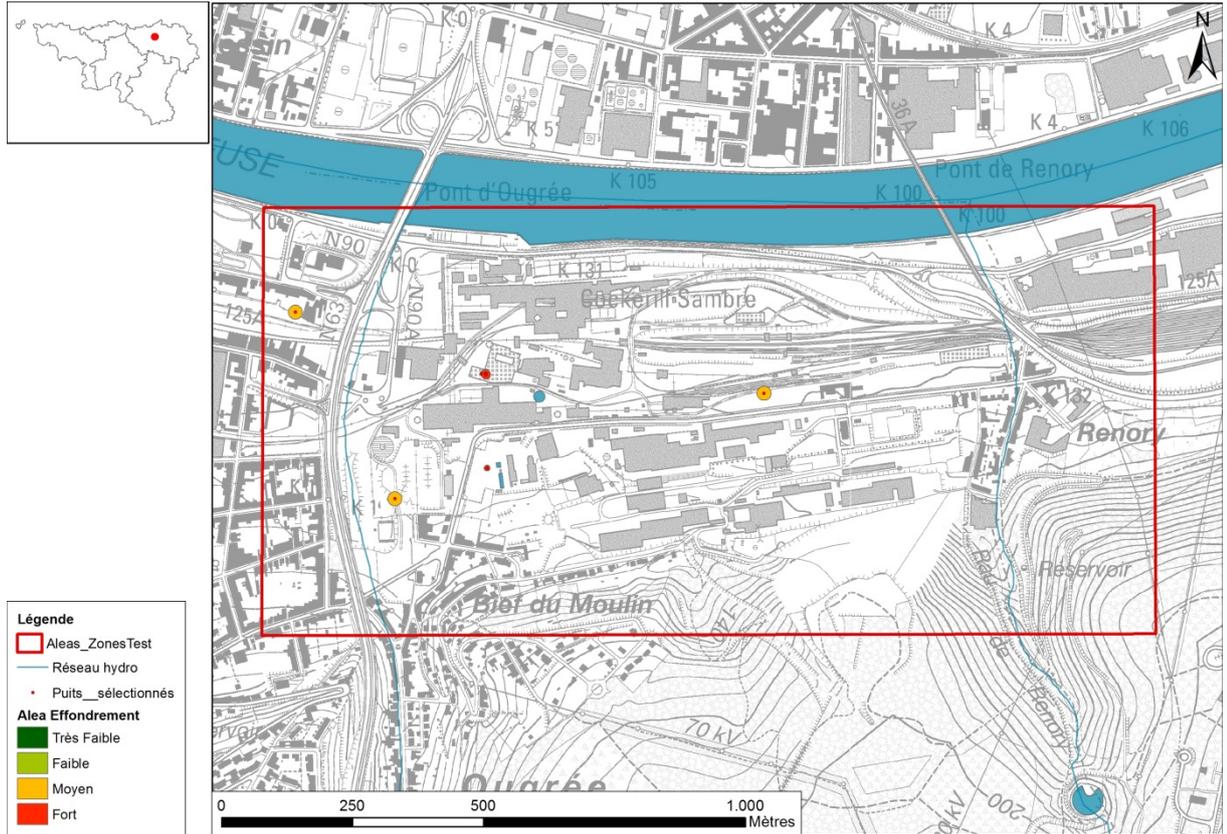


Figure 29 – Cartographie des zone d’aléa d’effondrement localisé (référence cratère secondaire) relatives aux puits de mines d’une zone de Wallonie.

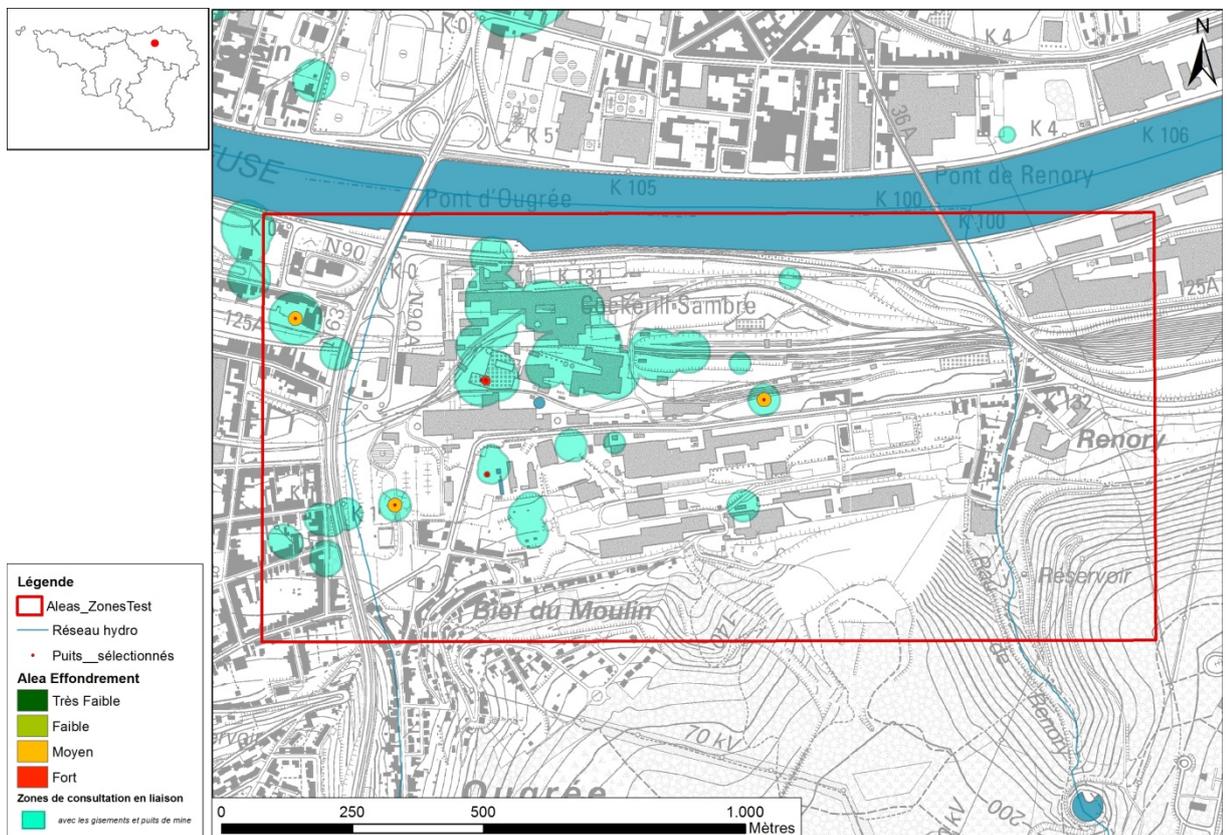


Figure 30 – Comparaison entre les zones de consultation du Service public de Wallonie et les zones d’aléas d’effondrement localisé pour un secteur de Wallonie comportant des puits de mines.

Par comparaison aux zones de consultations du Service public de Wallonie (Figure 30), les zones d'aléas obtenues :

- sont moins nombreuses et globalement moins étendues bien qu'elles soient fortement impactées par l'imprécision de position des puits ;
- sont représentées en extension selon l'intensité de l'effondrement redouté, et en couleur selon leur prédisposition ;
- peuvent être classées hiérarchiquement et comparées entre elles.

8.3 Les puits d'exploitation de minerais de fer oxydés (« minières de fer »)

Dans le cas des puits d'exploitation de minerai de fer oxydés, les puits sont très densément regroupés sur des secteurs très bien délimités. Leur position n'est pas connue pour les minières de fer car ces exploitations n'étaient tenues d'établir des plans de leurs travaux. Lorsqu'ils existent, ils semblent devoir être considérés comme peu fiables en termes de précision (cfr. 6.1.10).

Les secteurs exploités correspondent à des filons métalliques dans lesquels de nombreux puits et galeries ont été creusés. Les puits sont assez rapprochés (paires de puits distants de moins de 5 m, chaque paire étant distante de la suivante de quelques mètres également) et font environ 0,70 à 1 mètre de diamètre. Ils sont considérés remblayés avec les déchets de triage de minerai et provenant du creusement des puits voisins et sans parement.

Individuellement, ces puits ne représentent pas un danger important. Par contre, la grande incertitude sur la position cartographique de ces puits constitue un danger important pour la gestion des risques.

C'est pourquoi il est préférable de considérer la menace engendrée par ces puits plus globalement à l'échelle de ces secteurs. On considère alors que l'effondrement causé par ce type de puits peut survenir partout dans ce secteur.

Les données nécessaires pour évaluer l'aléa d'effondrement localisé, sont données au Tableau 19.

Tableau 20 : Données initiales pour l'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé pour un type de puits de mines métalliques.

ID	r_p (m)	S_p (m ²)	Parement	Remblayage	z_{fm} (m)
1	0,56	1	Non	Oui	3

8.3.1 Qualification de l'intensité d'effet

On considère une descente de la masse de remblais située à l'intérieure du puits sur une hauteur z_{vide} de 30 mètres.

Le Tableau 20 donne les caractéristiques calculées pour le cratère d'effondrement primaire et la classe d'intensité d'effet associée. On constate que le volume mobilisable V_{mobl} est très inférieur au volume de vide V_r disponible au sein du puits.

Tableau 21 : Valeur du volume et du rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que de la classe d'intensité d'effet pour un type de puits d'exploitation de minerais de fer oxydés.

ID	S_p (m)	Z_{vide} (m)	V_r (m ³)	z_{fm} (m)	V_{mob1} (m ³)	$r_{cratère1}$ (m)	$Z_{cratère1}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Rayon imprécis. (m)	Rayon zone aléa (m)
1	2	30	60	3	9	1,06	25,49	Limitée	20	21,06

Si le cratère secondaire est considéré, les valeurs calculées sont données au Tableau 21.

Tableau 22 : Valeur du volume et du rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que de la classe d'intensité d'effet pour un type de puits de minerais de fer oxydés.

ID	S_p (m)	Z_{vide} (m)	V_r (m ³)	z_{fm} (m)	$V_{mob2\ max}$ foisonné (m ³)	$r_{mob2\ max}$ avec parement (m)	$r_{mob2\ max}$ sans parement (m)	r_{mob2} (m)	Classe d'intensité d'effet	Rayon imprécis. (m)	Rayon zone aléa (m)
1	2	30	60	3	236	-	(5,99)	4,48	Élevée	20	24,48

La classe d'intensité d'effet est passée à « Élevée » pour le cratère secondaire car le rayon de ce cratère est de 4,48 mètres.

8.3.2 Qualification de la prédisposition locale

La qualification de la prédisposition locale à l'effondrement localisé relative au type de puits d'exploitation de minerais de fer oxydés requiert une évaluation du score P présentée au Tableau 22.

Tableau 23 : Evaluation du score P de la prédisposition pour le type de puits d'exploitation de gîtes de minerais de fer oxydés.

Critères de la prédisposition		Puits de d'exploitation de gîtes de fer oxydés
		1
Objet	Présence du puits	0
	Diamètre du puits	-1
	Nature du parement	1
	Traitement du vide	-1
Contexte	Nature des terrains environnants	0
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	0
	Anthropisation et apport extérieur en eau	0
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	1
Total : Score P		0
Classe de prédisposition		Sensible

Suite à la grille d'évaluation du score P , le puits est *a priori* classé en catégorie « Sensible ».

