

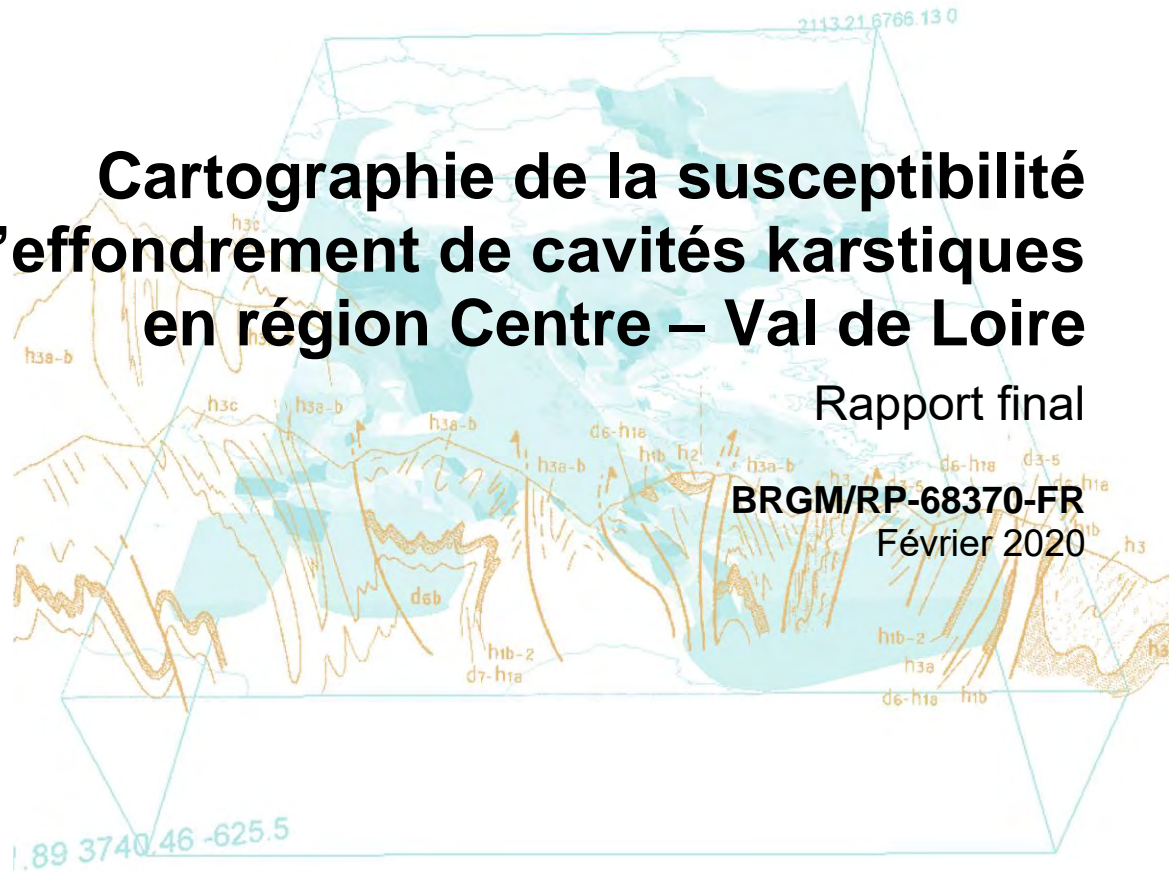


Cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavités karstiques en région Centre – Val de Loire

Rapport final

BRGM/RP-68370-FR

Février 2020



Cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavités karstiques en région Centre – Val de Loire

Rapport final

BRGM/RP-68370-FR
Février 2020

S. Yart, C. Greffié

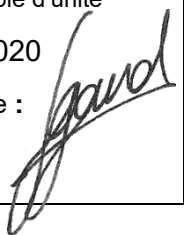
Vérificateur :

Nom : S. Gourdier

Fonction : Responsable d'unité

Date : 20 février 2020

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Saada

Fonction : Directeur régional Centre-
Val de Loire

Date :

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Susceptibilité, effondrement, karst, cavité naturelle, Centre-Val de Loire, Cher, Eure-et-Loir, Indre, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Loiret.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Yart S., Greffié C., (2020) – Cartographie de la susceptibilité d’effondrement de cavités karstiques en région Centre – Val de Loire. Rapport final. BRGM/RP-68370-FR, 118 p., 72 ill., 2 ann.

Synthèse

Le sous-sol de la région Centre-Val de Loire se caractérise par la présence de nombreuses cavités souterraines d'origine naturelle. Certaines d'entre elles peuvent s'avérer instables, induisant la survenue de mouvements de terrain en surface. Ces événements, dont la gravité en termes de pertes humaines reste le plus souvent limitée, n'en demeurent pas moins préjudiciables pour les infrastructures et le foncier, notamment du point de vue financier.

La connaissance actuelle de l'exposition des territoires au phénomène d'effondrement d'origine karstique à l'échelle régionale reste parcellaire et tributaire de recensements localisés des événements. Partant de ce constat, le Service Environnement Industriel et Risques de la DREAL Centre-Val de Loire a confié au BRGM la réalisation d'une étude permettant d'enrichir l'information que les services de l'Etat apportent aux élus des communes de la région.

Cette étude s'est décomposée en deux phases distinctes. La première, visant à établir une cartographie de la susceptibilité de présence de cavités naturelles sur le territoire régional, s'est déroulée de 2012 à 2014. Elle a fait l'objet du rapport BRGM/RP-62816-FR (Vanoudheusden, 2014). La seconde phase, initiée en 2017, a pour objectif de poursuivre les travaux de la première phase par une analyse à l'échelle 1/50 000 de la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique en région Centre-Val de Loire. L'exposition du territoire à cette susceptibilité d'effondrement est restituée à l'échelle communale sur la base de cette analyse. Cette seconde phase fait l'objet du présent rapport.

L'étude s'appuie sur la méthodologie développée par le BRGM pour les « scénarios départementaux cavités » (Fontaine, et al., 2008), dans le cadre d'une convention avec le Ministère de l'Ecologie.

Dans la pratique, l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement repose sur les étapes suivantes :

- Constitution d'un catalogue d'événements représentatif du phénomène à l'échelle de la région. A l'issue des différentes phases de sélection et d'homogénéisation des données, cette première étape a permis de constituer un catalogue de 4 818 effondrements.
- Réalisation d'une étude bibliographique et analyse des données d'inventaire visant à établir une liste de critères explicatifs (facteurs de prédisposition), justifiant la répartition spatiale des effondrements karstiques sur la zone étudiée. Les critères finalement exploités sont : la nature de la formation karstique à laquelle est associée l'effondrement, l'existence d'une formation de couverture, l'épaisseur de la formation karstique, l'épaisseur de la couverture, la position relative de la nappe d'eau souterraine par rapport à la formation karstique et la propension des terrains de surface à l'infiltration ou au ruissellement.
- Compilation des données existantes nécessaires à la cartographie des facteurs de prédisposition à l'échelle régionale et cartographie des critères explicatifs selon une maille carrée de 500 m de côté.
- Croisement, *via* des outils adaptés à l'échelle d'étude, des poids attribués à chaque critère et de la carte de susceptibilité de présence de cavité établie précédemment afin d'établir la carte de susceptibilité finale d'effondrement d'origine karstique.

Afin de fournir une information synthétique directement exploitable par les services de l'Etat, l'exposition de chaque commune à la susceptibilité d'effondrement a été évaluée et un niveau de susceptibilité allant de « Nul » à « Très fort » est attribué à chaque commune de la région. A l'issue de la démarche, 32 communes s'avèrent être exposées à une susceptibilité

d'effondrement de niveau « Très fort ». 138 communes sont concernées par une susceptibilité de niveau « Fort », 1 079 communes par une susceptibilité de niveau « Moyen », 488 communes par une susceptibilité de niveau « Faible » et 74 communes par une susceptibilité de niveau « Nul ».

L'analyse, menée à l'échelle régionale, n'a pas la résolution suffisante pour être exploitable directement à l'échelle des documents d'urbanismes tels que le PPR. Néanmoins elle apporte aux services de l'Etat les moyens de hiérarchiser les communes de la région pour lesquelles des actions de prévention sont à mettre en place de façon prioritaire. Dans cette optique, des recommandations associées à chaque niveau de susceptibilité sont proposées. Elles sont destinées à fournir aux services de l'Etat un panel de mesures qui pourront être adaptées aux contextes locaux et mises en œuvre *via* les outils réglementaires disponibles.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Objectifs et principes méthodologiques.....	15
2.1. PROBLEMATIQUE A TRAITER.....	15
2.1.1. Les cavités naturelles en région Centre-Val de Loire	15
2.1.2. Les désordres liés aux cavités karstiques	15
2.1.3. Objectifs.....	17
2.2. METHODOLOGIE.....	17
2.2.1. Principes généraux	17
2.2.2. Traitement des critères qualitatifs	20
2.2.3. Traitement des critères quantitatifs	21
2.2.4. Evaluation de la susceptibilité finale d'effondrement	21
2.2.5. Evaluation de la qualité du diagnostic	24
2.3. RESULTATS OPERATIONNELS.....	27
3. Contexte de la zone d'étude	29
3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE	29
3.1.1. Le Paléozoïque.....	29
3.1.2. Le Mésozoïque	29
3.1.3. Le Cénozoïque	30
3.1.4. Le Quaternaire.....	30
3.1.5. Les aspects structuraux	33
3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	33
3.2.1. Nappe de Beauce	33
3.2.2. Nappe de la craie séno-turonienne	34
3.2.3. Nappe des sables et grès du Cénomaniens	34
3.2.4. Nappe des sables albiens	34
3.2.5. Nappe des calcaires du Jurassique	35
3.2.6. Nappe des grès du Trias.....	35
4. Qualité du diagnostic de la carte de susceptibilité de présence de cavité karstique	37
4.1. ETUDE DE CAS	37
4.1.1. Rappels méthodologiques.....	37
4.1.2. Cas de Romorantin-Lanthenay (41)	37
4.1.3. Cas de Briare (45).....	41

4.2. EVALUATION DE LA QUALITE DU DIAGNOSTIC DE SUSCEPTIBILITE DE PRESENCE DE CAVITE	42
4.2.1. Evaluation de l'incertitude liée au critère « épaisseur de recouvrement »	43
4.2.2. Evaluation de l'incertitude liée au critère « épaisseur de la formation karstique »	46
4.2.3. Evaluation de l'incertitude globale du diagnostic de susceptibilité de présence de cavité.....	48
5. Evaluation de la susceptibilité d'effondrement de cavité karstique.....	51
5.1. INVENTAIRE DES EFFONDREMENTS DE CAVITES KARSTIQUES	51
5.1.1. Constitution de l'inventaire des effondrements de cavités karstiques sur la zone d'étude	51
5.1.2. Représentativité de l'inventaire.....	58
5.2. SELECTION DES CRITERES EXPLICATIFS DE L'EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES	61
5.2.1. Identification des facteurs de prédisposition	61
5.2.2. Données disponibles	62
5.2.3. Critères explicatifs retenus	68
5.3. EVALUATION DU POIDS DES CRITERES RETENUS DANS LA SUCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES.....	71
5.3.1. Critère « géologie » : nature de la formation karstique et présence d'une formation de couverture	71
5.3.2. Critère « épaisseur de la formation karstique ».....	76
5.3.3. Critère « épaisseur de recouvrement ».....	81
5.3.4. Critère « position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation karstique ».....	86
5.3.5. Critère « IDPR »	91
5.4. SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT.....	95
5.5. SUSCEPTIBILITE FINALE D'EFFONDREMENT DE CAVITE KARSTIQUES .	99
6. Exposition des communes à la susceptibilité d'effondrement et recommandations associées.....	105
6.1. EVALUATION DE L'EXPOSITION DES COMMUNES A LA SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT	105
6.2. ANALYSE DES RESULTATS.....	111
6.3. RECOMMANDATIONS ASSOCIEES AUX NIVEAUX DE SUSCEPTIBILITE	114
6.3.1. Recommandations applicables à l'ensemble du territoire	114
6.3.2. Recommandations associées au niveau de susceptibilité « Nul »	115
6.3.3. Recommandations associées aux niveaux de susceptibilité « Faible » et « Moyen »	115

6.3.4.Recommandations associées aux niveaux de susceptibilité « Fort » et « Très fort »
115

7. Conclusion.....117

8. Bibliographie119

Liste des figures

Illustration 1 : Représentation schématique d'un aquifère karstique (source : sigescen.brgm.fr)	15
Illustration 2 : Classification des différents types de dolines se développant en contexte de roches solubles (Waltham, 2008).	16
Illustration 3 : Exemples de désordres liés à la présence de cavités karstiques survenus dans le Loiret en 2016. a.) Gidy, b.) Chécy.	16
Illustration 4 : Déroulement de la méthode d'évaluation de la susceptibilité finale d'effondrement (Fontaine, et al., 2008).	19
Illustration 5 : Principe de calcul de la densité d'effondrement pour une unité spatiale (Fontaine, et al., 2008).	20
Illustration 6 : Etapes de détermination de la fonction de possibilité.	21
Illustration 7 : Déroulement de la démarche d'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.	23
Illustration 8 : Principe de quantification de l'incertitude liée à l'interprétation de l'expert.	24
Illustration 9 : Représentation de la combinaison entre incertitude des données en entrée et incertitude du diagnostic de l'expert (Fontaine, et al., 2008).	25
Illustration 10 : Tableau de correspondance des valeurs de l'indicateur de confiance et des niveaux de confiance du diagnostic.	26
Illustration 11 : Mode de convolution de l'incertitude associée à la susceptibilité de présence de cavité (∂SP) et de l'incertitude associée à la susceptibilité d'effondrement (∂SE) (Fontaine, et al., 2008).	26
Illustration 12 - Carte géologique au 1/1 000 000 de la Région Centre Val-de-Loire	32
Illustration 13 : Localisation des effondrements karstiques recensés sur la commune de Romorantin-Lanthenay (41) et susceptibilité de présence de cavités karstiques.	38
Illustration 14 : Effondrement survenu rue Berge à Romorantin-Lanthenay le 3 mars 2013 (photo : La Nouvelle République – 11 mars 2013).	39
Illustration 15 : Extrait du modèle géologique 3D dans le secteur de Romorantin-Lanthenay. a. Epaisseur du calcaire de Beauce (CABE), b. épaisseur de la couverture plio-quadernaire (RECO).	40
Illustration 16 : Localisation des effondrements recensés à Romorantin-Lanthenay a) sur la carte géologique au 1/50 000, b) Sur le modèle géologique du SIGES Centre).	40
Illustration 17 : Localisation de l'effondrement de juin 2016 et niveaux de susceptibilité de présence de cavité sur la commune de Briare.	42
Illustration 18 : Désordre de juin 2016 à Briare.	42
Illustration 19 : Répartition des cavités en fonction du critère « profondeur du toit de la formation karstique » (ou « épaisseur de recouvrement »). (Vanoudheusden, 2014)	44
Illustration 20 : Fonctions de possibilité optimistes, pessimistes et retenues pour le critère « épaisseur de recouvrement » pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.	45
Illustration 21 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de recouvrement » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité.	46
Illustration 22 : Répartition des cavités en fonction du critère « épaisseur de la formation karstique » (Vanoudheusden, 2014).	47
Illustration 23 : Fonctions de possibilité optimistes, pessimistes et retenues pour le critère « épaisseur de la formation karstique » pour les formations CABE et DOLI.	47

Illustration 24 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité.....	48
Illustration 25 : Cartographie du niveau de confiance global associé au diagnostic de la susceptibilité de présence de cavité.....	50
Illustration 26 : Recensement des différents types de mouvement de terrain en région Centre Val de Loire	52
Illustration 27 : Répartition des événements selon leur origine naturelle ou indéterminée.....	57
Illustration 28 : Emprise des inventaires des mouvements de terrain localisés sur des secteurs spécifiques et communes ayant répondu aux enquêtes menées dans le cadre des inventaires départementaux des mouvements de terrain.	59
Illustration 29 : Pile stratigraphique modélisée dans le cadre du modèle SIGES Centre	63
Illustration 30 : Carte de la profondeur moyenne de la nappe (Allier, et al., 2011).....	65
Illustration 31 : Principe de calcul de l'IDPR.....	66
Illustration 32 : Grille d'interprétation de l'IDPR.	67
Illustration 33 : IDPR calculé pour la France métropolitaine.	68
Illustration 34 : Critères explicatifs retenus pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.....	69
Illustration 35 : Sensibilité à la dissolution des différentes couches du modèle géologique (Vanoudheusden, 2014).	72
Illustration 36 : Unités spatiales géologiques prises en compte pour le calcul de susceptibilité d'effondrement.	73
Illustration 37 : Densités d'effondrements calculées pour chaque unité géologique.	74
Illustration 38 : Densités d'effondrements des unités spatiales géologiques considérées pour les effondrements d'origine naturelle avérée seuls et pour les effondrements d'origine naturelle et d'origine indéterminée (la densité d'effondrement pour le calcaire de Beauce sous couverture alluviale a été arbitrairement limitée à 4).	75
Illustration 39 : Densités d'effondrement calculées pour le critère « nature lithologique »	76
Illustration 40 : Epaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface et inventaire des effondrements.	77
Illustration 41 : Densités d'effondrements en fonction de l'épaisseur de la formation karstique pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.....	78
Illustration 42 : Poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface. Scenarii optimistes, pessimistes et retenus pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.....	79
Illustration 43 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.....	80
Illustration 44 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.	81
Illustration 45 : Epaisseur de la couverture située au dessus de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface et inventaire des effondrements.	82
Illustration 46 : Densités d'effondrement en fonction de l'épaisseur de recouvrement pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.	83
Illustration 47 : Poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur recouvrement. Scenarii optimistes, pessimistes et retenus pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.....	84

Illustration 48 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de recouvrement.	85
Illustration 49 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de recouvrement » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.	86
Illustration 50 : Ecart de la surface piézométrique au toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.	87
Illustration 51 : Densité d'effondrements en fonction de la différence d'altitude entre la surface piézométrique et le toit de la formation karstique.	88
Illustration 52 : Poids d'appartenance en fonction de la différence d'altitude entre la surface piézométrique et le toit de la formation karstique. Scenarii optimiste, pessimiste et retenu.	89
Illustration 53 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'écart entre le niveau moyen de la nappe et le toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.	90
Illustration 54 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.	91
Illustration 55 : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux.	92
Illustration 56 : Densité d'effondrements en fonction de l'IDPR.	93
Illustration 57 : Poids d'appartenance en fonction de l'IDPR. Scenarii optimiste, pessimiste et retenu.	93
Illustration 58 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'IDPR.	94
Illustration 59 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « IDPR » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.	95
Illustration 60 : Moyennes des possibilités d'effondrement associées aux critères quantitatifs. ..	97
Illustration 61 : Cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavité karstique.	98
Illustration 62 : Niveau de confiance associé au diagnostic de susceptibilité d'effondrement. ...	99
Illustration 63 : Cartographie de la susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique.	100
Illustration 64 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic de susceptibilité finale d'effondrement.	101
Illustration 65 : Classification des notes de susceptibilité en niveaux.	102
Illustration 66 : Niveau de susceptibilité globale d'effondrement d'origine karstique.	103
Illustration 67 : Superposition de la carte des niveaux de suscpetibilité d'effondrement avec les contours communaux.	106
Illustration 68 : Zones urbanisées prises en compte pour l'évaluation de l'exposition des communes.	107
Illustration 69 : Exemple d'une commune dont le niveau de susceptibilité d'effondrement devrait être considéré comme « très fort » en raison de la présence d'une maille de calcul isolée de niveau « très fort » au droit de la zone urbanisée. Pour cette commune le niveau de susceptibilité retenu a été réduit arbitrairement à « moyen ».	108
Illustration 70 : Niveau de susceptibilité d'effondrement concernant au moins 10% de la surface urbanisée de chaque commune.	110
Illustration 71 : Proportion des communes concernées par chaque niveau de susceptibilité d'effondrement à l'échelle régionale et pour chaque département.	113

Illustration 72 : Synthèse des recommandations en fonction du niveau de susceptibilité
d'effondrement karstique. 114

Liste des annexes

Annexe 1 Principes théoriques d'évaluation quantitative d'un niveau de susceptibilité –
Méthodologie « scénario cavité » (Fontaine, et al., 2008)..... 125

Annexe 2 Niveaux d'exposition à la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique par commune
..... 131

1. Introduction

Le sous-sol de la région Centre-Val de Loire se caractérise par la présence de nombreuses cavités souterraines d'origine naturelle. Certaines d'entre elles peuvent s'avérer instables, induisant la survenue de mouvements de terrain en surface. Ces événements, dont la gravité en termes de pertes humaines reste le plus souvent limitée, n'en demeurent pas moins préjudiciables pour les infrastructures et le foncier, notamment du point de vue financier.

La connaissance actuelle de l'exposition des territoires au phénomène d'effondrement d'origine karstique à l'échelle régionale reste parcellaire et tributaire de recensements localisés des événements. Partant de ce constat, le Service Environnement Industriel et Risques de la DREAL Centre-Val de Loire a confié au BRGM la réalisation d'une étude permettant d'enrichir l'information que les services de l'Etat apportent aux élus des communes de la région.

Cette étude s'est décomposée en deux phases distinctes. La première, visant à établir une cartographie de la susceptibilité de présence de cavités naturelles sur le territoire régional, s'est déroulée de 2012 à 2014. Elle a fait l'objet du rapport BRGM/RP-62816-FR (Vanoudheusden, 2014). La seconde phase, objet du présent rapport, a été initiée en 2017. Ses objectifs sont les suivants :

- approfondir les travaux mis en œuvre dans la phase de cartographie de susceptibilité de présence de cavité en y associant une cartographie de la qualité du diagnostic fourni par cette première phase ;
- poursuivre les travaux de la première phase par la analyse à l'échelle 1/50 000 de la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique en région Centre-Val de Loire. L'exposition du territoire à cette susceptibilité d'effondrement est restituée à l'échelle communale sur la base de cette analyse.

L'étude s'appuie sur la méthodologie développée par le BRGM pour les « scénarios départementaux cavités » (Fontaine, et al., 2008), dans le cadre d'une convention avec le Ministère de l'Ecologie.

2. Objectifs et principes méthodologiques

2.1. PROBLEMATIQUE A TRAITER

2.1.1. Les cavités naturelles en région Centre-Val de Loire

Les cavités naturelles présentes en région Centre-Val de Loire sont des cavités karstiques. La karstification se fait par dissolution des roches carbonatées par des eaux d'infiltration chargées en acide carbonique issu du dioxyde de carbone contenu dans l'air.

Le processus de karstification agrandit les discontinuités tectoniques et stratigraphiques présentes au sein du massif rocheux. Il en résulte généralement des paysages de surface caractéristiques (dolines, etc.) associés à un paysage souterrain constitué par des grottes et des gouffres (Illustration 1).

Les dimensions de ces vides présentent une très grande variabilité, depuis les fissures micrométriques à millimétriques jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. Selon l'histoire des variations du niveau piézométrique dans l'aquifère au cours des temps géologiques, ces vides karstiques peuvent se trouver sous le niveau piézométrique actuel (zone noyée) ou au-dessus du niveau piézométrique actuel (zone d'infiltration). Ils peuvent également avoir été comblés par des remplissages sédimentaires secondaires.

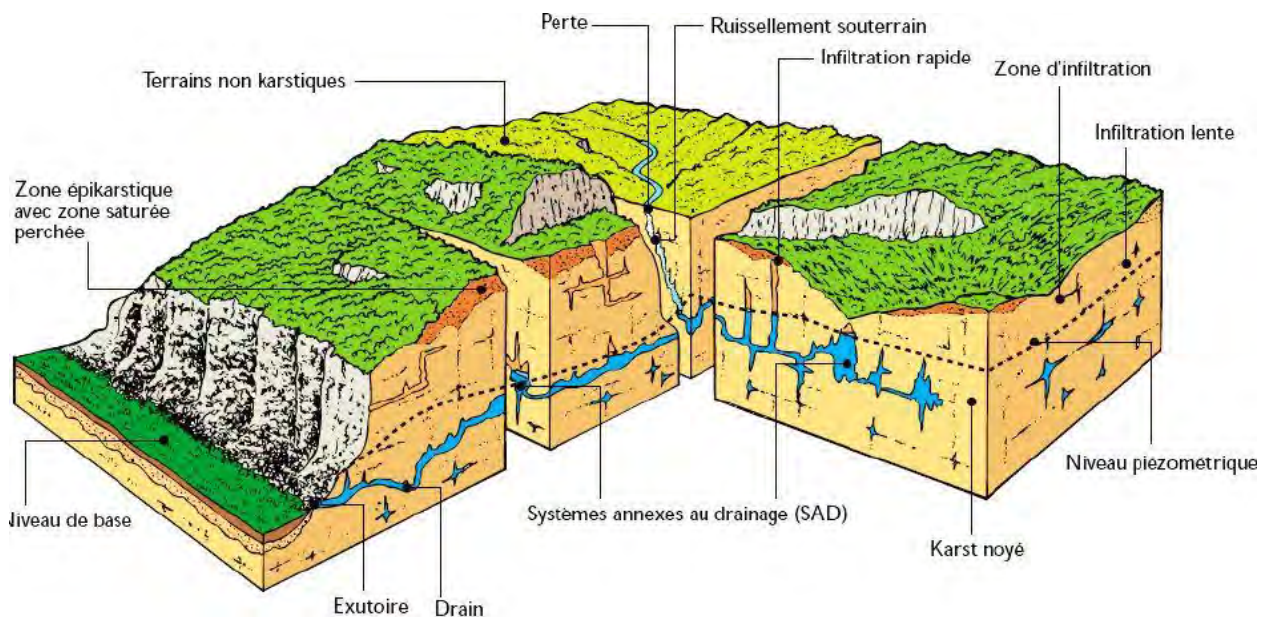


Illustration 1 : Représentation schématique d'un aquifère karstique (source : sigescen.brgm.fr)

2.1.2. Les désordres liés aux cavités karstiques

En contexte calcaire, les désordres en surface sont causés par l'instabilité des terrains sus-jacents aux vides karstiques préexistants. Les vides karstiques constituent naturellement un point de faiblesse mécanique des terrains. Les désordres les plus fréquents sont les dolines, qui peuvent avoir des origines et des formes variées (Perrin, et al., 2013) :

- En contexte de karst nu (sans terrain de recouvrement) :
 - o Doline de dissolution (solution sinkhole sur l'illustration 2) ;
 - o Doline d'effondrement (collapse sinkhole) ;
- En contexte de karst sous couverture :
 - o Doline enfouie (buried sinkhole) ;
 - o Doline d'effondrement sous couverture compétente, ou fontis (caprock sinkhole) ;
 - o Doline de soutirage (subsidence suffosion sinkhole) ;
 - o Doline de soutirage avec débouillage, ou fontis (subsidence dropout sinkhole).

Les désordres associés aux cavités karstiques peuvent avoir des dimensions très variables (Illustration 3). D'une façon générale, les dolines ont des diamètres compris entre 2 et 50 m.

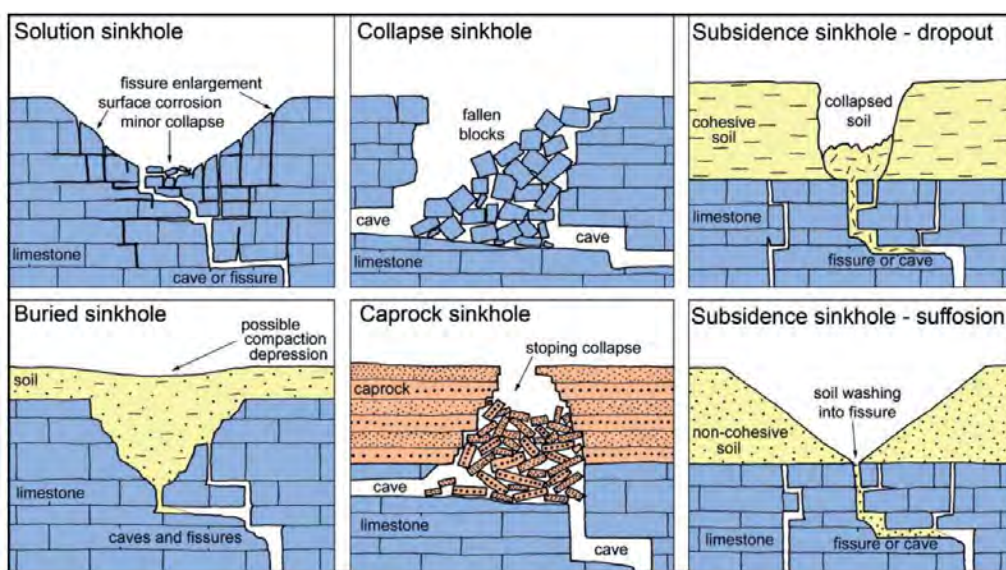


Illustration 2 : Classification des différents types de dolines se développant en contexte de roches solubles (Waltham, 2008).

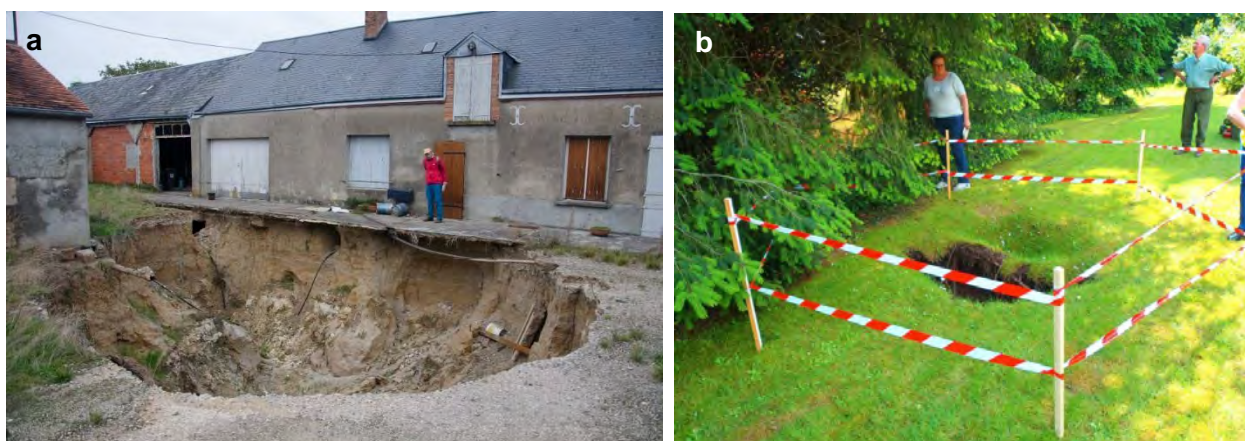


Illustration 3 : Exemples de désordres liés à la présence de cavités karstiques survenus dans le Loiret en 2016. a.) Gidy, b.) Chécy.