8.3.3 Qualification de l'aléa d'effondrement localisé

Le Tableau 23 niveau d'aléa d'effondrement localisé est déterminé à partir de la classe d'intensité d'effet et de la classe de prédisposition locale, autant pour les cratères primaires et secondaires.

Tableau 24 : Valeurs des classes d'intensité d'effet et de prédisposition, permettant la qualification du niveau d'aléa pour le type de puits d'exploitation de gîtes de minerais de fer oxydés.

ID	r_p (m)	Z_{vide} (m)	Rayon impréc. (m)	Classe de prédisp	Cratère primaire				Cratère secondaire			
					$r_{cratère1}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Niveau d'aléa	Rayon zone aléa (m)	$r_{cratère2}$ (m)	Classe d'intensité d'effet	Niveau d'aléa	Rayon zone aléa (m)
1	0,79	30	10	Sensible	1,06	Limitée	Faible	11,06	4,48	Élevée	Moyen	14,48

Le niveau d'aléa est « faible » pour le cratère primaire et « moyen » pour le cratère secondaire. On constate que les zones d'aléas sont assez étendues en raison de l'importance de l'imprécision cartographique frappant la position de ce puits d'exploitation de gîtes de minerais de fer oxydés.

À l'échelle de l'exploitation d'un gîte de minerais de fer oxydés, ce type de puits s'amasse densément sur de faibles étendues à l'aplomb du gîte. Les zones d'aléas associées se superposent et forment une zone coalescente correspondant à une courbe enveloppe. Ce type de représentation à l'échelle d'un groupe de puits, voire du filon entier, est privilégié pour qualifier l'aléa globalement sur le secteur. Par exemple, le secteur illustré par la Figure 31 correspond à un secteur situé à l'aplomb d'une partie d'un gîte de minerais de fer oxydés (chapeau de fer d'un gîte sulfuré). L'aléa est qualifié globalement au niveau « moyen ». Cela revient à dessiner la trace du gîte à l'origine de l'exploitation minière.

Comme ces puits ne sont qu'un des éléments de déconsolidation de la masse de minerai, avec les travaux menés dans les quelques mètres autour du puits, l'aléa d'effondrement et l'aléa de tassement de la masse potentiellement déconsolidée par places seront fusionnés dans un aléa de tassement.

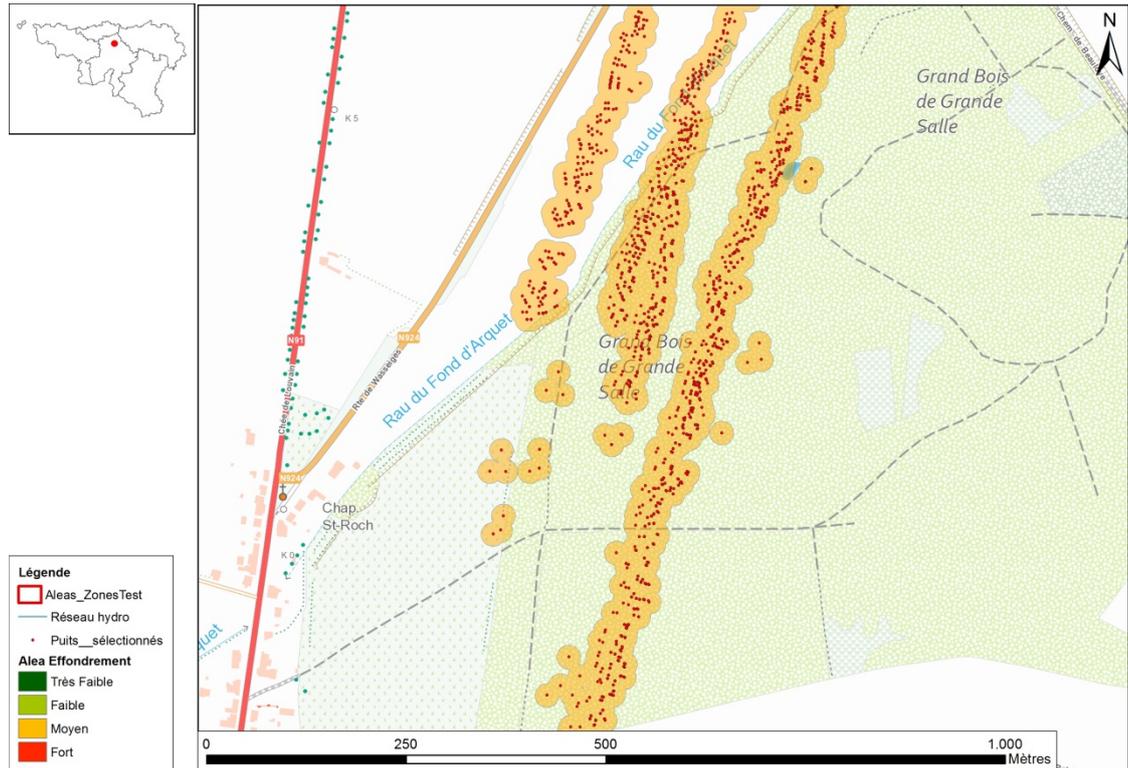


Figure 31 – Cartographie d'une zone d'aléas d'effondrement localisé pour des secteurs renfermant des puits d'exploitation de minerais de fer oxydés.

8.4 Les objets comportant des cavités souterraines

Cette catégorie concerne les objets souterrains contenant un volume de vide souterrain en leur sein : chambre, galerie, carrières souterraines, marnières,...

8.4.1 L'aléa de tassement

L'aléa de tassement est défini et représenté pour tous ce type d'objets souterrains, en un niveau unique « Faible » à l'aplomb de l'extension géographique :

- des objets souterrains présentant un volume de vide en leur sein ;
- des parties de massifs ou de formations déconsolidés et/ou altérés.

Ces zones sont cependant dilatées afin de tenir compte de la zone d'influence de l'objet souterrain vers la surface. Habituellement, on fixe un angle de 35° depuis les limites horizontales de l'objet.

8.4.2 L'aléa d'effondrement localisé

A. Hypothèses de travail

L'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé, généré par des objets souterrains comportant un volume de vide en leur sein (chambres, galeries, cavités), repose sur :

- l'évaluation du volume de vide V_{disp} initialement présent au sein de l'objet souterrain et « disponible » pour l'effondrement ;

- la mise en place d'un fontis au départ du toit de ce volume de vide précédemment identifié et d'un mécanisme de remontée vers la surface ;
- la quantification du volume de vide résiduel V_r arrivant en surface et résultant du parcours de la cheminée de fontis sur une certaine distance ;
- le développement d'un cratère, d'abord un cratère primaire – le véritable accident – et ensuite un cratère secondaire qui prendra son plein développement s'il n'est pas traité en cours d'évolution, à partir de ce volume résiduel et de l'épaisseur z_{fm} des formations superficielles meubles et/ou altérées
- la prédisposition locale qui repose elle-même sur la prédisposition de chacune des étapes de développement et de remontée du fontis.

La cheminée de fontis de forme cylindrique se développe dans les terrains cohérents (massif sain) sur une distance séparant le toit de la cavité vide et la base des formations superficielles meubles et/ou altérée. À partir de l'interface entre les terrains cohérents et ces formations superficielles, un cratère en forme d'entonnoir peut se développer comme pour les puits après que le fontis ait généré en surface le cratère primaire.

Ce schéma permet de passer de l'objet souterrain au cratère d'effondrement primaire, puis secondaire, et inversement, comme illustré aux Figure 32 et Figure 33.

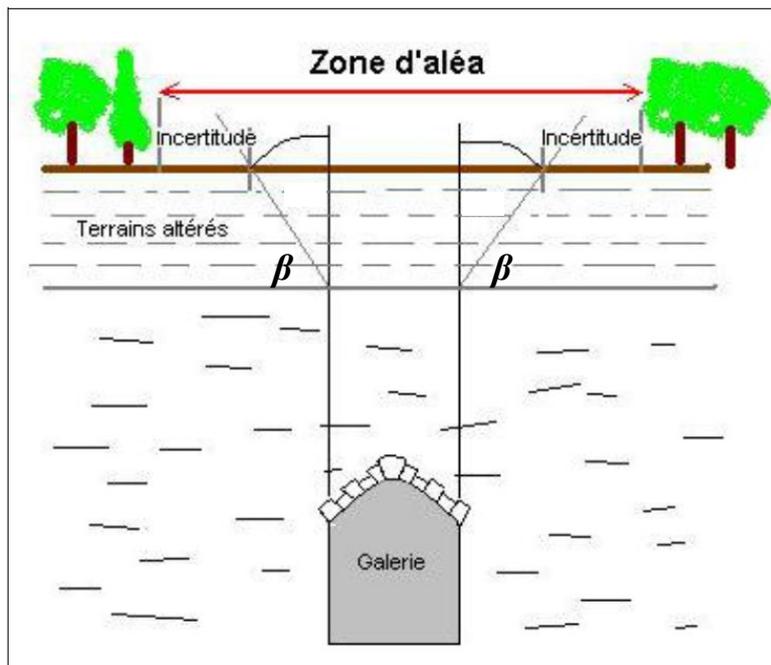


Figure 32 – Principe de construction de la zone d'aléa d'effondrement localisé pour une galerie située à une profondeur constante (adapté de INERIS, 2006)

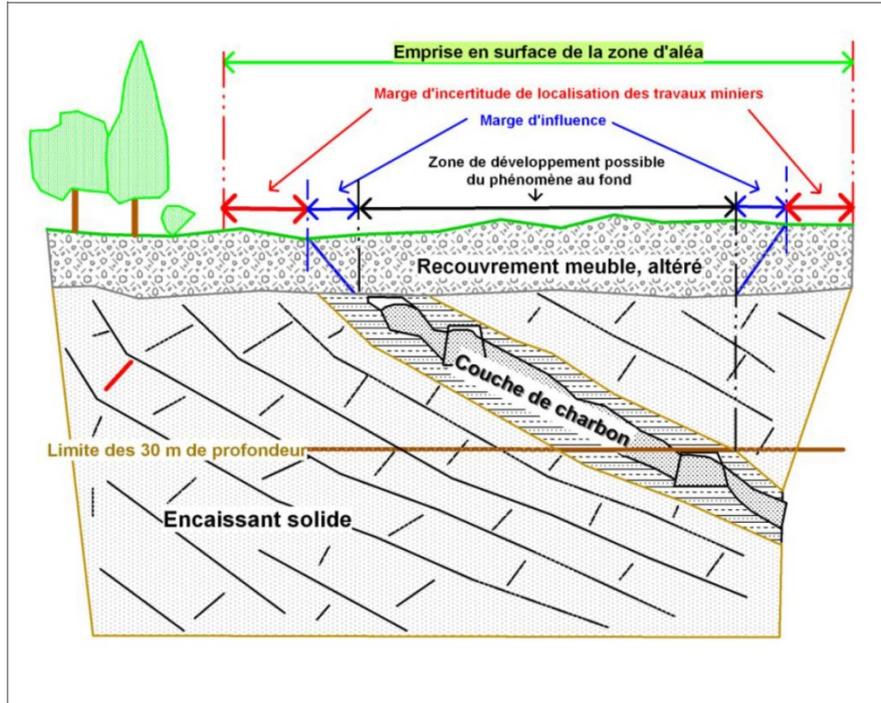


Figure 33 – Principe de construction de la zone d'aléa d'effondrement localisé pour une galerie dont la profondeur est variable (INERIS, 2006)

Pour illustrer la méthode de calcul, les six configurations du Tableau 24 sont prises en exemple pour la suite de ce paragraphe.

Tableau 25 : Données relatives aux 6 objets souterrains pris comme exemple pour évaluer l'aléa d'effondrement localisé.

ID	1	2	3	4	5	6
type	Galerie	Galerie	Galerie	Chambre (croisement de 2 galeries)	Chambre (croisement de 2 galeries)	Chambre (croisement de 2 galeries)
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50
Hauteur h (m)	1,5	1,5	1	4	6	4
Largeur L (m)	1	1,5	1,5	4	4	4
Largeur l (m)	-	-	-	4	4	4
Epaisseur des formations superficielles z_{fm} (m)	1	1	1	4	4	4

On considère que ces cavités sont creusées dans des roches plus indurées : c'est pourquoi le coefficient des terrains éboulés K_{je} est fixé à 1,2. Dans les massifs grésos-schisteux du Houiller, ce coefficient peut monter jusqu'à 1,3 (dominante schisteuse) ou 1,4 (dominante gréseuse).

L'angle α de talus du tas de matériaux rocheux constituant le toit de l'objet souterrain, qui s'éboule dans la cavité souterraine vide lors de la rupture, est fixé à 40°.

Pour le développement des cratères d'effondrement primaire et secondaire, l'angle β_1 est fixé à 85° (sur les 3 m supérieurs du cratère primaire) et l'angle β_2 à 30° dans les terrains superficiels meubles. On considère aussi que cet élargissement de la partie supérieure ces

cratères ne se développe jusqu'à une profondeur maximale de 3 mètres sous le niveau du sol. Cela revient à fixer $z_{fm} = 3$ mètres.

Le coefficient de foisonnement K_{fm} pour les formations superficielles éboulées dans le cratère d'effondrement, est fixé à 1,1.

B. Qualification de l'intensité d'effet

Les relations de la section 7.2 sont reprises pour calculer le volume de vide V_{disp} disponible au sein de l'objet, le volume de vide résiduel V_r arrivant en surface et les volumes mobilisables pour les cratères d'effondrement primaire et secondaire.

Calcul du volume disponible

Le modèle de « Whittaker & Reddish » permet le calcul du volume de vide souterrain V_{disp} , que l'objet rend « disponible » pour l'effondrement, à partir des paramètres géométriques de l'objet concerné. Les valeurs sont données au Tableau 25 pour les 6 objets souterrains.

Il s'agit du volume qui sera occupé par les éboulis lors de la rupture du toit de l'objet. Il comprend le volume de la chambre et le volume des tas qui se déverseront dans les conduits et galeries annexes.

Pour les galeries, on considère comme chambre, une section de longueur identique à leur largeur L .

Tableau 26 : Calcul du volume de vide disponible à partir des paramètres géométriques des 6 objets souterrains considérés.

ID	1	2	3	4	5	6
type	Galerie	Galerie	Galerie	Chambre (carrefour de 4 galeries)	Chambre (carrefour de 4 galeries)	Chambre (carrefour de 4 galeries)
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50
Hauteur h (m)	1,5	1,5	1	4	6	4
Largeur L (m)	1	1,5	1,5	4	4	4
Largeur l (m)	(1)	(1,5)	(1,5)	4	4	4
Nombre m d'extension de largeur L	2	2	2	2	2	2
Nombre n d'extension de largeur l	0	0	0	2	2	2
Volume disponible V_{disp} (m ³)	4,18	9,86	5,38	216,54	439,23	216,54

Remontée du fontis

Les relations modélisant l'auto-comblement de la remontée de fontis permet d'identifier les profondeurs maximales au-delà desquelles les chambres et les galeries, de sections déterminées, ne peuvent plus « envoyer » de fontis jusqu'à la surface.

Les distances d'auto-comblement $z_{auto-comblement}$ et les volumes résiduels V_r , parvenant jusqu'à la surface sont présentés au Tableau 26 pour tous les objets étudiés.

Tableau 27 : Valeurs calculées des profondeurs d'auto-comblement et des volumes de vide résiduels en surface pour les 6 objets souterrains.

ID	1	2	3	4	5	6
type	galerie	galerie	galerie	chambre	chambre	chambre
Largeur L (m)	1	1,5	1,5	4	4	4
Rayon de la cheminée de fontis R_{cf} (m)	0,5	0,875	0,875	2	2	2
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50
Profondeur d'auto-comblement $Z_{\text{auto-comblement}}$ (m)	26,62	20,50	11,19	86,16	174,76	86,16
Percée ou auto-comblement du fontis?	Percée	Auto-comblement	Auto-comblement	Percée	Percée	Percée
Volume résiduel V_r (m^3)	0,25	(-2,16)	(-6,64)	153,71	376,39	90,88
Ratio V_r / V_{disp}	6%	(-22%)	(-123%)	71%	86%	42%

Dans le groupe des objets galeries, les fontis atteignent l'auto-comblement pour les objets 2 et 3. Quant à l'objet 1, on constate que le fontis perce en surface avec un volume de vide résiduel V_r de seulement 6 % du V_{disp} .

L'auto-comblement du fontis est favorisé dès que le rapport « largeur / hauteur » augmente, c'est-à-dire des galeries peu hautes et larges plutôt que des galeries hautes et étroites.

D'après le modèle, les fontis au départ de galeries ou de chambres de moins de 4 m² de section et situées à au moins 30 mètres de profondeur, n'atteignent pas la surface en raison de l'auto-comblement et ne provoquent pas de cratère d'effondrement localisé en surface. Cela concorde avec les observations de terrain et les retours d'expérience. Cependant, dans la zone de surface soumise à l'influence de l'objet, on peut redouter du tassement différentiel, voire un affaissement localisé plus ou moins marqué (« pseudo-doline »), préjudiciable à des cibles très vulnérables (infrastructures, bâtiments fragiles...)

L'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé ne prend en compte que les objets souterrains situés au-dessus de cette profondeur d'auto-comblement (voir Figure 33).

Les objets « chambres » ont des volumes disponibles V_{disp} bien plus importants et leur rapport « V_{disp} / profondeur » est plus aussi plus élevé que pour les galeries. D'après le modèle, ces carrières devraient idéalement être situées à un minimum de 100 mètres de profondeur pour favoriser l'auto-comblement et éviter tout cratère d'effondrement en surface. À une profondeur de 25 mètres, le volume de vide résiduel arrivant en surface V_r est de l'ordre de 86 à 42 % d'après les exemples présentés. Ici aussi, on constate que l'auto-comblement est favorisé par les cavités larges et peu hautes.

Cratère primaire

Le cratère d'effondrement primaire a la forme d'un volume cylindrique, dont les parois latérales sont inclinées de $\beta_l = 85^\circ$ sur les 3 derniers mètres avant la surface :

$$r_{\text{cratère1}} = \begin{cases} R_{cf} + \frac{z}{\tan \beta_1}, & \text{si } z < 3 \\ R_{cf} + \frac{3}{\tan \beta_1}, & \text{si } z \geq 3 \end{cases}$$

Pour le calcul de la profondeur du cratère primaire, on considère le volume du cratère comme totalement cylindrique. Cela donne :

$$r_{\text{cratère1}} = R_{cf}$$

et

$$z_{\text{cratère1}} = \frac{V_r}{\pi \cdot K_{fm} \cdot R_{cf}^2}$$

Tableau 28 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement primaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.

ID	1	2	3	4	5	6
type	galerie	galerie	galerie	chambre	chambre	chambre
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50
Rayon de la cheminée de fontis R_{cf} (m)	0,5	0,875	0,875	2	2	2
Percée ou auto-comblement ?	Percée	Auto-comblement	Auto-comblement	Percée	Percée	Percée
Volume résiduel V_r (m ³)	0,25	-	-	153,71	376,39	90,88
Volume résiduel V_r foisonné (m ³)	0,23	-	-	139,74	342,18	82,62
Epaisseur des formations superficielles z_{fm} (m)	1	1	1	4	4	4
$r_{\text{cratère1}}$ (m)	0,52	-	-	2,70	3,32	2,46
$z_{\text{cratère1}}$ (m)	0,29	-	-	11,12	27,23	6,57
Classe d'intensité d'effet	Limitée	Néant	Néant	Élevée	Élevée	Élevée

En raison de leur plus petit volume disponible pour l'effondrement, les galeries ont systématiquement des intensités d'effet sont plus faibles, voire inexistantes, que pour les chambres souterraines.

L'objet 4 est à pointer car la profondeur de son cratère d'effondrement primaire dépasse la profondeur de l'objet. Cela signifie que les éboulis de la cheminée de fontis sont arrivés à peine à combler 14 % du volume de vide disponible au sein de l'objet. Par conséquent, le fontis reste ouvert.

Cratère secondaire

Le cratère secondaire est considéré se développer sous une forme conique à partir du volume V_r foisonné. On obtient :

Tableau 29 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.

ID	1	2	3	4	5	6
type	galerie	galerie	galerie	chambre	chambre	chambre
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50
Rayon de la cheminée de fontis R_{cf} (m)	0,5	0,875	0,875	2	2	2
Percée ou auto-comblement ?	Percée	Auto-comblement	Auto-comblement	Percée	Percée	Percée
Volume résiduel V_r foisonné (m ³)	0,23	-	-	139,74	342,18	82,62
Epaisseur des formations superficielles z_{fm} (m)	1	1	1	4	4	4
$r_{mob2\ max}$ (m)	2,23	-	-	8,93	8,93	8,93
$r_{cratère2}$ (m)	0,73	-	-	6,34	8,54	5,32
$z_{cratère2}$ (m)	0,42	-	-	3,66	4,93	3,07
Classe d'intensité d'effet	Limitée	Néant	Néant	Très élevée	Très élevée	Très élevée

Les rayons des cratères secondaires calculés pour les quatre objets souterrains restent inférieurs à la valeur maximale déterminée par l'épaisseur des formations superficielles meubles et/ou altérées.

On constate que les intensités d'effet ont augmenté d'une classe seulement pour les chambres, alors que la galerie n'est pas concernée. Cela s'explique par l'importance des volumes concernés.

Tableau récapitulatif

Le

Tableau 29 a été établi sur base d'un retour d'expérience relatifs à des effondrements décrits depuis 1850, en rapport avec des objets souterrains susceptibles de développer un fontis jusqu'en surface. Ce tableau récapitulatif liste, en effet, le rayon de l'effondrement modélisé et l'intensité d'effet associée pour chaque type d'objet.

Tableau 30 : Tableau récapitulatif des diamètres de cratère d'effondrement évalués pour les cavités souterraines susceptibles de développer un fontis jusqu'en surface.

Objet	Diam. Fontis initial	Intensité – référence (diamètre)	Intensité de l'effet	Prédisp. objet	Présomption de présence dans la zone
Car. souterraine (extension)					
Craie, tuffeau/silex	6,2 m	3,0 – 10,0 m	Élevée	Très sensible	En tout point
Craie phosphatée	5,4 m	3,0 – 10,0 m	Élevée	Sensible	En tout point
Car. souterraine de craie, tuffeau/silex (point connu)					
Z. de présence certaine	6,2 m	3,0 – 10,0 m	Élevée	Très sensible	Uniforme et certaine
Z. présence possible	6,2 m	3,0 – 10,0 m	Élevée	Très sensible	Possible
Z. de contexte favorable à la présence de marnières	6,2 m	3,0 – 10,0 m	Élevée	Très sensible	Présumé
Car. sout. phosphate					
Puits	1,8 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Sensible	16-25 puits/ha
Galleries	1,8 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Peu sensible	En tout point
Car. s. pierre Gobertange					
Puits	1,7 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Peu sensible	5-15 puits/ha
Galleries	0 m	-	Négligée	Négligée	Négligée
« Puits à marne » / « Puits à pierres » du Brabant wallon (point connu)					
Z. de présence certaine	2,1 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Très sensible	En tout point
Z. présence possible	2,1 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Très sensible	En tout point
Puits à silex néolithiques					
	2,1 m	1,5 – 3,0 m	Modérée	Peu sensible	Env. 100 pts/ha

C. Qualification de la prédisposition locale

La prédisposition des 6 objets est évaluée d'après les critères permettant le calcul du score P (voir Tableau 30).