Les désordres provoqués par les cavités souterraines se distinguent des autres phénomènes naturels en particulier parce que les cavités qui en sont à l'origine ne sont pas accessibles, ou seulement de façon partielle. Une approche déterministe telle qu'utilisée pour d'autres phénomènes naturels est de ce fait impossible et l'évaluation de la susceptibilité d'apparition de

désordres liés aux cavités doit s'appuyer sur des données d'entrée ponctuelles et non exhaustives.

2.1.3. Objectifs

La connaissance du phénomène est approchée par le concept de « susceptibilité d'effondrement ». Contrairement à « l'aléa », qui introduit une notion de fréquence temporelle d'occurrence d'un phénomène, la susceptibilité ne mesure que l'occurrence spatiale du phénomène (Galve, et al., 2009).

La carte de susceptibilité établie dans le cadre de cette étude et les résultats qui en découlent visent à permettre :

- de localiser les bassins de risques et de les hiérarchiser vis-à-vis de la susceptibilité d'effondrement de cavités karstiques. Ces résultats seront des outils d'aide à la décision pour contribuer à la planification des actions de prévention ;
- de donner aux services de l'Etat des arguments techniques pour sensibiliser les collectivités aux risques d'effondrement de cavité et favoriser les actions de prévention.

2.2. METHODOLOGIE

2.2.1. Principes généraux

Pour répondre aux objectifs de l'étude, la méthode proposée s'appuie sur les principes méthodologiques développés dans le cadre de l'étude « Scenario Cavité » (Fontaine, et al., 2008) développée par le BRGM à la demande du Ministère de l'Ecologie.

Cette méthodologie, adaptée aux spécificités du cadre de l'étude et au contexte géologique régional, est identique à celle utilisée pour la cartographie de susceptibilité de présence de cavités karstiques en région Centre-Val de Loire (Vanoudheusden, 2014), qui constitue la première phase de la présente étude.

Dans la pratique, la méthode d'évaluation de la susceptibilité se décompose en une succession d'étapes (Illustration 4) :

- Etape 0 : Délimitation du territoire étudié (ici la région Centre-Val de Loire).
- Etape 1 : Identification des scénarii retenus sur le territoire (ici l'effondrement de cavités karstiques).
- Etape 2 : Constitution des inventaires de données localisées sur ce territoire. Les inventaires doivent être représentatifs des phénomènes étudiés. La constitution de l'inventaire des effondrements est décrite au chapitre 5.
- Etape 3 : Sélection de critères explicatifs adaptés au contexte du territoire. Une liste des critères explicatifs et discriminants est établie à partir d'une analyse bibliographique et des données d'inventaire. Les critères explicatifs doivent justifier la répartition spatiale des événements recensés sur la zone d'étude. La disponibilité d'une cartographie des critères à l'échelle du territoire à une échelle adaptée est également prise en compte dans le choix des critères. Le processus de sélection et de cartographie des critères explicatifs de l'effondrement de cavités karstiques est décrit au chapitre 5.2.

- Etape 4 : Définition des outils de calcul pour chaque critère. Des outils spécifiques, adaptés à l'échelle régionale et à chaque type de critère explicatif, sont sélectionnés afin de permettre d'interpréter les données de l'inventaire tout en limitant les biais généralement associés à l'expertise (subjectivité de la pondération, effet de seuil, non exhaustivité de l'inventaire, ...). Les outils de calculs utilisés sont décrits dans les paragraphes suivants.
- Etape 5 : calage de la maille de calcul pour chaque critère, une fois que l'outil de calcul est défini ;
- Etape 6 : évaluation de la susceptibilité associée à chaque critère. L'évaluation des niveaux de susceptibilité d'effondrement associés à chaque critère et la cartographie de la susceptibilité finale d'effondrement est décrite au chapitre 5.3.
- Etape 7 : évaluation de l'incertitude associée à chaque critère.

Les étapes 2 à 7 sont réalisées, d'une part, pour la cartographie de la susceptibilité de présence de cavité (travail réalisé dans la première phase de cette étude) et, d'autre part, pour la cartographie de la susceptibilité d'effondrement, objet de la seconde phase de l'étude. Les cartographies de susceptibilité de présence de cavité et de susceptibilité d'effondrement sont finalement croisées pour obtenir une carte dite de susceptibilité finale d'effondrement.

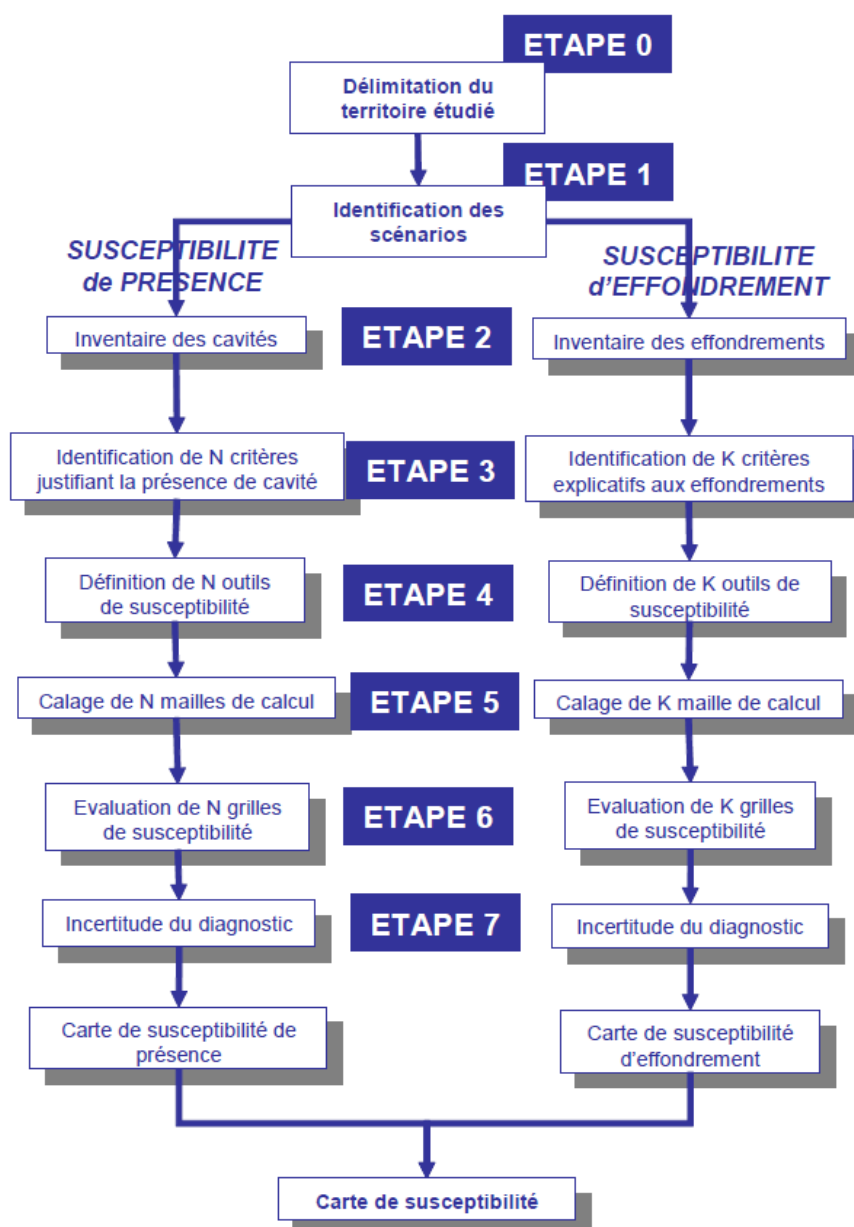


Illustration 4 : Déroulement de la méthode d'évaluation de la susceptibilité finale d'effondrement (Fontaine, et al., 2008).

Un des points centraux de la démarche reste l'identification des facteurs explicatifs théoriques. Dans ce contexte, le rôle de l'expert apparaît essentiel. Au cœur de la méthode, l'expert synthétise et interprète l'information souvent imprécise, voire vague, résultat de l'inventaire et du contexte géologique, sur la base de son expérience et de sa connaissance régionale (Nachbaur, et al., 2011).

Chaque critère explicatif retenu donne lieu à l'attribution d'un indice de susceptibilité à chaque maille de la grille de calcul (pixel de 500 m de côté). L'indice de susceptibilité d'effondrement est obtenu en combinant les indices obtenus pour chacun des critères explicatifs retenus. Finalement, l'indice de susceptibilité d'effondrement finale est calculé par croisement de l'indice de susceptibilité d'effondrement avec l'indice de susceptibilité de présence de cavité karstique, calculé dans le cadre de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014).

La méthodologie nationale adoptée pour les scénarios départementaux cavités (Fontaine, et al., 2008) propose deux outils pour quantifier le niveau de susceptibilité. Ces outils sont adaptés, d'une part, de la théorie du poids des évidences, pour pallier l'hétérogénéité de répartition des données d'inventaire et, d'autre part, de la logique floue, pour pallier l'imprécision et le manque de données. Ces deux outils sont particulièrement adaptés aux échelles départementales et régionales, quand les données géotechniques ou hydrogéologiques ne sont pas disponibles.

La théorie du poids des évidences est utilisée pour quantifier le niveau de susceptibilité associé aux critères explicatifs qualitatifs. Elle permet de définir pour chaque critère qualitatif une « fonction de densité ». La logique floue est utilisée pour quantifier le niveau de susceptibilité associé à un critère explicatif quantitatif. Pour chaque critère quantitatif retenu, la logique floue permet de calculer une « fonction de possibilité ». L'une et l'autre de ces fonctions seront utilisées pour évaluer la susceptibilité relative à chaque critère. Les modalités de calcul de ces fonctions sont décrites succinctement dans les paragraphes qui suivent et détaillées dans l'Annexe 1.

2.2.2. Traitement des critères qualitatifs

Dans le cas des critères explicatifs qualitatifs (ex : la lithologie), la théorie du poids des évidences (« Weight of Evidence ») permet de définir, à partir de la cartographie du critère et des données ponctuelles d'inventaire, une fonction de densité.

Dans la pratique, le calcul de la fonction de densité se fait de la façon suivante (Illustration 5) :

- La zone d'étude est divisée en unités spatiales homogènes au regard du critère considéré ;
- Pour chaque unité spatiale, le poids associé à l'unité est calculé de la façon suivante :

$$d = \frac{n}{\frac{N}{S}}$$

Avec :

- d : densité d'effondrement (ou poids) de l'unité spatiale ;
- n : nombre d'effondrements recensés dans l'emprise de l'unité spatiale ;
- N : nombre total d'effondrements recensés sur la zone d'étude ;
- s : superficie de l'unité spatiale ;
- S : superficie totale de la zone d'étude.

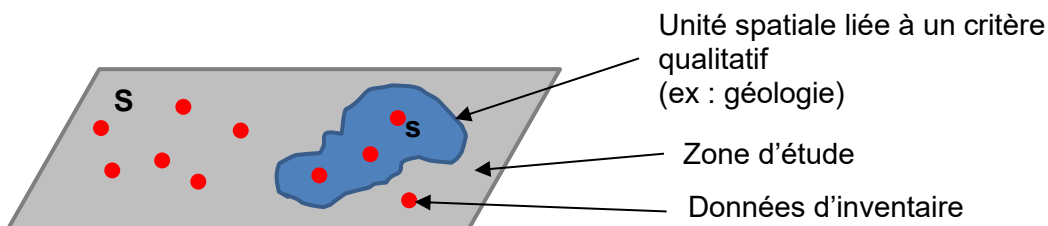


Illustration 5 : Principe de calcul de la densité d'effondrement pour une unité spatiale (Fontaine, et al., 2008).

L'introduction d'un poids unique sur toute l'emprise d'une même unité spatiale du critère considéré permet de s'affranchir de l'hétérogénéité de répartition spatiale des données d'inventaire au sein des unités.

2.2.3. Traitement des critères quantitatifs

Dans le cas de critères explicatifs quantitatifs (ex : l'épaisseur de recouvrement), la logique floue fournit un outil permettant de représenter de façon rigoureuse une information imprécise, voire incomplète. Elle se base sur un jugement d'expert s'appuyant sur une analyse de la répartition des données d'inventaire en fonction du critère considéré.

La première étape de la démarche consiste donc à représenter la distribution des événements inventoriés en fonction des valeurs du critère. Pour cela, la plage de valeurs possibles du critère est subdivisée en plusieurs classes et la densité d'événements (rapport du nombre d'événements recensés dans la classe par la superficie du territoire occupé par cette classe) est calculée pour chaque classe (Illustration 6a). Le raisonnement sur la base d'une densité d'événements permet de s'affranchir d'une surreprésentation ou d'une sous-représentation d'une classe du critère sur le territoire étudié.

Dans un second temps, l'expert s'appuie sur l'analyse de cette distribution et sur sa connaissance des phénomènes sur le territoire étudié pour fixer des plages de valeurs du critère pour lesquelles la possibilité d'occurrence d'un événement est maximale (possibilité = 1), ou au contraire nulle (possibilité = 0). Entre ces zones de certitude les zones d'incertitude sur la possibilité d'occurrence d'un événement sont traités par une fonction de possibilité prenant la forme d'une fonction affine, décroissant linéairement depuis les valeurs du critère pour lesquelles la possibilité est maximale vers les valeurs pour lesquelles la possibilité est nulle (Illustration 6b). Cette variation progressive de la possibilité d'occurrence d'un événement dans la plage d'incertitude permet de s'affranchir des effets de seuils habituellement associés à la démarche de jugement d'expert.

La fonction de possibilité ainsi déterminée permet de calculer en tout point de la zone d'étude un poids d'appartenance associé au critère considéré.

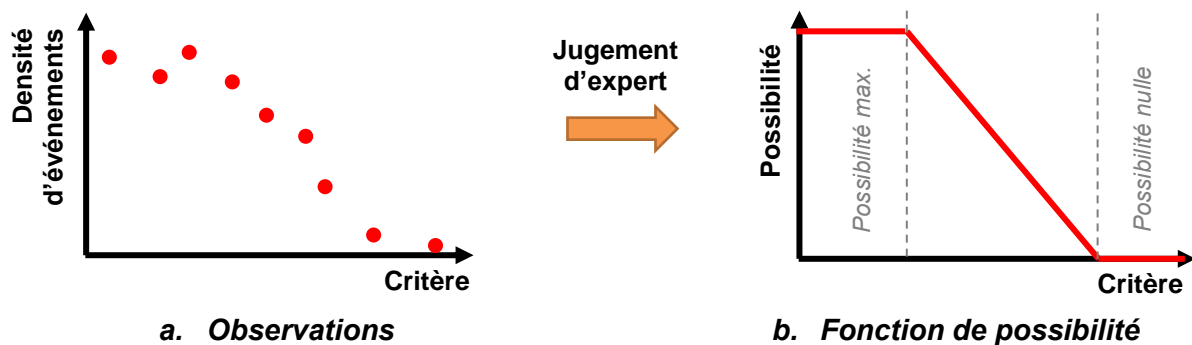


Illustration 6 : Etapes de détermination de la fonction de possibilité.