Tableau 31 : Qualification de la prédisposition pour les 6 objets souterrain - évaluation du score P d'après les critères

Critères de la prédisposition		Objets souterrains					
		1	2	3	4	5	6
Objet	Présence du vide	1	1	1	1	1	1
	Largeur de la cavité	-1	-1	-1	0	0	0
	Fracturation du toit	0	0	0	0	0	0
	Traitement du vide	1	1	1	1	1	1
Contexte	Eau dans l'objet souterrain	0	0	0	0	0	0
	Nature du recouvrement	0	0	0	0	0	0
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	0	0	0	0	0	0
Total : Score P		0	0	0	1	1	1
Classe de prédisposition		Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible

Les 6 objets sont tous identifiés dans la classe de prédisposition « Sensible ».

D. Qualification de l'aléa d'effondrement localisé

Le Tableau 36 rassemble les classes de prédisposition et d'intensité d'effet des cratères primaires et secondaires pour les 6 objets souterrains. Il détermine les niveaux d'aléas associés.

Tableau 32 : Valeur des volume et rayon du cratère d'effondrement secondaire, ainsi que des classes d'intensité d'effet respectives, pour les objets souterrains illustrés.

ID	1	2	3	4	5	6	
type	galerie	galerie	galerie	chambre	chambre	chambre	
Profondeur z (m)	25	25	25	25	25	50	
Percée ou auto-comblement ?	Percée	Auto-comblement	Auto-comblement	Percée	Percée	Percée	
Épaisseur des formations superficielles z_{fm} (m)	1	1	1	4	4	4	
Classe de prédisposition	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	
Cratère primaire	$r_{cratère1}$ (m)	0,52	-	-	2,70	3,32	2,46
	Classe d'intensité d'effet	Limitée	Néant	Néant	Élevée	Élevée	Élevée
	Niveau d'aléa	Faible	Néant	Néant	Moyen	Moyen	Moyen
Cratère secondaire	$r_{cratère2}$ (m)	0,73	-	-	6,34	8,54	5,32
	Classe d'intensité d'effet	Limitée	Néant	Néant	Très élevée	Très élevée	Très élevée
	Niveau d'aléa	Faible	Néant	Néant	Fort	Fort	Fort

Le niveau d'aléa augmente d'une classe pour les chambres dès que les cratères secondaires sont considérés. Cette augmentation est surtout conditionnée par l'épaisseur de formations superficielles qui est plus importante dans le cas des chambres que pour les galeries.

Le cas de la galerie 1, qui provoque un effondrement en surface, ne voit pas son niveau d'aléa modifié en raison des très faibles rayons des cratères primaire et secondaire. Par contre, les galeries 2 et 3 ont un niveau d'aléa inexistant vu l'inexistence de leur classe d'effet respective.

Représentation cartographique

La représentation cartographique de ces zones d'aléas se construit comme suit :

- 1) d'abord considérer la projection horizontale des parties vides des objets souterrains et les détourner afin d'obtenir des périmètres et des zones géographiques à l'aplomb des objets. A défaut de plan précis, présumer que le vide, avec ses dimensions maximale, peut être présent partout dans un périmètre fixé (parcelle déclarée ou périmètre d'extension connu) ;
- 2) dilater les zones obtenues de la valeur du rayon du cratère d'effondrement (primaire ou secondaire), afin de tenir compte de l'intensité d'effet ;

- 3) affecter à chaque zone, la couleur associée à son niveau d'aléa d'effondrement localisé.

E. Les exploitations souterraines de phosphates en Hesbaye

En Hesbaye, l'exploitation d'une parcelle renfermant une couche de phosphate exploitable était menée par une série de puits de faible section (1 à 1,5 m de diamètre), creusés en ligne, à 20 ou 30 m les uns des autres.

Au pied de ces puits courait, dans la couche de phosphate et dans la craie blanche sous-jacente, une "maîtresse galerie", étroite (1 m de large), dont le pied était creusé dans la couche de craie sous-jacente afin de lui donner une hauteur suffisante à la circulation (galerie "bosseyée", de 1,2 à 1,7 m de hauteur).

De cette maîtresse-galerie partaient, perpendiculairement, tous les trois mètres environ, des galeries secondaires de même hauteur, longues d'une dizaine de mètres. Des « tailles » (chantiers d'abattage) étaient menées dans la couche de phosphate de part et d'autre de ces galeries secondaires.

Ces tailles avaient une hauteur limitée à l'épaisseur de la couche, soit de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à un peu plus d'un mètre (cette couche est un résidu insoluble d'altération d'une craie phosphatée).

Le toit, constitué du conglomérat à silex de Hesbaye, était soutenu par des massifs laissés en place et par un boisage plus ou moins bien réalisé. Les vides en arrière du front de taille étaient remblayés au moyen des déchets d'exploitation et de la craie issue du creusement du pied des galeries.

Lorsque la parcelle était étendue, plusieurs lignes de puits étaient en activité. En fin d'activité, les puits étaient remblayés au moyen des terres de creusement. Parfois, l'accès à la ou aux galeries de pied était fermé d'un mur de blocs de silex.

Les accidents connus semblent se limiter au débouillage de remblais des puits.

Hypothèses retenues

On considère une exploitation de phosphate pour laquelle quatre configurations sont étudiées ci-après :

- 1) le puits d'accès débouille et se vide partiellement de ses remblais vers les deux galeries attenantes ;
- 2) le départ d'un fontis depuis une galerie d'exploitation de phosphate située à une profondeur de 15 mètres, profondeur minimale constatée sur le terrain ;
- 3) le départ d'un fontis depuis une galerie d'exploitation de phosphate située à une profondeur de 22 mètres, profondeur moyenne constatée sur le terrain ;
- 4) le départ d'un fontis depuis une galerie d'exploitation de phosphate située à une profondeur de 30 mètres, profondeur maximale constatée sur le terrain.

Avant d'utiliser les relations du paragraphe 7.2.2, on fixe les valeurs des paramètres suivants pour les configurations retenues pour les exploitations de phosphate :

- la profondeur du puits d'accès à 22 mètres ;
- le nombre n de galeries creusées au départ du puits à 2, et $m = 0$;
- le rayon du puits d'accès à 0,75 mètre ;
- la largeur de la galerie à 1 mètre ;

- la hauteur de la galerie à 1,7 mètre ;
- un coefficient K_{fe} de foisonnement des matériaux éboulés (principalement limoneux) à 1 pour les remblais du puits, et à 1,1 pour la remontée du fontis ;
- un coefficient K_{fm} de foisonnement des formations superficielles (principalement limoneuses) à 1,0 pour la configuration avec le puits d'accès et à 1,1 pour les trois autres configurations (percée du fontis) ;
- un angle de pente de cratère primaire β_1 de 90° pour les 3 premiers mètres du sol, et l'angle de pente de cratère secondaire β_2 de 35° (limons).

Tableau 33 : Données des quatre configurations retenues pour qualifier l'aléa d'effondrement localisé pour les exploitations souterraines de phosphate en Hesbaye.

Configurations	Exploitation de phosphate en Hesbaye			
	1	2	3	4
z (m)	22	15	22	30
l (m)	1	1	1	1
L (m)	1	1	1	1
h (m)	1,7	1,7	1,7	1,7
n	2	2	2	2
m	0	0	0	0
α ($^\circ$)	35	40	40	40
V_{disp} (m ³)	4,13	5,14	5,14	5,14

Dans le Tableau 32, la valeur de l'angle α du tas d'éboulis est adaptée entre le cas des remblais (configuration 1) considérés comme des matières à granulométrie fine et sans foisonnement, et le cas des terrains naturels surmontant la galerie d'exploitation, considérés limoneux et favorables au foisonnement. Une distinction similaire est affichée dans le

Tableau 33 pour le K_{fe} .

Pour la première configuration, le puits est remblayé totalement sur toute sa hauteur et la naissance des galeries partant du fond du puits, sont murées avec de la pierre sèche. Ces murs retiennent la masse de remblais présente dans le puits. On suppose que le volume de vide souterrain se crée par la rupture de ces murs de pierre sèche. Le volume disponible correspond au volume des tas de remblais du puits qui se déversent dans la naissance des deux galeries et se monte à 4,13 m³.

Pour les trois autres configurations, on considère le départ du fontis depuis le toit de la galerie totalement vide.

Tableau 34 : Qualification de l'effet d'effondrement localisé - Calcul des volumes disponible et résiduels, et des cratères d'effondrement primaire et secondaire induit par une exploitation souterraine de phosphate en Hesbaye.

Configurations	Exploitation de phosphate			
	1	2	3	4
V_{disp} (m ³)	4,13	5,14	5,14	5,14
Rcf (m)	0,75	0,5	0,5	0,5
K_{fe}	1,0	1,2	1,2	1,2
$Z_{autocombl}$ (m)	∞	32,75	32,75	32,75
Z (m)	22	15	22	30
V_r (m ³)	4,13	2,79	1,69	0,43
V_r / V_{disp}	71%	54%	33%	8%
z_{fm} (m)	3	3	3	3
Percée ou auto-comblement du fontis ?	Percée	Percée	Percée	Percée
K_{fm}	1,0	1,1	1,1	1,1
V_r foisson (m ³)	4,13	2,53	1,53	0,39
$R_{cratère1}$ (m)	0,75	0,5	0,5	0,5
$Z_{cratère1}$ (m)	2,34	3,23	1,95	0,50
Classe d'intensité d'effet	Limitée	Limitée	Limitée	Limitée
$R_{cratère2}$ (m)	1,78	1,51	1,28	0,81
$Z_{cratère2}$ (m)	1,25	1,06	0,90	0,57
Classe d'intensité d'effet	Élevée	Élevée	Modérée	Modérée

Le mécanisme de remontée du fontis vers la surface se produit le long du puits d'accès, mais sans effet sur le volume de vide résiduel V_r car le remblai ne foisonne pas.

Pour le fontis au départ du toit de la galerie, on constate nettement l'effet de la profondeur sur la réduction de V_r : de 54 à 8 % en passant d'une profondeur de 15 à 30 mètres.

Le volume de vide résiduel foisonné ($K_{fm} \cdot V_r$) du fontis se transforme ensuite en un cratère d'effondrement primaire supposé cylindrique. En utilisant les relations du 7.3.1. Il est considéré comme le véritable accident et sera considéré pour la cartographie de l'aléa.

Le cratère d'effondrement secondaire conserve le même volume de vide arrivé en surface et foisonné ($K_{fm} \cdot V_r$), mais sa forme devient conique renversée (entonnoir).

La prédisposition locale est qualifiée à partir des critères du score P au Tableau 34.

Tableau 35 : Qualification de la prédisposition locale via le score P pour les quatre configurations envisagées pour les exploitations de phosphates en Hesbaye.