2.2.4. Evaluation de la susceptibilité finale d'effondrement

A l'issue de la démarche de détermination des fonctions de densité et des fonctions de possibilité pour l'ensemble des facteurs, les facteurs qualitatifs et quantitatifs sont combinés de façon séparée :

- les notes des critères qualitatifs (quand il en existe plusieurs) sont additionnées afin de prendre en compte tous les critères de la même manière ;
- la méthode proposée dans le cadre des scénarios départementaux cavités (Fontaine, et al., 2008) recommande de combiner les fonctions de possibilité des critères quantitatifs

en conservant, pour chaque maille de la grille de calcul, la note du critère la plus élevée. De cette façon les critères quantitatifs ne peuvent pas se compenser entre eux. Dans le cadre de la présente étude, il a été choisi de combiner les critères quantitatifs en les moyennant, de façon à conserver le caractère discriminant des différents critères utilisés et ainsi apporter plus de nuances au résultat (cf. §5.4).

La susceptibilité d'effondrement est issue du produit entre la somme des poids des critères qualitatifs et la moyenne des poids des critères quantitatifs.

Le produit de la carte de susceptibilité d'effondrement obtenue avec la carte de susceptibilité de présence de cavité obtenue lors de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014) fournit la carte de susceptibilité finale d'effondrement.

L'illustration 7 synthétise le déroulement de la démarche d'évaluation de la susceptibilité finale d'effondrement.

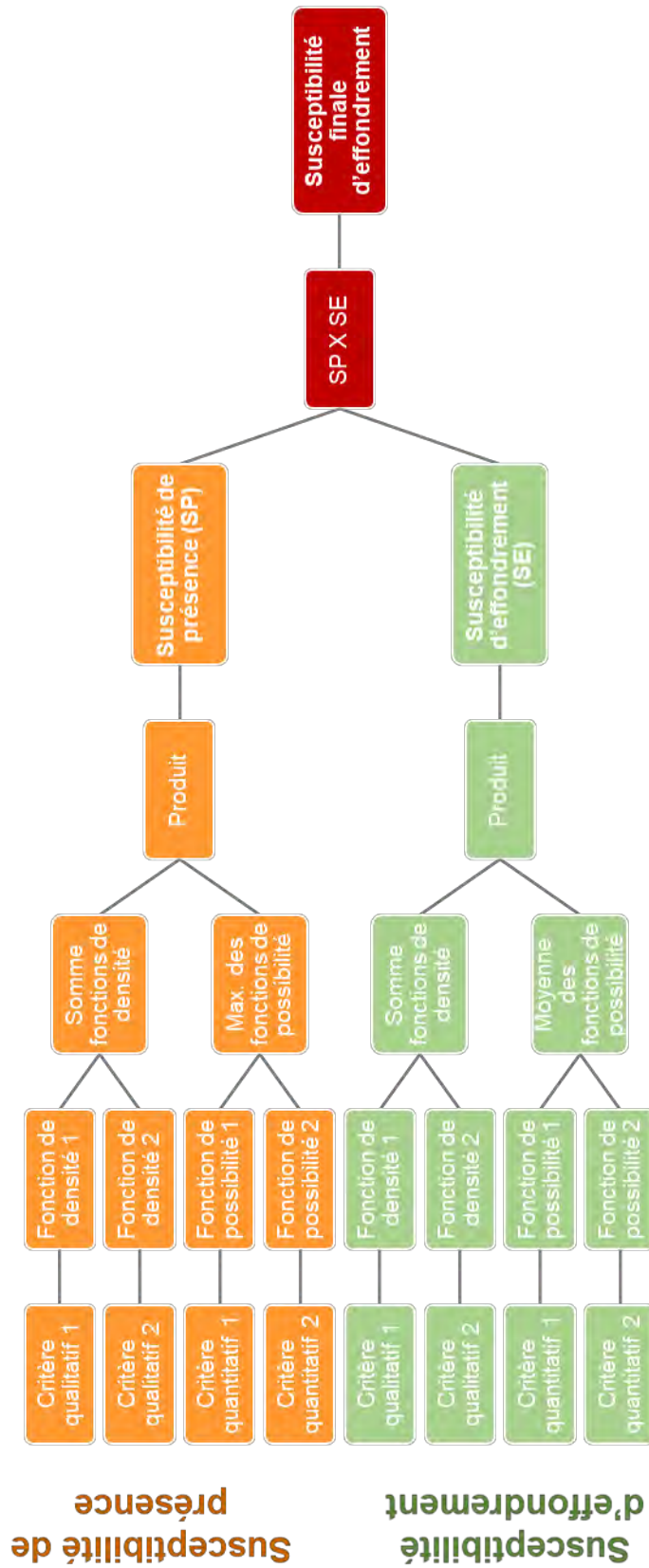


Illustration 7 : Déroulement de la démarche d'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

2.2.5. Evaluation de la qualité du diagnostic

La méthodologie d'évaluation de la susceptibilité d'effondrement mise en place dans le cadre des « scénarios cavités » départementaux (Fontaine, et al., 2008) intègre la prise en compte de certaines incertitudes dans la démarche. Elle permet ainsi de compléter la carte de susceptibilité produite par une information sur la qualité du diagnostic.

En tout point de la zone d'étude, la valeur de la note de susceptibilité peut être biaisée par deux facteurs distincts :

- l'incertitude dans l'interprétation de l'expert ;
- l'imprécision des données d'entrée (quand elle est disponible).

a) Incertitude dans l'interprétation de l'expert

Afin de quantifier la subjectivité des choix des seuils de la fonction de possibilité, une distribution « pessimiste » et une distribution « optimiste » sont proposées (Illustration 8). Ces deux fonctions de possibilité couvrent la plage des valeurs de possibilité ($f(x)$) que l'expert juge vraisemblables pour une même valeur d'un critère explicatif (x). La différence entre les fonctions de possibilité pessimistes et optimistes fournit une mesure de l'incertitude sur le jugement d'expert. Quand les deux fonctions sont confondues, l'expert est certain de son analyse, l'incertitude est nulle. Au contraire, une différence entre les deux fonctions de possibilité importante signifie que le jugement d'expert est nuancé et que l'incertitude sur la possibilité est grande. Cette démarche produit, pour chaque facteur quantitatif, une carte présentant pour chaque maille de calcul une valeur d'incertitude comprise entre zéro (l'expert est certain de son diagnostic) et un (l'incertitude est totale).

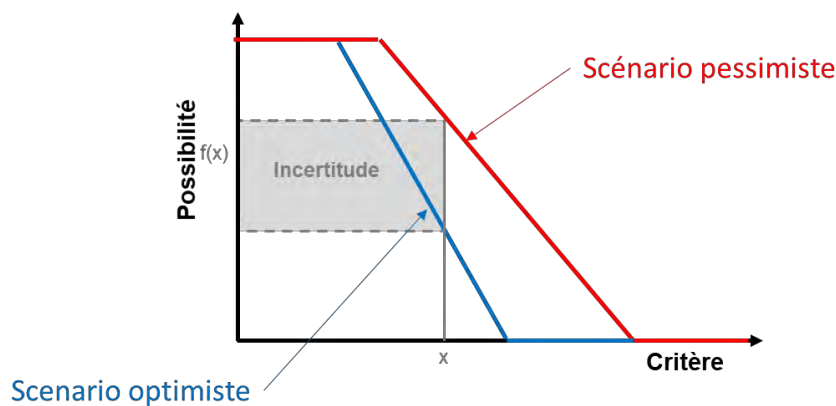


Illustration 8 : Principe de quantification de l'incertitude liée à l'interprétation de l'expert.

Il est à noter que cette méthode ne s'applique pas aux critères qualitatifs. En effet, la prise de risque de cette interprétation est minimale. De plus, l'expert est chargé de prendre ses précautions lors de la délimitation du zonage des classes. Cependant, lorsque l'importance de l'un des critères qualitatifs le justifie, il est parfois possible de quantifier l'incertitude du diagnostic en se ramenant à une fonction de possibilité.

b) Imprécision des données en entrée

Pour chaque maille de calcul, la note de susceptibilité est étroitement liée à la précision de la cartographie des critères explicatifs identifiés. Cette incertitude peut être disponible en tout point

du territoire dans le cas de l'élaboration de la cartographie du critère par une méthode d'interpolation. Cependant l'incertitude n'est souvent disponible que sous la forme d'une valeur uniforme pour tout le territoire, voire pas disponible du tout.

Lorsqu'elle est disponible, l'imprécision des données d'entrées peut être assimilée à un écart type (σ) d'une loi normale centrée sur la moyenne (μ). Sous couvert d'une représentation par une loi normale, on considère que l'intervalle $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$ contient 68,26% de l'imprécision sur la variable considérée.

Considérant l'imprécision de la donnée source, la valeur de possibilité (de présence ou d'effondrement) lue sur les courbes optimistes et pessimistes est donc également variable comme représenté sur le schéma de l'illustration 9. En tout point du territoire auquel est associé une valeur (μ) d'un critère quantitatif, la possibilité associée $\pi(\mu)$ peut prendre toutes les valeurs comprises entre les courbes optimiste et pessimiste d'une part, et entre les valeurs $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$ d'autre part (zone hachurée sur le graphique de l'illustration 9).

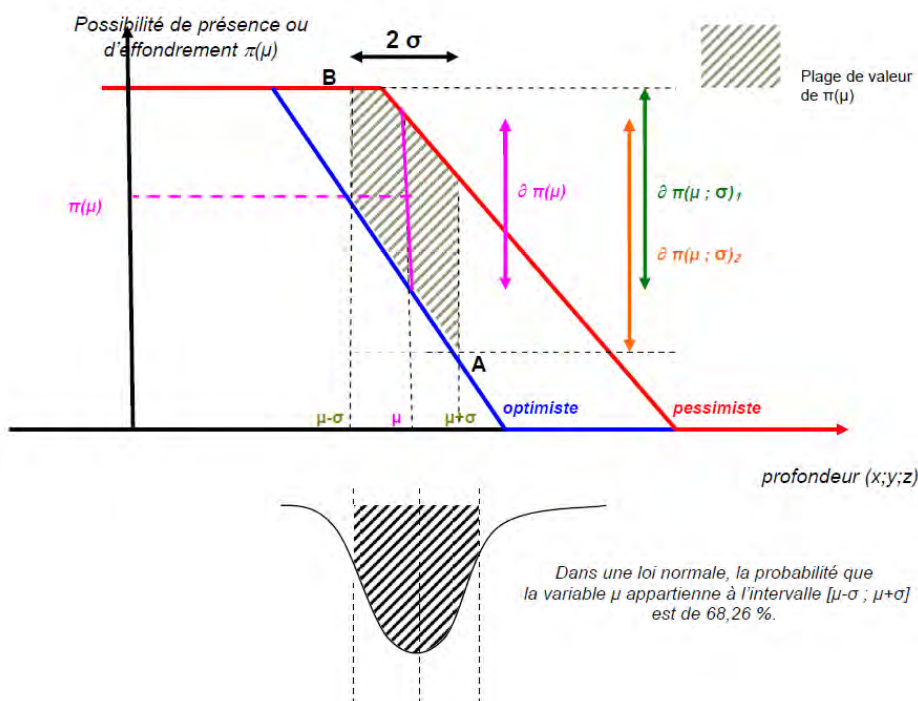


Illustration 9 : Représentation de la combinaison entre incertitude des données en entrée et incertitude du diagnostic de l'expert (Fontaine, et al., 2008).

Cependant, l'imprécision des données d'entrée n'est que rarement disponible. Dans ces cas-là, l'incertitude sur la valeur de possibilité correspond uniquement à l'incertitude associée au diagnostic de l'expert.

c) Niveau de confiance du diagnostic de susceptibilité

Pour plus de lisibilité, l'incertitude est convertie en un « indicateur de confiance » (IC) correspondant à une note allant de 0 à 5 et traduisant le degré de certitude de l'expert dans sa définition des fonctions de possibilités. Pour chaque critère quantitatif, l'indicateur de confiance est calculé de la façon suivante :

$$IC = (1 - Incertitude) \times 5$$

A chaque valeur de l'indicateur de confiance est attribué un niveau de confiance du diagnostic. Les niveaux de confiance associés à chaque valeur sont décrits dans le tableau de l'illustration 10.

Indicateur de confiance	Niveau de confiance du diagnostic
$IC \leq 1$	Très incertain
$1 < IC \leq 2$	Médiocre
$2 < IC \leq 3$	Moyen
$3 < IC \leq 4$	Bon
$4 < IC \leq 5$	Certain

Illustration 10 : Tableau de correspondance des valeur de l'indicateur de confiance et des niveaux de confiance du diagnostic.

Les indicateurs de confiance associés à chaque facteur sont ensuite combinés pour propager l'analyse des incertitudes jusqu'à l'étape de calcul de la susceptibilité d'effondrement finale.

L'incertitude associée à la carte de susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique est issue du croisement de l'incertitude associée à la carte de susceptibilité de présence de cavité déterminée et de l'incertitude associée à la carte de susceptibilité d'effondrement.

Le mode de calcul de l'incertitude associée à la susceptibilité finale d'effondrement ($\partial(SP \times SE)$) est fourni par l'illustration 11. De la même manière que précédemment, cette incertitude est traduite en différents niveaux de confiance du diagnostic.

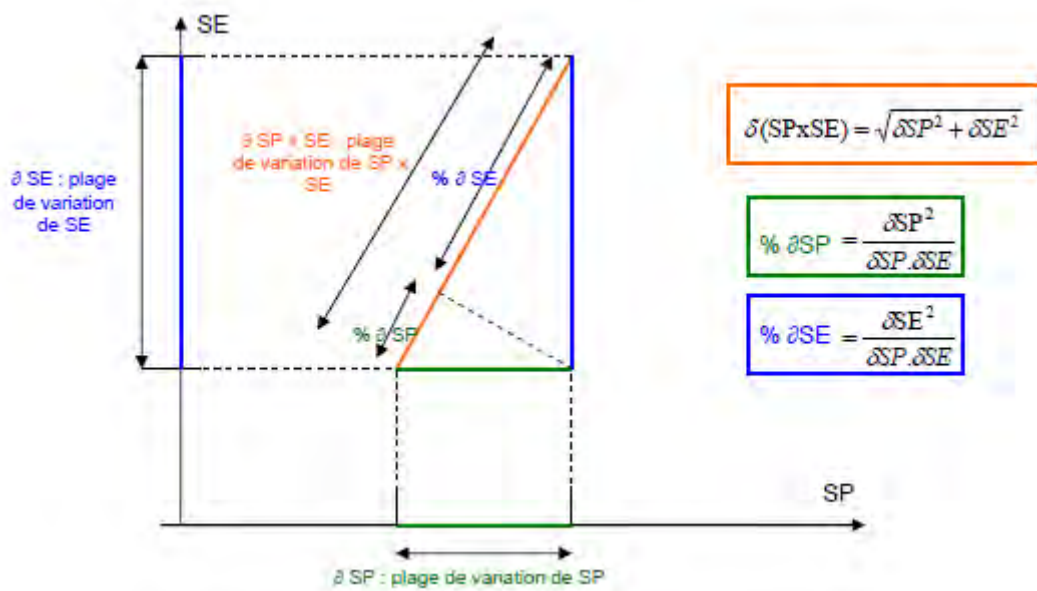


Illustration 11 : Mode de convolution de l'incertitude associée à la susceptibilité de présence de cavité (∂SP) et de l'incertitude associée à la susceptibilité d'effondrement (∂SE) (Fontaine, et al., 2008).