Critères de la prédisposition		Exploitation de phosphate en Hesbaye			
Configuration		1	2	3	4
Objet	Présence du vide	1	1	1	1
	Largeur de la cavité	-1	-1	-1	-1
	Fracturation du toit	1	0	0	0
	Traitement du vide	-1	1	1	1
Contexte	Eau dans l'objet souterrain	-1	-1	-1	-1
	Nature du recouvrement	1	-1	-1	-1
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	1	1	1	1
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	1	1	1	1
Total : Score P		2	1	1	1
Classe de prédisposition		Sensible	Sensible	Sensible	Sensible

Le score P propose une classe « Sensible » pour les quatre cas d'exploitations de phosphate de Hesbaye (Tableau 34).

Pour les configurations 2 à 4, les raisons en sont la faible largeur des galeries et la bonne résistance géotechnique des terrains surmontant directement les excavations de phosphate (argile à silex). Cette raison n'est pas valable pour la configuration 1 car la formation du toit a été volontairement percée pour exploiter le phosphate.

Le Tableau 35 donne la qualification de l'aléa.

Tableau 36 : Qualification de l'aléa d'effondrement localisé pour l'exploitation de phosphate en Hesbaye.

		Exploitation de phosphate			
Configuration		1	2	3	4
Classe de prédisposition		Sensible	Sensible	Sensible	Sensible
Cratère primaire	$R_{\text{cratère1}}$ (m)	0,75	0,5	0,5	0,5
	Classe d'intensité d'effet	Limitée	Limitée	Limitée	Limitée
	Niveau d'aléa d'effondrement localisé	Faible	Faible	Faible	Faible
Cratère secondaire	$R_{\text{cratère2}}$ (m)	1,78	1,51	1,28	0,81
	Classe d'intensité d'effet	Élevée	Élevée	Modérée	Modérée
	Niveau d'aléa d'effondrement localisé	Moyen	Moyen	Faible	Faible

Comme les exploitations de phosphates ne sont globalement renseignées qu'à l'échelle des parcelles cadastrales, on considère que les puits peuvent avoir été creusés n'importe où dans ces parcelles. C'est pourquoi les zones d'aléas de classe moyenne prendront l'extension de ces

parcelles cadastrales concernées (Figure 34). Cela revient à gérer globalement cet aléa à l'instar des puits de minières exposés ci-avant.

F. Les marnières de Hesbaye

Pour les marnières, l'évaluation des effets d'effondrement localisé a de nouveau recours à la modélisation du fontis et de sa remontée vers la surface. En effet, un fontis peut prendre naissance au départ d'un vide souterrain de toutes natures. Que celui-ci soit une chambre, une cavité, ou une galerie, les mécanismes du fontis et de sa remontée restent les mêmes.

Pour les exemples numériques, 5 configurations d'exploitations de craie et de marnières ont été choisies en accord avec les caractéristiques observées en Hesbaye :

- 1) des marnières de 3,5 mètres de large et de 5 mètres de hauteur, comportant 4 galeries au niveau du point de déclenchement du fontis ;
- 2) des marnières de mêmes dimensions, comportant 2 galeries opposées au niveau du point de déclenchement du fontis ;
- 3) marnières de plus petites dimensions (2 mètres de largeur pour 3,5 mètres de hauteur), avec 4 galeries au niveau du point de déclenchement du fontis ;
- 4) marnières de 2 mètres de largeur pour 3,5 mètres de hauteur, avec 2 galeries opposées, au niveau du point de déclenchement du fontis.

Tableau 37 : Données géométriques de 4 typologies de marnières de Hesbaye

	Marnières 1	Marnières 2	Marnières 3	Marnières 4
z (m)	25	25	22	22
l (m)	3,5	3,5	2	3
L (m)	3,5	3,5	2	2
h (m)	5	5	3,5	3,5
n	4	2	2	0
m	0	0	2	2
α (°)	40	40	40	40
V_{disp} (m ³)	269,81	165,53	72,40	50,20

Le volume de vide disponible V_0 est calculé à partir des relations du A.

Les paramètres de la cheminée de fontis sont donnés par le rayon de la cheminée R_{cf} , correspondant au rayon du puits.

Le volume résiduel V_r restant après le parcours d'une distance z (correspondant à la profondeur) le long du puits est celui qui servira pour les cratères primaire cylindrique et secondaire conique

Tableau 38 : Paramètres de la cheminée de fontis calculés pour les 4 typologies de marnières en Hesbaye.

	Marnières 1	Marnières 2	Marnières 3	Marnières 4
R_{cf} (m)	1,75	1,75	1	1,25
K_{fm}	1,1	1,1	1,2	1,2
$Z_{\text{autocombl}}$ (m)	280,43	172,05	230,44	102,26
z (m)	25	25	22	22
V_r (m ³)	245,75	141,48	65,48	39,40
V_r / V_0	91%	52%	84%	78%

Le cratère primaire est considéré de forme cylindrique ($\beta_1 = 90^\circ$) et non tronconique car il se développera complètement dans la couche de limons très épaisse qui recouvre le plateau de Hesbaye. Et β_2 est fixé à 35° en raison du limon qui constitue principalement les formations superficielles.

Les rayons $r_{\text{cratère}}$ et profondeurs $z_{\text{cratère}}$ sont donnés pour les types de cratères d'effondrement au tableau suivant.

Tableau 39 : Calculs des dimensions des cratères d'effondrement primaire et secondaire pour les 4 typologies de marnières de Hesbaye.

	Marnières 1	Marnières 2	Marnières 3	Marnières 4
$r_{\text{cratère1}}$ (m)	1,75	1,75	1,00	1,25
$z_{\text{cratère1}}$ (m)	25,54	14,70	20,84	8,03
Intensité d'effet	Elevée	Elevée	Modérée	Modérée
$r_{\text{cratère2}}$ (m)	7,41	6,16	4,47	4,02
$z_{\text{cratère2}}$ (m)	4,28	3,56	3,13	2,32
Intensité d'effet	Très élevée	Très élevée	Elevée	Elevée

Pour la qualification de la prédisposition, on reprend le score P pour ces 5 configurations.

Tableau 40 : Qualification de la prédisposition pour les 4 configurations de marnières - évaluation du score P d'après les critères

Critères de la prédisposition		Configurations de marnières			
		1	2	3	4
Objet	Présence du vide	1	1	1	1
	Largeur de la cavité	0	0	-1	-1
	Fracturation du toit	0	0	0	0
	Traitement du vide	-1	-1	-1	-1
Contexte	Eau dans l'objet souterrain	-1	-1	-1	-1
	Nature du recouvrement	1	1	1	1
	Phénomènes semblables connus dans le voisinage	1	1	1	1
	Présence d'eau dans les terrains de recouvrement	0	0	0	0
Total : Score P		1	1	1	0
Classe de prédisposition		Sensible	Sensible	Sensible	Sensible

En se référant aux cratères primaires, on attribue les classes d'intensité d'effet et de prédisposition :

Tableau 41 : Attribution des classes d'intensité d'effet, de présdisposition et de niveau d'aléa pour les 4 typologies de marnières de Hesbaye.

		Marnières 1	Marnières 2	Marnières 3	Marnières 4
	Prédisposition	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible
Cratère primaire	$r_{\text{cratère1}}$ (m)	1,75	1,75	1,00	1,25
	Intensité d'effet	Elevée	Elevée	Modérée	Modérée
	Niveau d'aléa effondrement localisé	Moyen	Moyen	Faible	Faible
Cratère secondaire	$r_{\text{cratère2}}$ (m)	7,41	6,16	4,47	4,02
	Intensité d'effet	Très élevée	Très élevée	Elevée	Elevée
	Niveau d'aléa effondrement localisé	Fort	Fort	Moyen	Moyen

Ces classes sont valables pour les exploitations connues. Cependant, la connaissance à l'égard de ces marnières n'est pas exhaustive et on suspecte qu'il y ait d'autres exploitations souterraines à des endroits où le gisement (phosphates, craies, marnes) est présent et situé au-dessus du niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine des craies de Hesbaye. C'est pourquoi on a recours à des zones de présomption de présence décroissante centrées sur les exploitations connues : présence certaine, présence possible et conditions de contexte favorables à la présence de marnières.

Les zones de présence certaine sont tracées 25 mètres autour des indices certains de marnières afin d'englober l'intégralité de leurs réseaux souterrains. Une zone élargie à 125 mètres autour de ces indices concerne les zones de présence possible (on constate un effet de groupe dans la répartition des marnières). Les zones de contexte favorable correspondent aux zones où les substances extraites sont disponibles parmi les formations géologiques et que les conditions d'une extraction artisanale sont réunies.

La classe de présdisposition peut être revue à la baisse si la certitude sur la présence de ces marnières décroît et permet au score P de changer de classe. Si tel est le cas, le niveau d'aléa se réduit d'un niveau.

Cartographiquement, les zones d'aléas relatives aux marnières de Hesbaye sont représentées à la Figure 34:

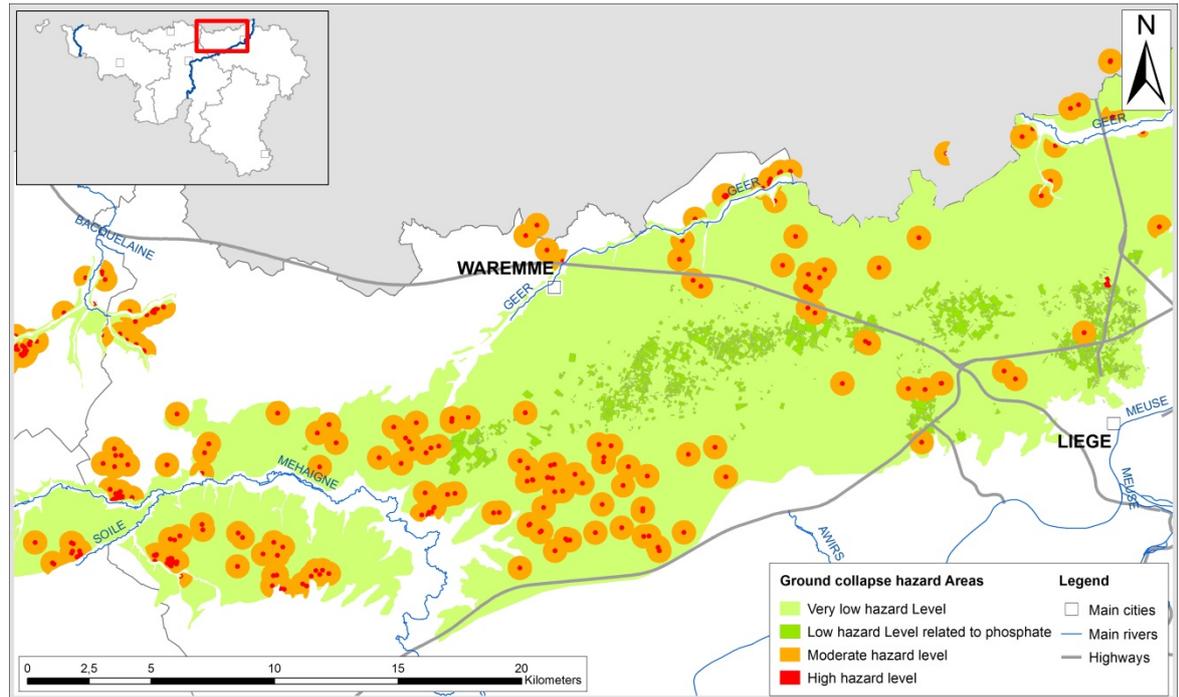


Figure 34 – Cartographie des zones d'aléas d'effondrement localisé représentées pour les marnières et les exploitations de phosphate de Hesbaye (Kheffi et al, 2018).

8.5 Les objets souterrains susceptibles de provoquer un effondrement généralisé

Les objets souterrains susceptibles de provoquer des effondrements généralisés se caractérisent par :

- l'origine anthropique de ce type d'objets ;
- la méthode d'exploitation en chambres et pilier abandonnés, qui maintient la présence de volumes de vides maintenus ouverts avec des extensions et une densité importantes ;
- la faible profondeur de ces vides, relativement à l'extension horizontale ;
- la présence de secteurs d'exploitation caractérisés par des différences au niveau des choix techniques de l'exploitation (taille des chambres, élancement des piliers, dépilage) propriétés du massif (résistance, failles, fracturation), du contexte (présence d'eau, karstification).

Vu l'ampleur des mécanismes et des effets relatifs à l'effondrement généralisé, l'approche présentée pour qualifier l'aléa d'effondrement localisé doit être abandonnée. Cependant, une tendance à l'effondrement généralisé est bien indiquée dans les secteurs de l'objet souterrain comportant des zones qualifiées en très fort niveau d'aléa d'effondrement localisé.

L'objet souterrain doit obligatoirement être appréhendé dans sa globalité pour qualifier l'aléa d'effondrement localisé. Mais le retour d'expérience en la matière est assez rare car les effondrements généralisés surviennent assez peu. Et, quand c'est le cas, aucune rétro-analyse n'a encore eu lieu afin d'en tirer des conclusions pratiques.

En guise de proposition, le Tableau 41 fournit une proposition basée sur les quelques cas connus d'effondrements généralisés en Wallonie.

Tableau 42 : Synthèse des effets attendus par les objets souterrains susceptibles de provoquer des effondrements généralisés ou en masse.

Objet	Diam. Fontis initial	Intensité – référence (diamètre)	Intensité de l'effet	Présomption de présence dans la zone
Car. sout susceptibles, en tout ou en partie (secteurs d'exploitation), d'effondrement généralisé				
Car. craie phosphatée	0,5 à 1 ha	> 10 m	Très fort	Secteur d'exploitation
Car. roche en plateure	0,5 à 1 ha	> 10 m	Très fort	Secteur d'exploitation
Car. sout susceptibles, en tout ou en partie, d'effondrement en masse				
Ardoisières	0,5 à 1 ha	> 10 m	Très fort	Extension
Car. roche en dressant	0,5 à 1 ha	> 10 m	Très fort	Extension
Mines de fer en chambres et piliers				
Mines de fer de Musson-Halanzy	0,5 à 1 ha	> 10 m	Très fort	Extension

9 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA DE MOUVEMENT DE TERRAIN SUR LE TERRITOIRE WALLON ET APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE

9.1 Objectif de la cartographie

L'objet principal de la mission confiée à l'ISSeP par la DGO3 était de fournir une cartographie de l'aléa de mouvement de terrain dû à des cavités souterraines sur l'ensemble du territoire wallon.

Etant donné la surface à couvrir, la variété d'objets considérés et la variété de contextes géologiques et géotechniques, cette cartographie ne pouvait prétendre à représenter l'aléa précis sur et aux abords de chaque objet. Elle se donnait pour objectifs :

- de revoir la cartographie des objets (tendre vers l'exhaustivité, améliorer la précision et valider les occurrences connues), ceux-ci devant servir d'appui au zonage à définir ;
- de créer la base d'une cartographie formations superficielles en Wallonie, imaginée d'abord comme une carte mais revue comme une couche – destinée à évoluer des points descriptifs de ces formations. Ces points sont essentiels dès lors où ils jouent de manière très sensible sur la prédisposition à la survenance d'un accident mais surtout sur les effets dus à l'évolution du cratère primaire vers un cratère secondaire en l'absence d'intervention de gestion de l'accident ;
- d'appliquer la méthodologie aux objets cartographiés, en tenant compte du contexte ainsi décrit.

Cette cartographie, perfectible et clairement destinée à évoluer tant en précision et exhaustivité des objets que par densification des points descriptif du contexte, est appelée à remplacer la cartographie des « zones de consultation sous-sol » aujourd'hui consultables en ligne sur l'application Thématiques Sous-sol du site du Service géologique de Wallonie (geologie.wallonie.be) que sur le Portail cartographique wallon, via son application WalonMap.

Ces « zones de consultation » étaient en pratique une première esquisse d'une cartographie de l'aléa de mouvement de terrain dus à des puits de mines, des exploitations sur gîtes métalliques et gîtes de fer et des carrières souterraines, qui n'osaient pas dire son nom. S'y ajoutent les zones de contraintes karstiques, les périmètres de contraintes liés à l'éboulement de parois rocheuses et ceux de glissement de terrain (Mont-de-l'Enclus et Pays de Herve uniquement).

Ces zones sont uniquement destinées à informer le public de l'opportunité de consulter les administrations compétentes pour en savoir plus dès lors où le projet interfère avec un des périmètres et de ne pas les consulter si ce n'est pas le cas (puisque alors, la seule réponse ne pourra être qu'il n'y a aucune information disponible à cet endroit, d'où travail inutile).

Les zones de consultation ont été construites par le SGW, avec cet objectif d'information et d'ajustement des zones pertinentes pour consulter, sur base :

- de chaque occurrence de puits (non encore triées et validées alors), affecté de son rayon d'imprécision cartographique, et d'un rayon de 10, 20 ou 30 m déterminé sur base de la géologie locale (faible épaisseur de terrain de recouvrement, terrain de recouvrement épais et terrains de mauvaise qualité géotechnique, comme les alluvions modernes), en considérant le cratère d'effondrement secondaire, dans un scénario maximaliste ;

- de chaque périmètre lié à des carrières souterraines, avec un buffer de 25 m destiné à couvrir l'imprécision de localisation cadastrale, les risques de débordement de la carrière et le risque d'un effet porté à l'extérieur du périmètre en cas d'effondrement sur la limite ;
- de la cartographie géologique des gîtes métalliques et des gîtes de fer, avec une zone d'imprécision de 50 m couvrant l'imprécision due aux sources de données et à l'absence souvent constatée de données sur l'extension des parties oxydées superficielles des deux types de gîtes.

Il était donc temps de revoir cette cartographie pour affiner le zonage et lui faire porter une information plus utile au public qu'une simple invitation à consulter l'administration et les experts. La cartographie des aléas contient en synthèse un partage de cette expertise vers le public et les utilisateurs professionnels.

9.2 Révision de la cartographie des objets

Les informations relatives aux sources et aux données cartographiques ayant permis de créer ou améliorer les couches relatives à chaque catégorie d'objet sont précisées au chapitre 6.

Il convient de retenir que certaines couches spécifiques ont été établies au cours de la mission pour servir à créer ou revoir des couches « objets ». C'est le cas :

- de la BD « Puits et Issues de Mines », dont les quelques 60.000 occurrences, dont de nombreux doublons, ont été validés :
 - en majorité par l'ISSeP dans le cadre de la présente mission, avec l'intégration des données de validation dans la BD ;
 - pour une autre, sur le terrain au cours des opérations de retrait des concessions menées par la Cellule Mines de la Direction des Risques industriels, géologiques et miniers en concertation avec les concessionnaires miniers ;
 - pour une partie, directement par les agents de la Cellule Mines ;
- de la cartographie des affleurements de veines de houille qui a permis de redéfinir les zones de contexte favorable à la présence de puits anciens non connus dans le Houiller (« zones de vieux puits »). Elle a été établie sur base :
 - des plans à 1/1.000 exploités par l'ISSeP lors de la mission « Numérisation des plans miniers et cartographie des puits de mines » (2001 et 2006-2011) ;
 - des plans de demandes et mutations en concessions à 1/10.000 exploités au cours de la présente mission. Les veines connues des Anciens, avec des coupes, y sont souvent représentées dans leurs allures. Au passage, les réseaux de galeries d'exhaure ont été relevés et sont aujourd'hui utilisés dans le cadre d'une autre mission de l'ISSeP ;
 - des veines cartographiées par B. Delcambre (UCL) sur les feuilles de la Carte géologique de Wallonie qu'il a levées, seul ou en collaboration ;
 - des veines cartographiées, par zones, par D. Pacyna sur base des plans miniers divers pour des dossiers particuliers depuis 2003 et du modèle

numérique de terrain, en *hillshade*, issu des survols LIDAR de la Wallonie par le SPW en 2014 ;

- de la révision et de la complétude de la cartographie des marnières et indices de marnières connus en Hesbaye brabançonne et hesbignonne par le SGW ;
- de la rectification par le SGW de la cartographie de 2001 des parcelles où existent des déclarations de carrières de phosphate, en ajustant le parcellaire géoréférencé à l'époque sur les meilleures données cartographiques actuelles (erreurs de 5 à 45 m) ;
- de la cartographie des marnières, carrières de craie et carrières de craie phosphatée connues en extension et/ou en développement, cartographie maintenant entamée de manière notable au SGW ;
- de la cartographie par le SGW des carrières susceptibles de connaître un effondrement généralisé ou un effondrement en masse ;
- de la révision en profondeur, par le SGW, de la cartographie des carrières souterraines de terres plastiques du Condroz, en ajoutant à la cartographie parcellaire créée en 2001, les périmètres des défoncés et affaissements représentés sur les cartes topographiques depuis les années 1870, sur la couverture aérienne photo à basse altitude de la Wallonie par le SPW et sur le modèle numérique de terrain tiré du LIDAR.

9.3 Révision de la cartographie des objets

Certaines couches spécifiques ont été établies au cours de la mission pour servir à préciser le contexte autour des objets. La plupart de ces couches auront également un rôle propre pour ce qui est de l'estimation de l'aléa de mouvement de terrain dus à la géologie elle-même. C'est le cas :

- de la cartographie par le SGW des zones de présence de craie blanche (marne) au-dessus du niveau de la nappe dans le bassin de Mons, en Hesbaye et dans le Pays de Herve. Cette cartographie a été établie sur base des cartes géologiques de Wallonie (1/25.000) et de Belgique (1/40.000) et de la Carte géotechnique, là où elle était disponible. Cette cartographie a servi à la définition des zones de contexte favorable aux marnières et à celle des zones susceptibles de présenter un karst superficiel activable ;
- de la cartographie par le SGW des zones de présence de formations de calcaires paléozoïques et mésozoïques (Trias et Jurassique) au-dessus du niveau de la nappe. Cette cartographie a été établie sur base des cartes géologiques de Wallonie (1/25.000) et de Belgique (1/40.000). Cette cartographie a servi à la définition des zones susceptibles de présenter un karst superficiels activable mais servira aussi au Service géologique de Wallonie à poursuivre la correction de la couche « Gîtes de minerais de fer », dont les corps géologiques, presque toujours liés à des zones karstiques au contact des terrains calcaires et détritiques, n'a actuellement aucune concordance avec la géologie, ce qui conduit à des erreurs de positionnement de plusieurs dizaines de mètres et à une surestimation de la largeur des zones d'affleurement (base : cartographie à 1/40.000 ou 1/100.000 antérieure à 1870) ;
- de la cartographie par le SGW des formations géologiques sensibles à la saturation en eau. Cette cartographie pourra servir :