2.3. RESULTATS OPERATIONNELS

A l'issue de cette étude, plusieurs types de résultats sont mis à disposition des services de l'Etat. Il s'agit :

- de la base de données rassemblant dans un SIG toutes les données d'effondrement de cavités karstiques recensées dans le cadre de l'étude ;
- d'une carte de susceptibilité d'effondrement de cavité karstique sur le territoire régional selon une maille carrée de 500 m de côté ;
- d'informations quantitatives sur le niveau de susceptibilité de chaque commune ;
- de recommandations adaptées à chaque niveau de susceptibilité en matière de prévention du risque d'effondrement de cavités karstiques.

3. Contexte de la zone d'étude

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE¹

Situé sur la bordure sud du Bassin Parisien, le domaine géologique de la région Centre Val-de-Loire présente une grande variété de terrains (Illustration 12). Au sud, les terrains les plus anciens, formés par un socle cristallin et métamorphique, s'adosent sur la bordure septentrionale du Massif Central au niveau de la Marche. En remontant vers le nord, le reste de la région est constitué par l'empilement de couches sédimentaires inclinées vers le centre du Bassin de Paris. C'est au début du Mésozoïque que le Bassin Parisien s'est individualisé, son remplissage s'est poursuivi jusqu'au Quaternaire.

3.1.1. Le Paléozoïque

Le socle paléozoïque de la région Centre Val-de-Loire est constitué essentiellement de roches métamorphiques (micaschistes, gneiss, amphibolites, migmatites) et de granites intrusifs d'âge primaire. Les orogénèses paléozoïques, notamment l'épisode hercynien, déforment et métamorphosent ce qui deviendra le socle au sud des départements du Cher et de l'Indre. Les granites qui affleurent au sud des feuilles de la carte géologique au 1/50 000 de Châteaumeillant et de Charenton-sur-Cher marquent la fin de deux phases tectoniques majeures. Le leucogranite de Tronçais (362 Ma) est synchrone de la fin des déformations acadiennes du Dévonien moyen. Le granite de Cérilly (286 Ma) se met en place lors de la phase tectonique hercynienne majeure, pendant le Westphalien (Carbonifère). C'est à la fin du paléozoïque que se dessine une vaste dépression bordée au sud par des reliefs plus élevés qui vont être soumis à l'érosion dont les produits iront combler les zones basses.

À la fin du Permien, la région est complètement exondée et soumise à une érosion active des formations mises en place au Carbonifère.

3.1.2. Le Mésozoïque

Au début du Trias le socle hercynien mis à nu et plus ou moins pénéplané continue de se comporter comme une vaste surface d'érosion localement affectée par des silicifications. C'est sur ce socle qu'à partir du Trias moyen le soulèvement des régions méridionales alimente la sédimentation détritique de la transgression triasique venant du nord-est. Elle dépose des sables, qui deviendront en particulier les Grès de Tronçais, et des matériaux arrachés aux bordures du socle s'intercalant dans ces formations gréseuses. Ensuite, l'épisode de stagnation de cette mer et son confinement entraînent la formation de dolomies et d'évaporites qui prolongent celles de toute la partie méridionale du bassin de Paris. Le bassin se comble ensuite par des argiles bariolées plus ou moins finement gréseuses.

Au début du Jurassique, la mer reprend sa progression sur une plate-forme peu profonde. Elle y dépose des grès puis des dolomies et des calcaires. Les faciès deviennent franchement marins avec les Calcaires à gryphées du Sinémurien. Ces calcaires bioclastiques, riches en *Gryphaea arcuata*, recouvrent à cette époque tout l'est de la France : Jura, Bourgogne, Morvan, nord du

¹ Ce paragraphe est extrait de publications personnelles de J.P. Leprêtre

Massif Central. La faille du Cher, comme celle de Sancoins, délimite des secteurs qui seront le lieu de dépôts caractérisés par des faciès différents. Cette sédimentation carbonatée va se poursuivre jusqu'à la fin du Jurassique.

À la fin du Jurassique, la mer se retire totalement, le Massif Central s'exhausse et l'érosion continentale décape une partie des dépôts mésozoïques.

Après l'émersion fini-jurassique, ce n'est qu'à la fin du Crétacé inférieur que la mer regagne la région et que se déposent des sables et argiles glauconieux. Au Crétacé supérieur, la mer s'installe et l'essentiel des dépôts Turonien est constitué de marnes, craie et tuffeaux. Après des passées sableuses plus ou moins glauconieuses la sédimentation crayeuse reprend au Campanien.

À la fin des temps crétacés, la région est définitivement exondée. Elle est alors soumise à une importante érosion. L'altération affecte la craie formant l'argile à silex. Les premiers dépôts sont des argiles à pisolithes ou à granules d'oxydes ferrugineux, suivis par des dépôts détritiques grossiers dans le sud de la région du département. Un vaste glacis s'étend alors du nord du Massif Central en direction du centre du bassin de Paris.

3.1.3. Le Cénozoïque

La distension fini-éocène (dite oligocène), orientée sensiblement NNO-SSE, délimite des zones dépressives dans lesquelles vont s'installer des dépôts détritiques issus de l'érosion du Massif Central. À l'Oligocène supérieur (Stampien), la Touraine reste le siège d'une sédimentation lacustre avec le dépôt des Calcaires lacustres.

Au Miocène, les dépôts carbonatés (calcaires de Beauce) vont interférer avec les premières décharges venues du Massif Central. Les « Calcaires de Beauce », qui recouvrent la Craie au nord de la Loire sont des calcaires lacustres qui atteignent 200 m au maximum de leur développement vers Pithiviers, pour se réduire à 115 m à Orléans puis à 80 m sur la bordure nord-ouest du département du Loiret. Les calcaires disparaissent ensuite pour laisser place à la craie qui est sub-affleurante.

Les apports sablo-argileux prévaudront par la suite et formeront les formations de Sologne. Au Miocène, la région Tourangelle bascule vers l'ouest ce qui permet la dernière incursion marine vers l'est avec le dépôt des faluns de Touraine qui érode les sables de l'Orléanais. Des vestiges de ces sables alluviaux subsistent sur la Beauce indiquant une extension vers le nord nord-ouest des systèmes alluviaux de l'Orléanais.

Au Pliocène, après le retrait progressif de la mer, s'installe un régime continental produisant des épandages détritiques de sables et graviers.

3.1.4. Le Quaternaire

C'est au Quaternaire que le réseau hydrographique se structure peu à peu, évoluant en fonction des déformations néotectoniques.

Les glaciations successives provoquent dans les couches à l'affleurement une fissuration (phénomènes de cryoturbation et dépôts cryoclastiques) et un recouvrement des plateaux par des limons éoliens dus à des vents très violents. Pendant les périodes interglaciaires, l'érosion fluviale incise le plateau de plus en plus profondément et dépose des terrasses sablo-graveleuses emboîtées.

La pré-Loire possède un cours Atlantique. Puis la région acquiert sa morphologie actuelle avec le creusement par saccades des vallées durant les périodes glaciaires.

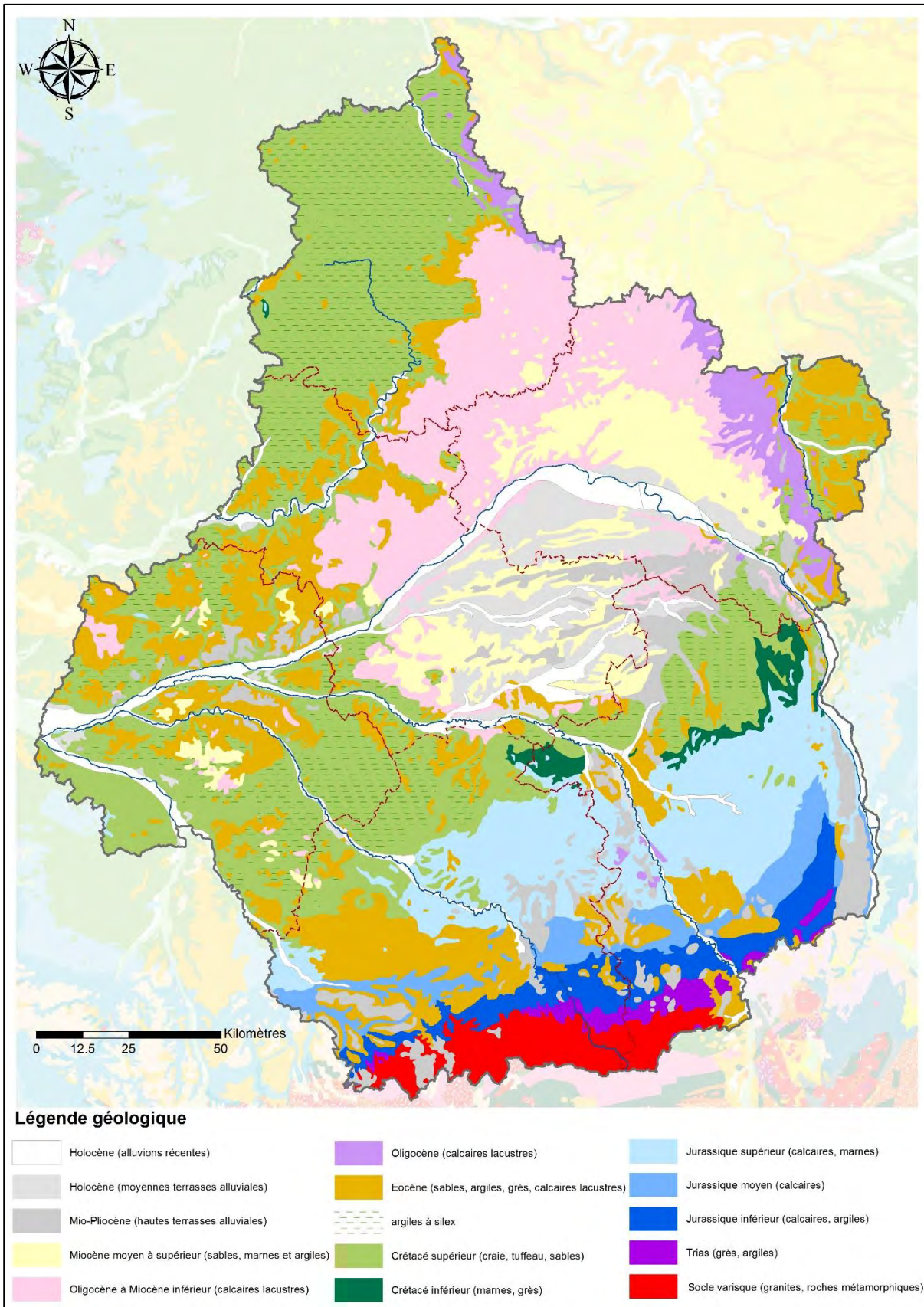


Illustration 12 - Carte géologique au 1/1 000 000 de la Région Centre Val-de-Loire

3.1.5. Les aspects structuraux

Au sein de la série stratigraphique, trois discordances lithostratigraphiques majeures, correspondant à des périodes d'émersion, se sont manifestées. Des phénomènes de karstification du substratum et des altérations de roches préexistantes ont produit, en particulier, des altérites argileuses et argilo-marneuses.

La première discordance majeure correspond à l'interface entre le substratum métamorphique et la série sédimentaire infra-liasique.

La seconde discordance est située à la fin du Jurassique moyen (lacune de l'Oxfordien inférieur et moyen) et est marquée par la karstification et une décalcification (argilisation) des formations calcaires antérieures (Bajocien-Bathonien).

La troisième surface de discordance correspond à l'interface entre le Crétacé et le Tertiaire (Paléocène) marquée par la phase d'altération et d'argilisation, dénommée « sidérolithique », au cours de la sédimentation fluviatile de Brenne.

Enfin, c'est au Miocène qu'une phase d'altération se produit avec les argiles à meulière, résultat de la décalcification des calcaires lacustres de l'Oligocène.

3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE²

La Région Centre Val-de-Loire compte six aquifères principaux :

- la nappe de Beauce,
- la nappe de la craie Séno-Turonienne,
- la nappe des Sables et Grès du Cénomaniens,
- la nappe des sables albiens,
- la nappe des calcaires du Jurassique,
- la nappe des grès du Trias.

3.2.1. Nappe de Beauce

Le réservoir aquifère des calcaires de Beauce, communément appelé « nappe de Beauce », constitue un système aquifère qui s'étend sur environ 9 000 km².

Il est constitué principalement, mais non exclusivement, de calcaires empilés dans une cuvette dont le fond est constitué d'argile imperméable qui repose sur la Craie. Les principaux niveaux producteurs sont composés des calcaires de Pithiviers et des calcaires d'Etampes, deux formations géologiques perméables qui sont séparées par le niveau semi-perméable de la molasse du Gâtinais.

Dans certains secteurs comme la forêt d'Orléans, la nappe est captive, étant surmontée d'une couche d'argile. Mais sur sa majeure partie elle est libre et, de ce fait, elle est réalimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie qui constituent son unique ressource en eau. Cette infiltration qui se produit l'hiver est, en année moyenne, de l'ordre de 100 mm, ce qui représente, pour la partie libre de la nappe, un apport moyen d'environ 900 millions de m³/an.

² Le texte de ce paragraphe est tiré du site internet du SIGES Centre - <http://sigescen.brgm.fr>

3.2.2. Nappe de la craie séno-turonienne

La Craie du Crétacé supérieur (Sénonien et Turonien) constitue un réservoir aquifère important qui s'étend sur une grande partie de la région Centre Val-de-Loire. En Touraine, cette formation est largement affleurante et constitue une ressource largement exploitée, notamment pour l'agriculture.

La série stratigraphique allant du Sénonien (plus récent) au Turonien (plus ancien) appartient à l'époque géologique du Crétacé supérieur. Cette série géologique est formée par une puissante assise crayeuse (> 100 m) et repose sur une formation peu perméable dite des « Marnes à Ostracées », laquelle sépare l'aquifère de la Craie du Séno-Turonien de l'aquifère des Sables cénomaniens (sous-jacents).

Cette série séno-turonienne affleure très largement sur tout le pourtour ouest, est et sud de la région Centre Val-de-Loire. Dans le Gâtinais, la Craie se caractérise localement par une structure et des écoulements typiques d'un karst.

D'une manière générale, la craie est poreuse mais elle n'est pas perméable intrinsèquement. Elle ne contient de l'eau mobilisable que lorsqu'elle est fracturée, situation rencontrée le long des failles ou sur les bombements anticlinaux, ou bien lorsqu'elle est altérée, sous les plaines alluviales des grands cours d'eau. Dans certains secteurs il existe de véritables réseaux karstiques, comme la rivière souterraine d'Orchaise, près de la Cisse. La craie n'est altérée que dans sa partie supérieure, généralement que sur les 30 premiers mètres au maximum.

3.2.3. Nappe des sables et grès du Cénomaniens

Par son étendue et son épaisseur, la nappe du Cénomaniens fait partie des grands réservoirs d'eau souterraine français. Dans le bassin Loire-Bretagne, elle est présente et exploitée dans douze départements et couvre une superficie d'environ 29 000 km².

Le réservoir aquifère du Cénomaniens est constitué principalement par les niveaux sableux du Cénomaniens moyen et supérieur (Sables du Perche, de Varennes et de Vierzon). Les marnes à Ostracées recouvrent et protègent ceux-ci sur la majeure partie de l'aquifère, assurant la mise en charge de la nappe. Le système aquifère correspond aux unités sableuses, en continuité hydraulique. En région Centre Val-de-Loire, ils sont désignés par les termes de Sables du Perche, à l'ouest, et de Sables de Vierzon, au sud.

Il s'agit d'un aquifère de type poreux où l'eau s'accumule et s'écoule dans les interstices des sables. Dans le cas de passées gréseuses, une composante liée à la porosité de fissure est également possible. A Vendôme, la porosité des Sables du Maine a été estimée de l'ordre de 8 à 10 %. La transmissivité de l'aquifère varie de 1.10^{-2} m²/s aux affleurements du nord-ouest à moins de 1.10^{-4} m²/s au sud, dans l'Indre.

3.2.4. Nappe des sables albiens

La nappe des Sables de l'Albien est bien connue en région Ile-de-France où elle est considérée comme une ressource stratégique. En région Centre Val-de-Loire, cette nappe intéresse principalement le département du Loiret où elle est présente en profondeur.

Il s'agit d'un aquifère de type poreux où l'eau s'accumule et s'écoule dans les interstices des sables.

3.2.5. Nappe des calcaires du Jurassique

Le système aquifère du Jurassique constitue la principale ressource des départements du Cher et de l'Indre. Les calcaires du Jurassique supérieur (ou Malm) occupent la majeure partie du Berry où ils affleurent très largement (Bourges, Châteauroux) et s'étendent au-delà, en Poitou-Charentes. Ce grand ensemble est en fait subdivisé en une multitude de petits bassins hydrogéologiques, drainés par les cours d'eau, et très sensibles du point de vue quantitatif et qualitatif.

Les bancs calcaires sont presque toujours compacts, intrinsèquement imperméables. L'eau ne peut être contenue que par une perméabilité secondaire dans des fractures, fissures, voire du karst, qui sont liés à des accidents structuraux (failles, anticlinaux) et des zones d'altération et dissolution (principalement le long des vallées). Il arrive que, sous certains faciès, le calcaire présente une porosité et perméabilité primaire : ce sont les calcaires récifaux et les calcaires oolithiques, graveleux, pisolithiques.

3.2.6. Nappe des grès du Trias

La formation du Trias est constituée principalement de grès et argiles, de sables et de dolomies (Muschelkalk). Le réservoir aquifère du Trias est constitué par la succession de faciès sableux et gréseux principalement, qui sont des formations perméables. L'alternance avec des faciès argileux confèrent à l'aquifère un caractère multicouche.

Cet aquifère s'étend sur la quasi-totalité de la région Centre Val-de-Loire où il constitue la ressource la plus profonde, jusqu'à la limite sud de la région où les formations triasiques affleurent. C'est dans le secteur sud que la ressource aquifère est exploitée.

Il s'agit d'un aquifère de type poreux pour les passées sableuses où l'eau s'accumule et s'écoule dans les interstices des sables. Dans le cas de passées gréseuses, la porosité de fissure serait prédominante. Les valeurs de perméabilité et de porosité sont rares ; de plus, l'hétérogénéité des méthodes d'évaluation et la dispersion des valeurs obtenues rendent difficile la valorisation de ces données.

4. Qualité du diagnostic de la carte de susceptibilité de présence de cavité karstique

4.1. ETUDE DE CAS

A la suite de la première phase de l'étude, consistant en une cartographie de la susceptibilité de présence de cavités karstiques (Vanoudheusden, 2014), la DREAL Centre-Val de Loire a eu connaissance de l'existence de phénomènes d'effondrements récurrents sur la commune de Romorantin-Lanthenay (41) attribués à l'existence de cavités karstiques. Or les résultats de cette première phase ne ciblent pas cette commune comme présentant un niveau de susceptibilité de présence de cavité karstique élevé (valeur moyenne de susceptibilité = 0,92, équivalent à un niveau « Moyen », 51% du territoire de la commune étant classé en niveau « Faible » et 49% en niveau « Moyen »).

Sans remettre en cause les résultats de la première phase, en gardant à l'esprit que la carte de susceptibilité a pour objectif de hiérarchiser les territoires à l'échelle régionale en fonction de leur exposition à la présence de cavité et non d'expliquer ou de prédire l'occurrence des phénomènes au cas par cas, il a été décidé de réaliser une analyse du cas de Romorantin-Lanthenay. Afin de compléter l'analyse de cet exemple, le BRGM a proposé d'analyser le cas d'un autre site où la présence de cavités karstiques est avérée dans un secteur où la susceptibilité de présence de cavité karstique ressort en niveau faible dans la première phase de l'étude. La commune de Briare (45) a été retenue pour cette seconde analyse. En effet, la commune a fait l'objet d'un effondrement manifestement lié à une cavité karstique lors d'un épisode de précipitations intenses au printemps 2016.

4.1.1. Rappels méthodologiques

La cartographie de susceptibilité de présence de cavités karstiques en région Centre-Val de Loire (Vanoudheusden, 2014) a été établie selon les principes méthodologiques exposés au chapitre 2.2.

Les critères utilisés pour établir la susceptibilité à la présence de cavités karstiques sont les suivants :

- nature de la formation karstique et présence ou absence d'une couverture (critère qualitatif) ;
- profondeur du toit de la formation karstique (critère quantitatif) ;
- épaisseur de la formation karstique (critère quantitatif).

En un point du territoire, la note de susceptibilité de présence de cavité est obtenue en faisant le produit du poids du critère « nature de la formation » avec la valeur de possibilité de présence la plus élevée des deux critères « profondeur du toit » et « épaisseur de la formation ».

$$\text{Susceptibilité de présence} = \text{Poids}_{\text{Nature}} \times \max(\text{Possibilité}_{\text{prof.}}; \text{Possibilité}_{\text{épaisseur}})$$

4.1.2. Cas de Romorantin-Lanthenay (41)

La base de données nationale des cavités souterraines abandonnées (BD Cavité), dont les données ont été utilisées pour établir la cartographie de susceptibilité de présence de cavité, ne

recense aucune cavité souterraine sur le territoire de la commune de Romorantin-Lanthenay. Cependant, la base de données nationale des mouvements de terrain (BD MVT) recense cinq événements sur la commune de Romorantin-Lanthenay (Illustration 13) :

- 25 décembre 1989 – place Bir Hakeim ;
- 3 janvier 1991 – localisation imprécise (point placé au centroïde de la commune) ;
- 1991 – date et localisation imprécises (place Bir Hakeim ?) ;
- 18 juillet 1996 – place Bir Hakeim ;
- 3 mars 2013 – rue Berge (Illustration 14).

Les événements de 1989 et de 1996 sont localisés de façon certaine à proximité de la place Bir Hakeim. L'effondrement de 2013 est localisé à 200 m de cette place. Les deux événements recensés en 1991 sont localisés de façon imprécise et, pour l'un des deux, seule l'année est connue. Il est possible que ces deux événements n'en soient qu'un seul, recensé en double dans la BDMVT et localisé lui aussi dans le secteur de la place Bir Hakeim.

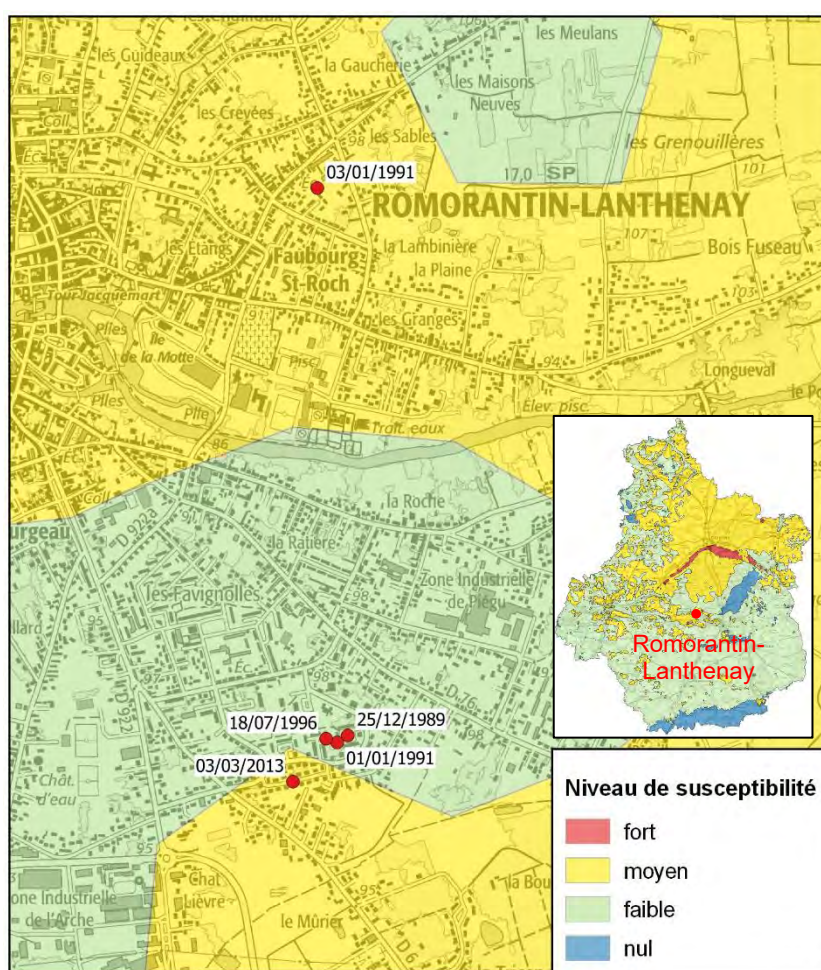


Illustration 13 : Localisation des effondrements karstiques recensés sur la commune de Romorantin-Lanthenay (41) et susceptibilité de présence de cavités karstiques.



Illustration 14 : Effondrement survenu rue Berge à Romorantin-Lanthenay le 3 mars 2013 (photo : La Nouvelle République – 11 mars 2013).

Ces désordres récurrents sont, selon toute vraisemblance, d'origine naturelle. Par conséquent, bien qu'aucune cavité n'ait été recensée, ils attestent de la présence de cavités karstiques sur la commune de Romorantin-Lanthenay. Pour autant, le secteur de la place Bir Hakeim se situe à la limite de deux zones de susceptibilité de présence de cavité de niveaux moyen et faible, zones sur lesquelles on ne s'attend *a priori* pas à rencontrer des manifestations karstiques récurrentes.

D'un point de vue géologique, la commune de Romorantin-Lanthenay se situe au sud de la Sologne, à la limite méridionale de l'extension des calcaires de Beauce et de leur couverture sablo-argileuse (Illustration 15b). D'après le modèle géologique du SIGES Centre, utilisé pour la cartographie de la susceptibilité de présence de cavité, l'épaisseur du calcaire de Beauce au niveau de la place Bir Hakeim est de 1,7 m (Illustration 15a). Toujours selon le modèle géologique, l'épaisseur du recouvrement plio-quadernaire à cet endroit est de 1 m. Bien que nous ne disposions pas de données sur la précision altimétrique du modèle géologique, les très faibles épaisseurs modélisées sur cette zone sont très certainement du même ordre de grandeur que l'incertitude entachant le modèle. On peut donc supposer que le modèle ne représente pas fidèlement le contexte géologique local de ce secteur.

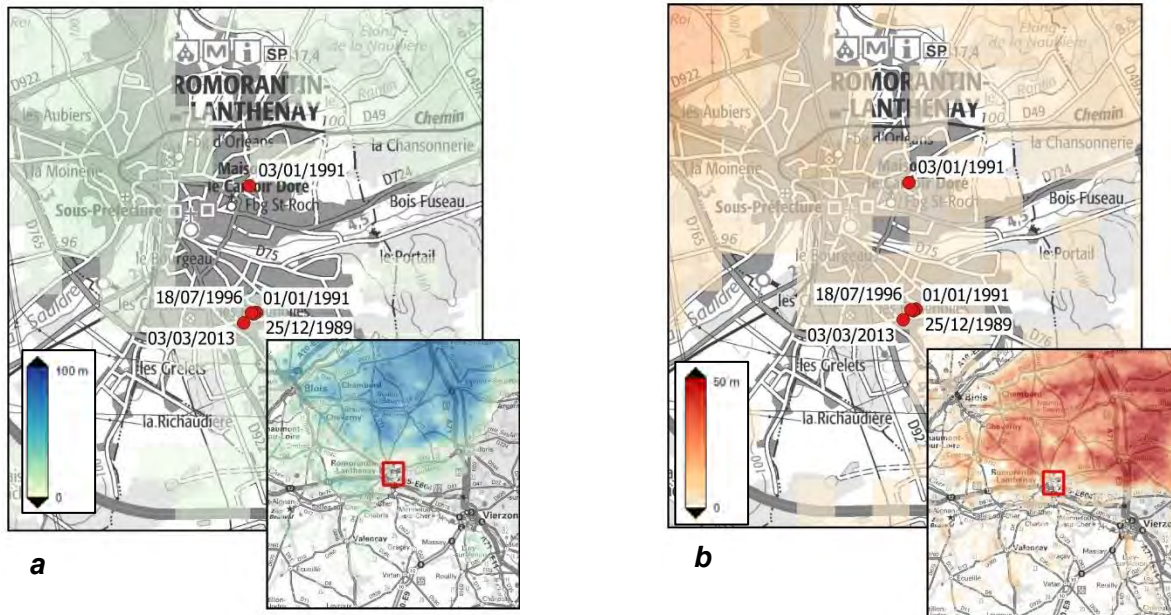


Illustration 15 : Extrait du modèle géologique 3D dans le secteur de Romorantin-Lanthenay. a. Epaisseur du calcaire de Beauce (CABE), b. épaisseur de la couverture plio-quadernaire (RECO).

Par ailleurs l'examen de la carte géologique de la France au 1/50 000 (Feuille n°460 – Romorantin) permet de constater que les effondrements se situent dans une zone d'alluvions récentes sableuses (Fya sur l'illustration 16a). On constate également une forte hétérogénéité spatiale des formations superficielles sur le secteur avec, notamment, la présence de différentes générations d'alluvions. Par comparaison, le modèle géologique (Illustration 16b) ne retranscrit pas cette variabilité spatiale. Là encore, une limite d'utilisation du modèle géologique est probablement atteinte, le regroupement dans un même ensemble « recouvrement plio-quadernaire » de formations superficielles dont les lithologies sont très différentes ne permettant pas de rendre compte des hétérogénéités locales des propriétés de la couverture.

La précision du modèle géologique utilisé n'étant pas connue, son impact sur le calcul de la susceptibilité de présence de cavité n'est pas quantifiable.

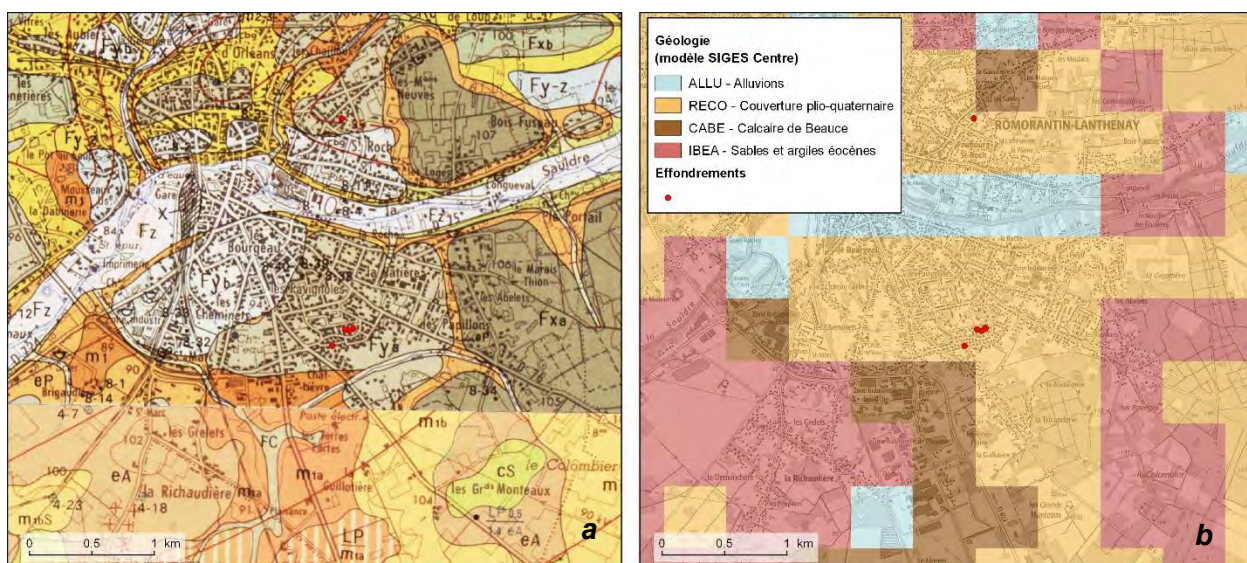


Illustration 16 : Localisation des effondrements recensés à Romorantin-Lanthenay a) sur la carte géologique au 1/50 000, b) Sur le modèle géologique du SIGES Centre).