- à préciser la prédisposition à l'élargissement du cratère d'effondrement primaire sur un puits ou une cavité mais aussi à préciser l'ampleur de l'effet (caractéristiques géotechniques médiocres) ;
- à définir les zones susceptibles de retrait/gonflement d'argiles ou de poinçonnement sous charge ;
- à définir certaines zones de glissement de terrain.
- de la cartographie des points descriptifs des formations superficielles sur l'ensemble de la Wallonie. Cette collection de points comprend :
 - environ 9.000 points décrits sur les feuilles à 1/40.000 de la Carte géologique de Belgique (1890 - 1919). Si leur précision de localisation est faible (40 m), elle reste tout à fait valable pour une évaluation locale. La majorité de ces points (sondages et puits décrits, peu profonds) sont très intéressants du point de vue de la description des formations superficielles et, en Hesbaye, des altérites (argile à silex et phosphate) ;
 - environ 6.000 points issus de la base de données des essais géotechniques de la Direction de la Géotechnique de la DGO1 – Routes et Bâtiments ;

Cette première collection de points est une base de travail destinée à être étoffée dans l'avenir, notamment au travers :

- du projet VALDOGETE, entre la DGO1 et l'ISSEP, visant à reporter dans la base de données de la Direction de la Géotechnique 60 ans d'archives d'essais géotechniques, en localisant ces essais avec précision (géoréférencement des plans au dossier) et en numérisant les éléments essentiels du dossier. Ce travail est en cours depuis 2017 et est appelé à se poursuivre ;
- du projet VALARGEOL, entre la DGO3 et l'ISSEP, visant à la valorisation des 160.000 points d'archives du Service géologique de Belgique décrivant la géologie wallonne, en complément des descriptions liées à la Carte géologique de Wallonie. Les points, localisés, catégorisés et lié à une image des documents descriptifs seront mis en ligne à la disposition du public par le SGW. Ce projet démarre en 2018 et durera quelques années ;
- d'une collaboration avec la Direction des Eaux souterraines et avec la Direction des Sols pollués de la DGO3 pour intégrer leurs données de sondages et forages respectives.

Les deux premiers projets sont destinés à être intégrés pour donner naissance à la Carte des points descriptifs des formations superficielles, sous l'égide la DGO1. Peut-être sera-t-elle un jour à la base d'une Carte géotechnique de Wallonie ?

- de la cartographie, par le SGW, des zones de Hesbaye où le Conglomérat à silex présente plus de 2 m d'épaisseur, avec indication des épaisseurs connues en sondages. Cette cartographie a été établie sur base des points de la cartographie des formations superficielles, des points descriptifs des archives du Service géologique de Belgique (en dépôt au SGW depuis 2016) et de la Carte géotechnique, là où elle existe. Cette cartographie permet :
 - d'estimer la zone de contexte favorable aux carrières souterraines de silex pour construction et empierrement ;
 - de disposer d'une information sur l'épaisseur du Conglomérat à silex à l'aplomb des carrières souterraines de marnes et de phosphate. Ce conglomérat est en effet compact, peut limiter les remontées de fontis et reste difficile à traverser au moyen d'essais CPT classiques.

9.4 Principes généraux d'établissement de la cartographie

La ou plutôt les cartes livrées - car il s'agit de couches cartographiques numériques par objet pour plus de souplesse – ont été établies sur les principes généraux suivants :

- l'aléa cartographié est l'aléa de tassement, l'aléa d'affaissement/effondrement localisé et l'aléa d'effondrement généralisé :
- l'aléa de tassement a été appliqué aux carrières souterraines de sables thanétiens du Bois d'Havré, aux carrières de terres plastiques du Condroz et du Hainaut et aux gîtes de minerais de fer. En effet, ces exploitations ne présentent plus de vides souterrains, écrasés, mais restent susceptibles de connaître un tassement sous l'effet de l'eau ou de la surcharge ou renvoient à l'aléa de tassement des remblais qui ont été déversés dans les dépressions ;
- les mines de schistes alunifères de la vallée de la Meuse n'ont pas été traitées. Leur méthode d'exploitation par soutirage en masse des couches en dressant a fait disparaître les vides souterrains. Les dépressions de surface ont leur fond sur la roche abattue ou sont comblées des schistes brûlés lors de la fabrication de l'alun ;
- l'aléa d'affaissement/effondrement localisé ne prend en compte que le cas d'effondrement qui recouvre l'autre et considère comme accident le seul fontis (cratère) primaire. En effet, le cratère d'effondrement secondaire résulte de l'évolution naturelle en cas d'absence de gestion de l'accident proprement dit. Il ne s'agit donc plus de l'accident *sensu stricto*. Toutefois, le SGW précisera, dans un champ propre, calculé sur base des données relatives aux formations superficielles, le rayon de ce cratère secondaire, pour servir de référence aux personnes qui auraient à gérer un tel accident ;
- les données utilisées sont les données générales reprises dans les tableaux du chapitre 8. A défaut de données précises (qui n'existent que pour quelques centaines de puits de mines), les paramètres maximisant, mais toujours justifiables par rapport aux retours d'expérience, ont été utilisés. Ils sont précisés dans les tableaux. Trois annexes détaillent les objets les plus courants pour justifier de ces choix. Ils seront remis en forme, avec d'autres, par le SGW et l'ISSeP, hors mission, pour être rendu facilement accessibles à ceux qui en auront besoin pour établir un dossier d'identification et de maîtrise des risques sous-sol pour un projet. Les annexes concernent les puits, les marnières et carrières assimilées et les carrières de phosphate de Hesbaye ;
- les objets sont classés entre :
 - objets ponctuels bien localisés et objets ponctuels avec une zone d'imprécision et occurrences, retenues après validation, multiples. C'est le cas des puits et issues de mines ;
 - objets ponctuels indiquant la présence certaine d'un objet d'une certaine extension, affecté d'un rayon d'imprécision sur la donnée et d'un rayon correspondant à une zone de présence certaine, rayon fixé en fonction des données connues ou retenues par défaut pour ce type d'objet (ex. marnières de Hesbaye, de 20 à 30 m de développement dans sa plus grande dimension) ;

- objets surfacique, avec leur périmètre d'imprécision de localisation (parcelles avec déclaration de carrière, périmètre d'une carrière connue, extension d'un gîte de minerais métalliques ou de fer, périmètre des défoncés sur carrières de terres plastiques,...) ;
- périmètre d'une zone présentant des caractéristiques favorables à la présence d'un objet particulier ;

9.5 Couches de données livrées

Les couches suivantes ont été livrées au Service géologique de Wallonie, chargé de leur intégration dans les bases de données de la DGO3 et de leur diffusion :

- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux puits et issues de mines ;
- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux zones présentant des caractéristiques favorables à la présence d'anciens puits et issues de houillères ;
- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux zones présentant des caractéristiques favorables à la présence d'anciens puits et issues de mines métalliques ;
- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux carrières souterraines de phosphate de Hesbaye ;
- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux marnières, carrières souterraines de craie blanche, carrières souterraines de tuffeau, carrières souterraines de silex modernes et de craie/silex, carrières souterraines de craie phosphatée ;
- Zone d'aléa d'affaissement/effondrement lié aux carrières de pierre de Gobertange ;
- Zone d'aléa de tassement lié aux carrières souterraines de terres plastiques du Condroz ;
- Zone d'aléa de tassement lié aux carrières de terres plastiques du Hainaut ;
- Zone d'aléa de tassement lié aux carrières souterraines de sables thanétiens du Bois du Rapois, à Havré ;
- Zone d'aléa de tassement lié aux gîtes de minerais de fer oxydés ;
- Zone d'aléa de tassement lié aux carrières de terres plastiques du Hainaut.

Les couches suivantes ont été élaborées par le Service géologique de Wallonie au cours de la mission, comme produits dérivés :

- Zone d'aléa karstique faible (tassement, affaissement, effondrement) lié aux formations crétacées et jurassiques ;
- Zone d'aléa karstique faible (tassement, affaissement, effondrement) lié aux formations paléozoïques ;
- Zone d'aléa de mouvement de terrain (tassement, gonflement/retrait, glissement) dus à des formations crétacées et jurassiques sensibles à l'eau.

Chaque couche comportera une table, établie par le SGW conformément au modèle de diffusion, précisant l'objet associé, les paramètres retenus pour son établissement, le niveau d'aléa, l'intensité de l'effet, dont les dimensions du cratère primaire et du cratère secondaire, les dates de création et de mise à jour et les références à la méthodologie.

Derrière une représentation simple quadricolore : faible, modéré, fort, très fort (plus l'absence de couleur), il sera donc possible d'en retrouver la démarche d'établissement.

9.6 Transposition en zones de risque naturel et de contrainte géotechnique au sens du CoDT (art. D.IV.57, 3°).

Le Service géologique de Wallonie proposera une traduction des couches en couches de zones de risque naturel et de zones de contrainte géotechnique, telles qu'introduites en 1996 par l'article 136 du Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine et reprises depuis 2016 au Code wallon de Développement territorial.

La proposition de transposition sera effectuée sur base des seuils retenus par la présente méthodologie, seuils qui sont en concordance :

- avec la gestion de la prévention des mouvements de terrain par la DGO4 en ce qui concerne l'urbanisation ;
- avec la gestion par les autorités et les propriétaires concernés des accidents de ce type.

La correspondance proposée est tout naturellement, vu les bases d'établissement, la suivante, calquée sur la terminologie créée et utilisée en matière d'aménagement du territoire et reprise au CWATUP et au CoDT :

- pour les aléas liés à des situations et phénomènes géologiques :
 - aléa faible = risque naturel faible ;
 - aléa moyen = risque naturel modéré ;
 - aléa fort et très fort = risque naturel majeur ;
- pour les aléas liés à des cavités anthropiques avérées ou à des remblais de surface secondaires :
 - aléa faible = contrainte géotechnique faible ;
 - aléa moyen = contrainte géotechnique modéré ;
 - aléa fort et très fort = contrainte géotechnique majeur.

Le risque naturel ou la contrainte géotechnique majeur permettent réglementairement à l'Autorité compétente de motiver un refus de permis ou des conditions particulières à l'autorisation.

Le risque naturel ou la contrainte géotechnique faible ou modéré ne permettent pas à l'autorité de s'appuyer sur leur seule définition pour refuser un permis ou l'assortir de conditions extraordinaires. Ils permettent toutefois, avec la motivation adaptée au cas d'espèce, de l'assortir de conditions. L'administration consultée pour avis peut émettre à l'attention de l'autorité, sur base de son expertise motivée, des recommandations ou des suggestions de conditions.

Il s'agit de suggestions. Les seuils peuvent bien entendu être reconsidérés à tout moment en fonction des objectifs de gestion de l'Administration et du Gouvernement.

L'essentiel sera alors d'assurer la cohérence avec les couches relatives aux risques naturels aux effets équivalents, afin que les citoyens ne soient pas traités différemment face à un aléa

d'effondrement d'amplitude donnée selon qu'il sera karstique ou lié à une carrière souterraine ou un puits de mines.

10 CONCLUSIONS

La méthodologie d'évaluation et la cartographie d'aléa de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains est le résultat de l'évolution des différents outils d'appréciation des risques du sous-sol en Wallonie. Cette évolution s'est initiée dès 1997.

La méthodologie est destinée à être utilisée par tous les acteurs impliqués dans l'évaluation et la gestion des risques géotechniques : pouvoirs publics, bureaux d'études, architectes, constructeur, citoyens.

Sa simplicité lui permet d'être applicable à un maximum d'objets souterrain.