4.1.3. Cas de Briare (45)

La commune de Briare, qui borde la Loire en rive droite à l'est du département du Loiret, est concernée par une susceptibilité de présence de cavité de niveau moyen pour 62 % de son territoire d'après les calculs réalisés durant la phase 1 de l'étude. Les 38 % restant sont soumis à une susceptibilité de niveau faible. La susceptibilité de niveau moyen concerne essentiellement la partie haute de la commune, surplombant le fleuve, tandis que le val de Loire est concerné par une susceptibilité de niveau faible (Illustration 17). La base de données nationale des cavités souterraines abandonnées (BD Cavité) recense trois indices de cavités naturelles sur le territoire de Briare.

En juin 2016, suite aux fortes précipitations du printemps, un désordre est apparu sur le terrain d'un particulier situé dans la plaine alluviale de la Loire au lieu-dit « Le Martinet », entre le canal de Briare et la Loire. Le désordre consiste en une zone affaissée de 7 m x 7 m environ au sein de laquelle s'ouvrent de petits effondrements de 20 à 25 cm de diamètre et profonds d'au moins 1,5 m (Illustration 18). Une expertise réalisée par le Cerema (Durand, 2016) a conclu à une origine karstique de ce désordre.

L'effondrement se situe, d'après le modèle géologique, au droit de la craie séno-turonienne, sous une épaisseur d'alluvions de 1 m. Ce contexte, selon les critères géologiques de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014), correspond à une densité de présence de cavité de 1. En comparaison la densité maximale à l'échelle régionale est de 4 pour le calcaire de Beauce sous couverture alluviale. Le critère « épaisseur de recouvrement » étant maximal (égal à 1), et le critère « épaisseur de la formation karstique » n'étant pas évalué pour la craie du Séno-Turonien, la note de susceptibilité finale de présence de cavité est égale à 1.

La note de susceptibilité de présence de cavité relativement faible est à mettre en relation avec le faible nombre de cavités répertoriées dans l'inventaire dans ce contexte géologique (Craie séno-turonienne sous couverture alluviale) au regard du nombre de celles recensées dans le calcaire de Beauce par exemple. La méthodologie employée conduit à une hiérarchisation des différentes zones du territoire étudié au regard de leur susceptibilité de présence de cavité. Dans le cas de Briare, et plus généralement dans toutes les zones de présence de la craie séno-turonienne sous couverture alluviale (contexte essentiellement représenté en Indre-et-Loire et dans le nord-ouest du Loir-et-Cher), la susceptibilité de présence de cavité est faible (mais non nulle) en comparaison de celle rencontrée en contexte de calcaire de Beauce par exemple. Ce résultat reflète la répartition des données d'inventaire utilisées en entrée. Cet écart entre les notes de susceptibilité obtenues pour deux contextes différents peut être expliqué :

- soit par un contexte réellement plus favorable que l'autre à la présence de cavité. Dans ce cas le résultat obtenu traduit fidèlement la réalité ;
- soit par une surreprésentation des données d'inventaire dans un des contextes par rapport aux autres, comme c'est certainement le cas du calcaire de Beauce qui est beaucoup plus documenté que les autres parties de la région. La méthode de cartographie utilisée permet de pallier les hétérogénéités d'inventaire mais elle n'a pas vocation à pallier l'absence de données pour un contexte spécifique. Dans ce cas, seul un travail d'inventaire complémentaire visant à en améliorer la représentativité pourra rééquilibrer le résultat.

Les outils d'évaluation de la qualité de diagnostic fournis avec la méthode et décrits au chapitre 2.2.5 ne permettent pas d'évaluer la représentativité des données d'inventaire.

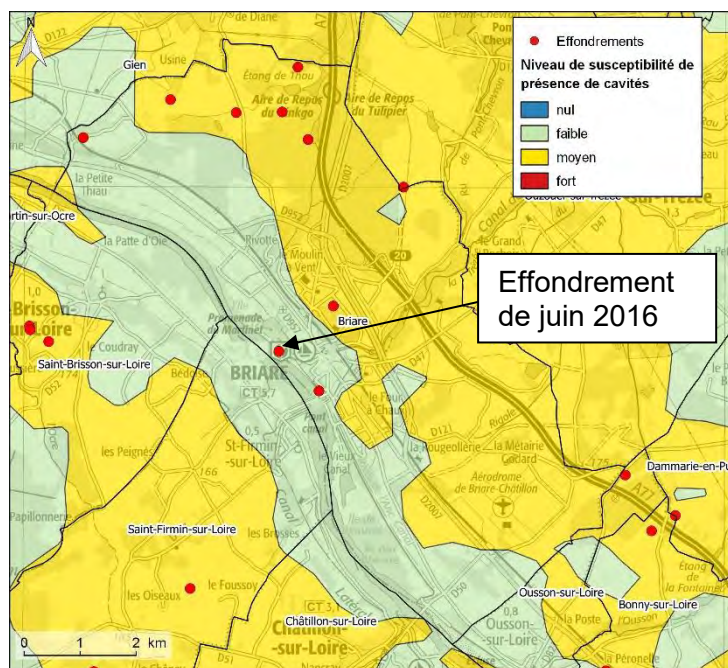


Illustration 17 : Localisation de l'effondrement de juin 2016 et niveaux de susceptibilité de présence de cavité sur la commune de Briare.



Illustration 18 : Désordre de juin 2016 à Briare.

4.2. EVALUATION DE LA QUALITE DU DIAGNOSTIC DE SUSCEPTILITE DE PRESENCE DE CAVITE

Bien que les sources supposées d'incertitudes sur le diagnostic de susceptibilité de présence de cavité, identifiées dans les cas de Romorantin-Lanthenay et de Briare (respectivement l'imprécision du modèle géologique et le manque de représentativité de l'inventaire des cavités), ne puissent pas être quantifiées par les outils utilisés, la démarche de quantification des incertitudes liées aux choix de l'expert est entreprise sur les calculs de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014).

Pour mémoire, cette démarche fournit pour chaque critère explicatif quantitatif une cartographie de l'indicateur de confiance associé à la cartographie du critère. Cet indicateur transcrit, d'une part, l'incertitude associée au jugement d'expert dans la définition des fonctions de possibilité et, d'autre part, l'incertitude sur les données d'entrée lorsque cette information est disponible (cf. chapitre 2.2.5).

Les deux critères explicatifs quantitatifs utilisés dans le cadre de cette première phase étaient l'épaisseur de recouvrement et l'épaisseur de la formation karstique. L'information sur la précision du modèle géologique utilisé pour l'évaluation de ces critères n'étant pas disponible, seule l'incertitude liée au jugement d'expert sera quantifiée.

4.2.1. Evaluation de l'incertitude liée au critère « épaisseur de recouvrement »

Dans le cadre de la première phase de l'étude, le poids du critère « épaisseur de recouvrement » dans la susceptibilité de présence de cavité a été évalué pour les formations calcaire de Beauce (CABE), craie séno-turonienne (CRAI), calcaires du Kimméridgien-Oxfordien (KIOX) et marnes calcaires du Dogger-Lias (DOLI). Le manque de données d'inventaire, ou l'hétérogénéité de ces données, pour les autres formations potentiellement karstifiées prises en compte dans l'étude, n'a pas permis de prendre en compte le critère « épaisseur de recouvrement » dans l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité.

L'analyse de la répartition des cavités en fonction de l'épaisseur de recouvrement pour chacune des formations (Illustration 19) et la comparaison avec les fonctions de possibilité qui ont été tirées de cette répartition dans le cadre de la première phase de l'étude (Illustration 20) conduisent à proposer des fonctions de possibilités pessimiste et optimiste encadrant les fonctions de possibilité retenues. Les fonctions de possibilité pessimiste, optimiste et retenue pour chacune des formations sont reportées sur l'illustration 20.

La cartographie du niveau de confiance du diagnostic lié au critère « épaisseur de recouvrement », calculé selon la méthodologie décrite au paragraphe 2.2.5, est présentée sur l'illustration 21.

On constate que le niveau de confiance associé à ce critère est « Bon » à « Certain » dans la zone de présence du calcaire de Beauce (correspondant approximativement au département du Loiret et à la Sologne). Le niveau de confiance est en revanche « Médiocre » à « Très incertain » au sud de la région, dans les zones d'affleurement du Kimméridgien-Oxfordien et du Dogger-Lias et dans sa partie ouest (approximativement le département de l'Indre-et-Loire) où se trouve la craie séno-turonienne. Ces faibles niveaux de confiance sont expliqués par la répartition des cavités en fonction de l'épaisseur de recouvrement (Illustration 19) qui a conduit, pour ces formations, à considérer des fonctions de possibilité optimiste et pessimiste très différentes l'une de l'autre, traduisant ainsi l'incertitude de l'expert dans son jugement.

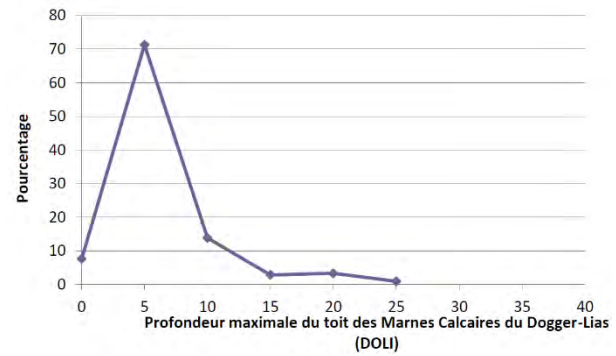
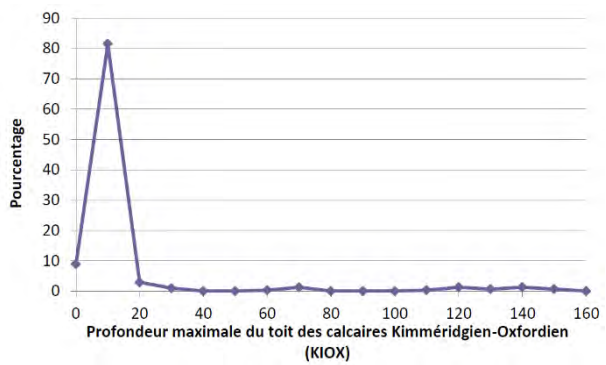
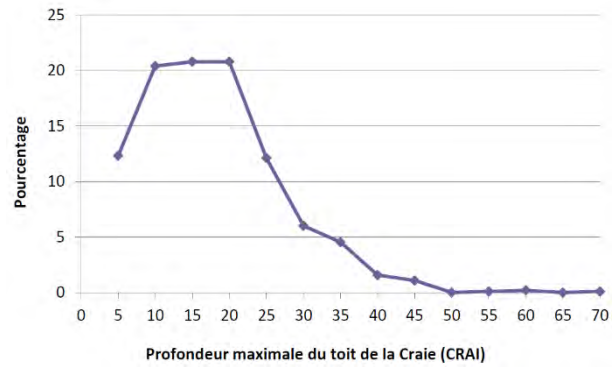
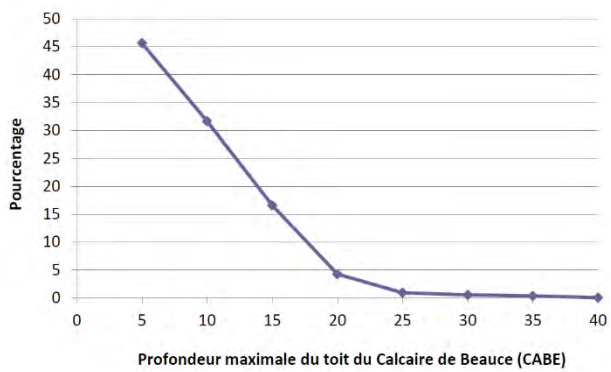


Illustration 19 : Répartition des cavités en fonction du critère « profondeur du toit de la formation karstique » (ou « épaisseur de recouvrement »). (Vanoudheusden, 2014)

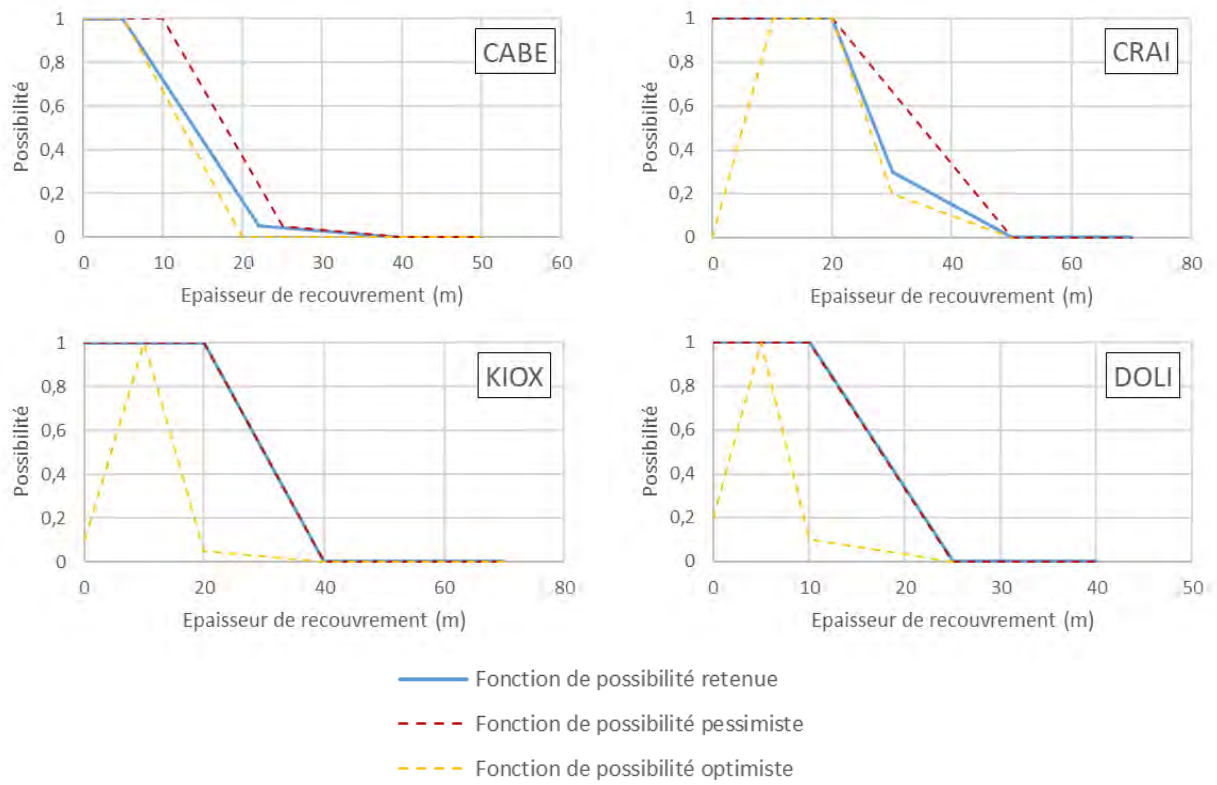


Illustration 20 : Fonctions de possibilité optimistes, pessimistes et retenues pour le critère « épaisseur de recouvrement » pour les formations CABA, CRAI, KIOX et DOLI.