Sa démarche vise principalement l'évaluation des effets redoutés, qui sont à la fois un danger fondé pour la sécurité des personnes et des biens. Au travers de l'influence des divers paramètres pris en considération, elle constitue aussi un point de départ pour les propositions de solutions techniques visant à maîtriser localement le risque.

La méthode permet de caractériser les différents objets souterrains étudiés, de définir les effets redoutés en surface, ainsi que leur extension justifiée aux endroits potentiellement impactés, sous la forme de zones d'aléas.

Bien qu'elle soit un outil technique initialement conçu pour un usage à l'échelle locale, cette méthodologie a été adaptée au cas de la Wallonie pour identifier la nature et l'ampleur des effets redoutés à l'échelle du territoire régional.

La cartographie dérivée de cette méthode intègre les caractéristiques des objets et du contexte et définit, à l'échelle de la Wallonie, des zones qualifiées par un aléa moyenné. Ces zones sont qualifiées selon l'intensité de l'effet redouté en surface, l'extension géographique de celui-ci et la prédisposition locale du lieu considéré. Cette qualification est possible grâce à la modélisation des mécanismes et la connaissance des objets souterrains et de leur contexte. Cette synthèse « connaissance – compréhension – modèle » permet :

- une correspondance globale avec les constats de terrain,
- la comparaison hiérarchique et relative des zones entre elles.

L'aléa de mouvement de terrain est décliné en plusieurs types : tassement, effondrement localisé et effondrement généralisé font chacun l'objet d'une couche géographique dédiée. La table attributaire associée à chaque couche cartographique contient les données de filiation à l'objet souterrain « responsable de l'effet », ainsi que les paramètres d'effet et de prédisposition locale ayant permis de qualifier localement l'aléa.

Un descriptif des principaux types de cavités souterraines (puits, marnières et carrières souterraines de tuffeau, de craie et silex et de craie phosphatée, carrières souterraines de phosphate de Hesbaye et carrières souterraines de terres plastiques du Condroz) est fourni en annexe sous la forme de fascicules pratiques. Ce travail d'experts permettra aux acteurs du secteur de mieux comprendre l'origine des phénomènes redoutés et de développer des solutions adaptées pour réduire les nuisances, voire les éviter.

11 RECOMMANDATIONS

- La qualité de la cartographie d'aléas est intimement liée à la quantité et la qualité des données d'entrée relatives aux objets souterrains, aux contextes géotechniques et aux formations meubles superficielles. Cela permettrait d'obtenir une connaissance plus fine de la typologie des objets et des contextes géotechniques.
- Les seuils d'intensité d'effet et de qualification de l'aléa devraient à présent s'inscrire dans un cadre global et harmonisé proposé en support du Code de Développement Territorial (CoDT) par l'Administration en charge de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme.
- Les seuils d'intensité d'effet et de qualification de l'aléa ont besoin d'être définis dans un cadre global et harmonisé prenant en compte tous les risques recensés sur le territoire wallon. Il s'agit ainsi de rencontrer les objectifs en la matière du Schéma de Développement Territorial (SDT) et du Code de Développement Territorial (CoDT).
- Les classes de prédisposition demandent à être affinées à l'aide d'une grande quantité de données relatives aux accidents passés. Il s'agit de trouver un nombre suffisant de cas à étudier, offrant tant les différents types d'objets souterrains rencontrés en Wallonie, que la diversité des contextes environnants.
- Les zones d'aléas proposées par cette méthode sont des outils techniques destinés à alimenter directement les procédures administratives et règlementaires.
- La cartographie des zones d'aléas est une aide pour les auteurs de projet et doit leur permettre à prendre en compte ces menaces et proposer des solutions de maîtrise de risques. C'est pourquoi il est proposé de consulter aux experts techniques du domaine de la construction et des bâtiments afin d'éventuellement réévaluer les seuils des classes d'intensité d'effet sans que la méthode et les étapes de calcul ne soient modifiés.
- Pour une utilisation en conformité avec les zones de risques naturels et les zones de contraintes géophysiques utilisées depuis 1996 par la DGO4 – Direction de l'Aménagement du Territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Energie, il est proposé une traduction de la cartographie des aléas en une cartographie des contraintes géotechniques, sur base des trois classes existantes (faible, modérée, majeure).
- La gestion des zones de contraintes karstiques s'appuie sur une cartographie des zones de contraintes qui ne tient pas compte des améliorations apportées à l'Atlas du karst wallon depuis 15 ans. La mise à jour de cet Atlas est en cours mais la mise à jour de la cartographie des zones de contrainte devient urgente. Cette méthodologie est une piste pour uniformiser la définition de l'aléa karstique et des contraintes associées.

A. Kheffi,
Attaché qualifié,
Direction de Colfontaine

D. Pacyna
Attaché qualifié,
Service géologique de Wallonie
(DGO3)

12 BIBLIOGRAPHIE

Les références principalement utilisées pour ce rapport sont :

- INERIS, GEODERIS, Ecole des Mines de Paris, BRGM, CSTB, Ministère français des Finances et de l'Industrie, 2006. L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers : Guide méthodologique, volet relatif à l'évaluation de l'aléa (mouvement de terrain, inondations et gaz de mine), Réf : DRS-06-51198/R01.
- Ministère français de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et INERIS, 2012. Plan de Prévention des Risques Naturels - Cavités souterraines abandonnées : Guide méthodologique.

Les références suivantes ont été utilisées pour ce rapport :

- Arnal C., Messin M., Salmon R., Verdel T., Zihri G. avec la collaboration de Deschanel JL., Dodeler V. Deck O. Merad M., 2003. Risques liés aux ouvrages souterrains – Détermination d'une échelle de dommages. Rapport final BRGM RP/52634-FR.
- Brady B.H.G. & Brown E.T., 2006. Rock mechanics for underground mining, third edition, Spinger, Helderberg, Germany, 626 p.
- Caubergs M., 1991. Inventaire de quelques anciennes mines et carrières souterraines de Wallonie. Essai d'archéologie minière, Caubergs M. Bruxelles.
- Decamps G., 1880. Mémoire historique sur l'origine et les développements de l'industrie houillère dans le bassin du Couchant de Mons : Tome I, Mons, Imprimerie Dequesne-Masquillier,
- Delmer, A., 1912-13. La question du minerai de fer en Belgique. Annales des Mines de Belgique, T. 17, pp. 854-940. (première partie), T. 18, pp.325-448 (seconde partie).
- Denayer, J., Pacyna, D., Boulvain, F., 2011. Le minerai de fer en Wallonie : cartographie, histoire et géologie. Edition de la Région wallonne, Jambes, 250 p.
- Didier C. & Salmon R., 2004. Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Juin 2004, Lille, France. pp.451-461.
- Didier C. & Salmon R., 2010. Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes. Revue française de Géotechnique, pp.21-36.
- Tritsch J.-J., 2007. Guide technique – Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance – traitement. Rapport INERIS DRS-07-86042-02484A.
- Lambert C., Salmon R., 2007. Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière. Rapport INERIS DRS-07-86090-05803A.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM), 2008. Mine closure and post-mining management: international state-of-the-art. Report of the international commission on mine closure.
- Kheffi A. & Pacyna D., 2016. Un nouvel outil de prévention des risques du sous-sol en Wallonie (Belgique) - Application au cas des anciennes carrières souterraines de la Malogne (Mons), Journées nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2016), Nancy, France.

- Kheffi A., Pacyna D., Salmon M., Funcken L., Schroeder C., Tshibangu J.-P., 2018. A new methodology for geotechnical risk management and land planning in Wallonia (Belgium): application to underground workings in the Hesbaye region. International conference on Engineering in Chalk (Chalk 2018), London, Royaume-Uni. À paraître
- Ministère français de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère français de l'équipement, des transports et du logement, 1999. Plans de prévention des risques naturels (PPRN) – Risque de mouvement de terrain : Guide méthodologique, La Documentation française, Paris.
- Service Public de Wallonie, GT inondations, 2016. Notice méthodologique d'élaboration des cartographies des zones soumises à l'aléa d'inondation et du risque de dommages dus aux inondations : méthodologie de la carte, version du 26/02/2016.
- Whittaker B. N. & Reddish D.J., 1989. Subsidence, occurrence, prediction and control, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Pays-Bas, 527 p.

ANNEXES

Total : 1 page

Annexe 1 : Grille de valeurs du coefficient de foisonnement (source : INERIS)

Annexe 1 : Grille de valeurs du coefficient de foisonnement (source : INERIS)

(1 page)

Coefficients de foisonnement proposés par la R.T.R. (source INERIS)

Classe R.T.R.	Dénomination R.T.R.	Types de sols le plus fréquemment rencontrés	Densité en place (t/m ³)	Coefficient de foisonnement	Densité foisonnée (t/m ³)
A	Sols fins	Limons peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,40	1,260
		Limons très plastiques	1,7 à 1,9	1,35 à 1,55	1,240
		Loess	1,5 à 1,7	1,20 à 1,30	1,280
		Arènes peu plastiques	1,7 à 1,9	1,30 à 1,45	1,310
		Argiles et marnes peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,45	1,240
		Argiles et marnes très plastiques	1,7 à 2,0	1,40 à 1,60	1,250
		Marnes	1,8 à 2,4	1,30 à 1,40	1,560
		Sables fins argileux	1,8 à 2,1	1,25 à 1,35	1,500
B	Sols sableux ou graveleux avec fines	Sables fins peu argileux	1,6 à 1,8	1,10 à 1,15	1,510
		Silts	1,5 à 1,7	1,10 à 1,20	1,390
		Sables silteux	1,6 à 1,8	1,05 à 1,15	1,545
		Graves silteuses	1,7 à 2,0	1,10 à 1,20	1,610
		Graves peu argileuses	1,8 à 2,1	1,10 à 1,20	1,695
		Graves argileuses	1,7 à 2,0	1,15 à 1,25	1,540
C	Sols comportant des fines et de gros éléments	Graves très silteuses	1,6 à 1,9	1,15 à 1,25	1,460
		Argiles à silex	1,9 à 2,2	1,30 à 1,45	1,490
		Argiles à meulière	1,8 à 2,1	1,30 à 1,45	1,420
		Eboulis	1,8 à 1,9	1,40 à 1,50	1,275
		Moraines	1,8 à 2,0	1,40 à 1,50	1,310
		Roches altérées	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
D	Sols et roches insensibles à l'eau	Alluvions grossières	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Sables alluvionnaires propres	1,6 à 1,9	1,05 à 1,15	1,590
		Sables de dunes	1,4 à 1,5	1,00 à 1,10	1,380
		Graves alluvionnaires	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Roches non évolutives	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Calcaires durs	2,2 à 2,8	1,40 à 1,60	1,660
		Granit	2,4 à 2,9	1,40 à 1,60	1,770
		Porphyres	2,6 à 2,9	1,40 à 1,60	1,830
		Grès durs	1,9 à 2,7	1,40 à 1,60	1,530
		Basalte	2,7 à 3,0	1,40 à 1,60	1,900
E	Roches évolutives	Craies	1,5 à 2,3	1,30 à 1,50	1,360
		Schistes	1,9 à 2,3	1,30 à 1,50	1,500
F	Matériaux putrescibles et polluants	Terre végétale	1,2 à 1,4	1,07 à 1,15	1,170
		Humus forestiers	0,7 à 1,1	1,20 à 1,25	0,730
		Tourbes	0,3 à 0,9	1,00 à 1,10	0,570