**Niveaux de confiance
associés au critère
"épaisseur de recouvrement"**

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

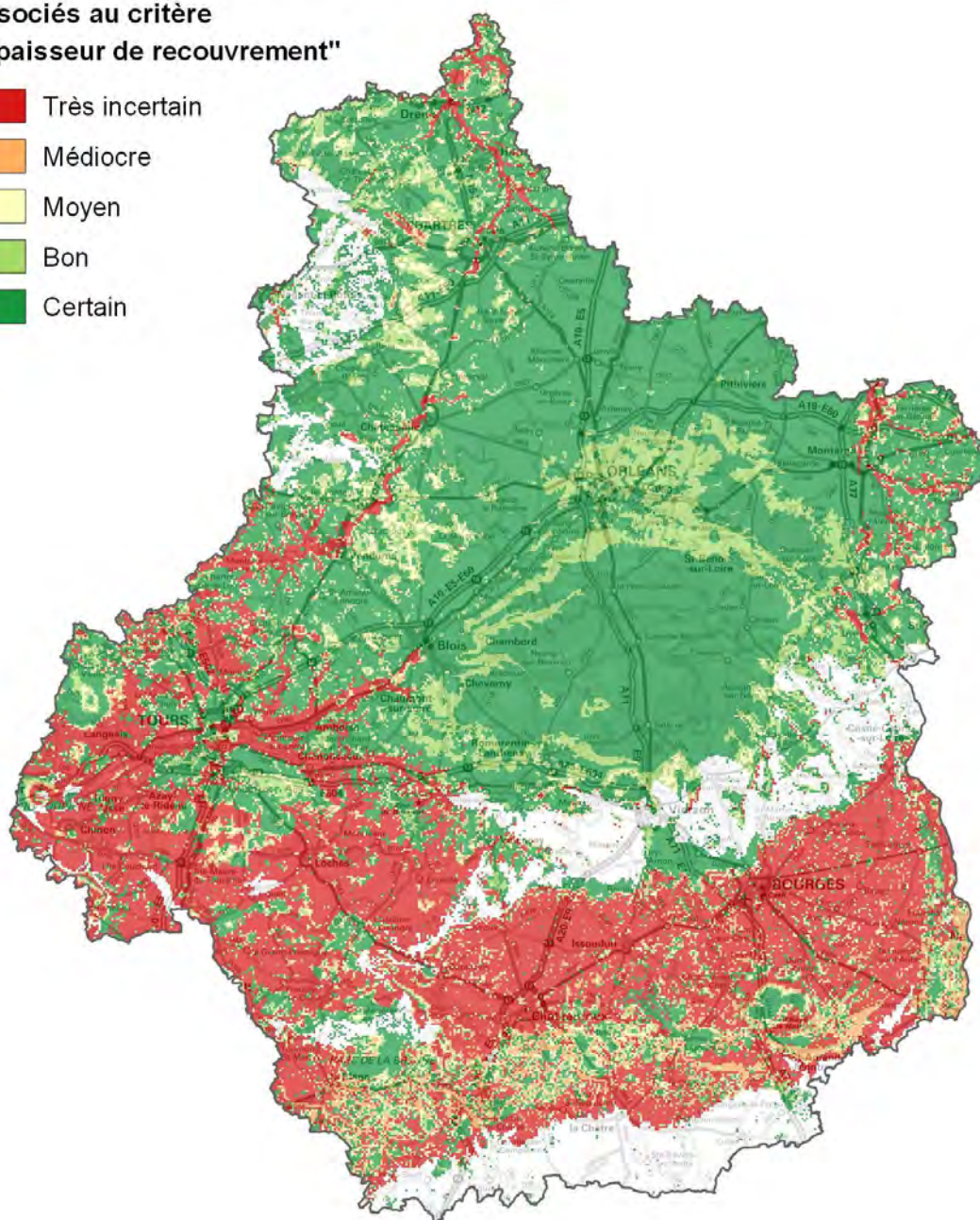


Illustration 21 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de recouvrement » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité.

4.2.2. Evaluation de l'incertitude liée au critère « épaisseur de la formation karstique »

De la même manière que pour le critère « épaisseur de recouvrement », des fonctions de possibilité ont été définies pour le critère « épaisseur de la formation karstique » dans la première phase de l'étude pour les calcaires de Beauce (CABE) et les marnes calcaires du Dogger-Lias (DOLI). La distribution des données d'inventaire en fonction de ce critère au sein des autres formations n'a pas permis de dégager de fonctions de possibilités.

L'analyse de la répartition des cavités en fonction de l'épaisseur de la formation karstique pour chacune des formations (Illustration 22) et la comparaison avec les fonctions de possibilité qui ont été tirées de cette répartition dans le cadre de la première phase de l'étude (Illustration 23) conduisent à proposer des fonctions de possibilités pessimiste et optimiste encadrant les fonctions de possibilité retenues. Les fonctions de possibilité pessimiste, optimiste et retenue pour chacune des formations sont reportées sur l'illustration 23.

La cartographie du niveau de confiance du diagnostic lié au critère « épaisseur de la formation karstique » est présentée sur l'illustration 24.

On constate que le niveau de confiance associé à ce critère est maximal dans une frange située au nord d'Orléans ainsi qu'en Sologne. Ces secteurs correspondent à des zones où l'épaisseur de calcaire de Beauce est de 60 m environ. Au sud de la région, où affleurent les formations du Dogger-Lias, le niveau de confiance est maximal au niveau de deux franges est-ouest correspondant à des épaisseurs de la formation d'environ 100 m pour la frange la plus au sud et supérieures à 420 m pour la frange la plus au nord. Comme pour le critère « épaisseur de recouvrement », cette répartition est liée à la répartition des cavités en fonction des valeurs du critère, qui conduit l'expert à envisager des fonctions de possibilité optimiste et pessimiste plus ou moins éloignées l'une de l'autre.

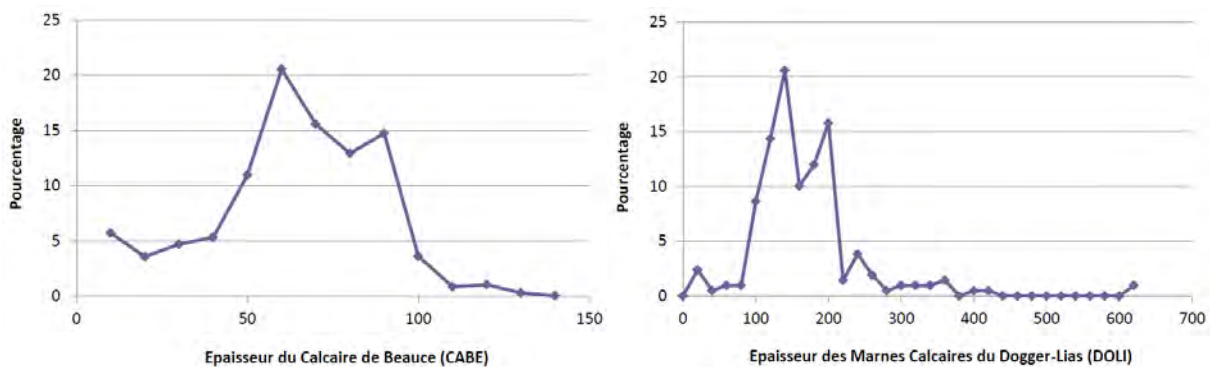


Illustration 22 : Répartition des cavités en fonction du critère « épaisseur de la formation karstique » (Vanoudheusden, 2014).

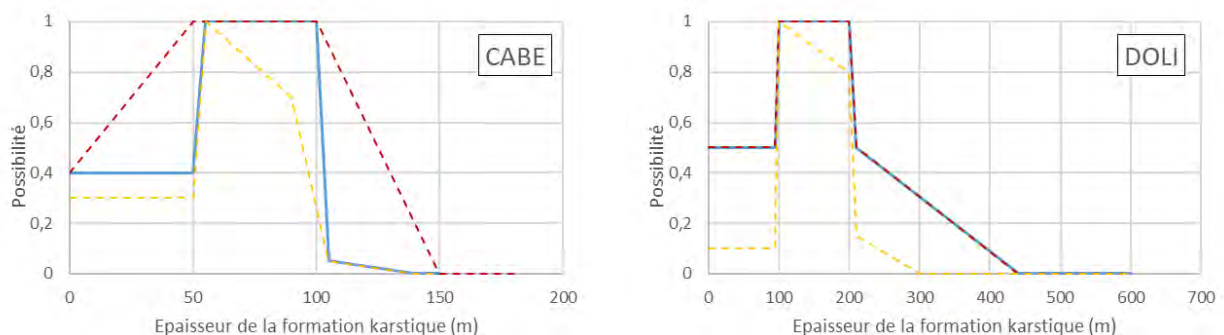


Illustration 23 : Fonctions de possibilité optimistes, pessimistes et retenues pour le critère « épaisseur de la formation karstique » pour les formations CABA et DOLI.

**Niveaux de confiance
associés au critère "épaisseur de
la formation karstique"**

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

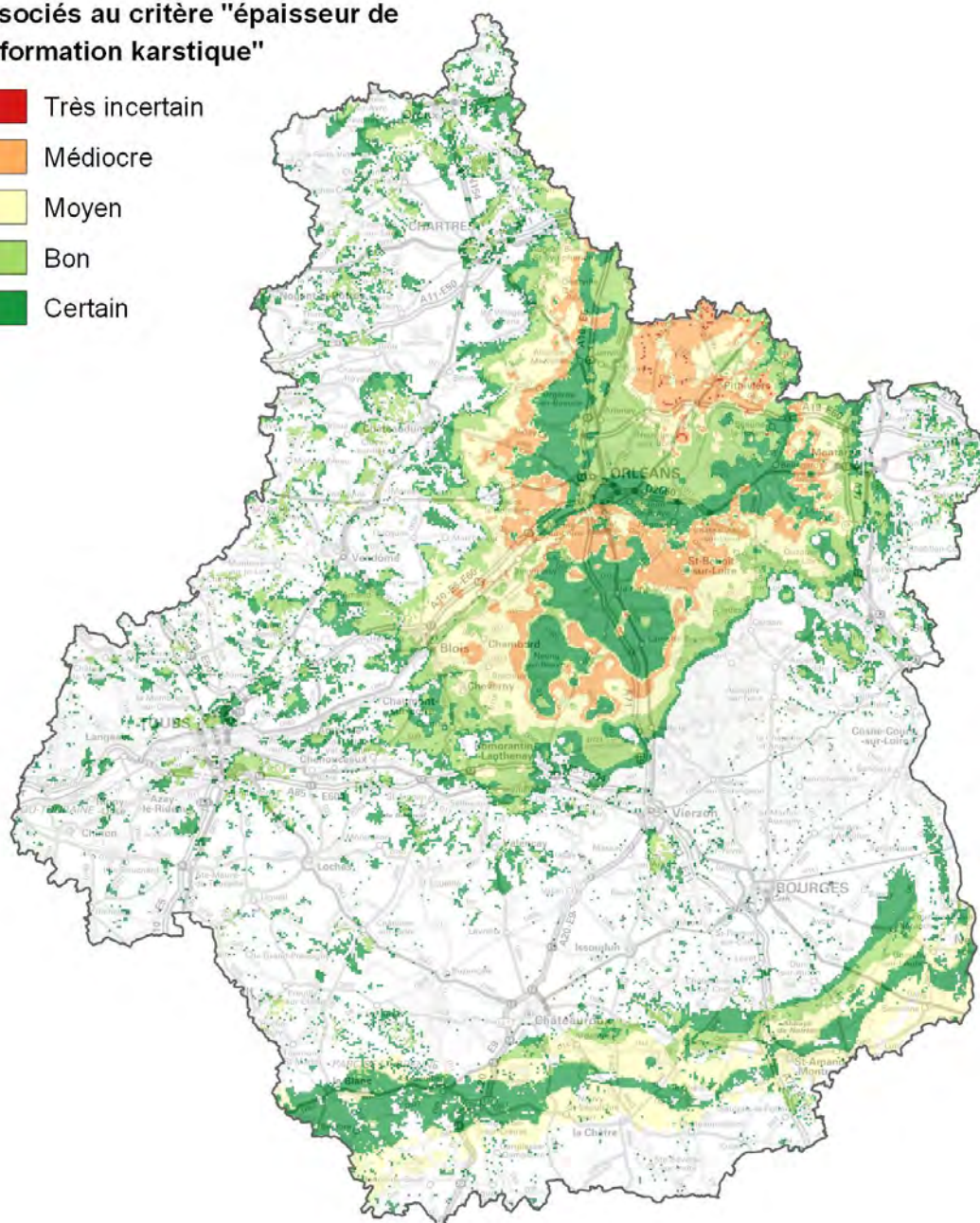


Illustration 24 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité.

4.2.3. Evaluation de l'incertitude globale du diagnostic de susceptibilité de présence de cavité

Le niveau de confiance associé à l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité karstique est calculé à partir des niveaux calculés pour les critères « épaisseur de recouvrement » et « épaisseur de la formation karstique » déterminés précédemment.

Selon la méthode utilisée pour la première phase de l'étude, la combinaison des critères quantitatifs se fait par sélection, pour chaque maille de calcul, du critère pour lequel le poids d'appartenance calculé est le plus élevé. De ce fait, le niveau de confiance qui est retenu pour chaque maille de calcul correspond au niveau de confiance associé au critère pour lequel le poids d'appartenance est le plus élevé.

La cartographie du niveau de confiance combiné des critères « épaisseur de recouvrement » et « épaisseur de la formation karstique » est présenté sur l'illustration 25. Cette cartographie représente le niveau de confiance global accordé au diagnostic de présence de cavité (l'incertitude associée aux critères qualitatifs n'étant pas quantifiable avec la méthodologie employée).

L'examen de la carte de niveau de confiance du diagnostic de susceptibilité de présence de cavité montre que celui-ci est établi de façon certaine sur la partie nord de la région, correspondant pour l'essentiel à l'extension du calcaire de Beauce. Le diagnostic est établi de façon beaucoup moins fiable sur le sud (extension du Dogger-Lias et Kimméridgien-Oxfordien) et l'ouest (extension de la craie du Séno-Turonien) du territoire régional. Ces disparités pourraient être expliquées (sans que cela ne puisse être confirmé en l'état actuel des connaissances) par le manque de données d'inventaire représentatives de ces secteurs, empêchant ainsi d'évaluer l'influence des différents critères de façon certaine.

**Niveau de confiance global
associé au diagnostic de susceptibilité
de présence de cavité karstique**

-  Très incertain
-  Médiocre
-  Moyen
-  Bon
-  Certain

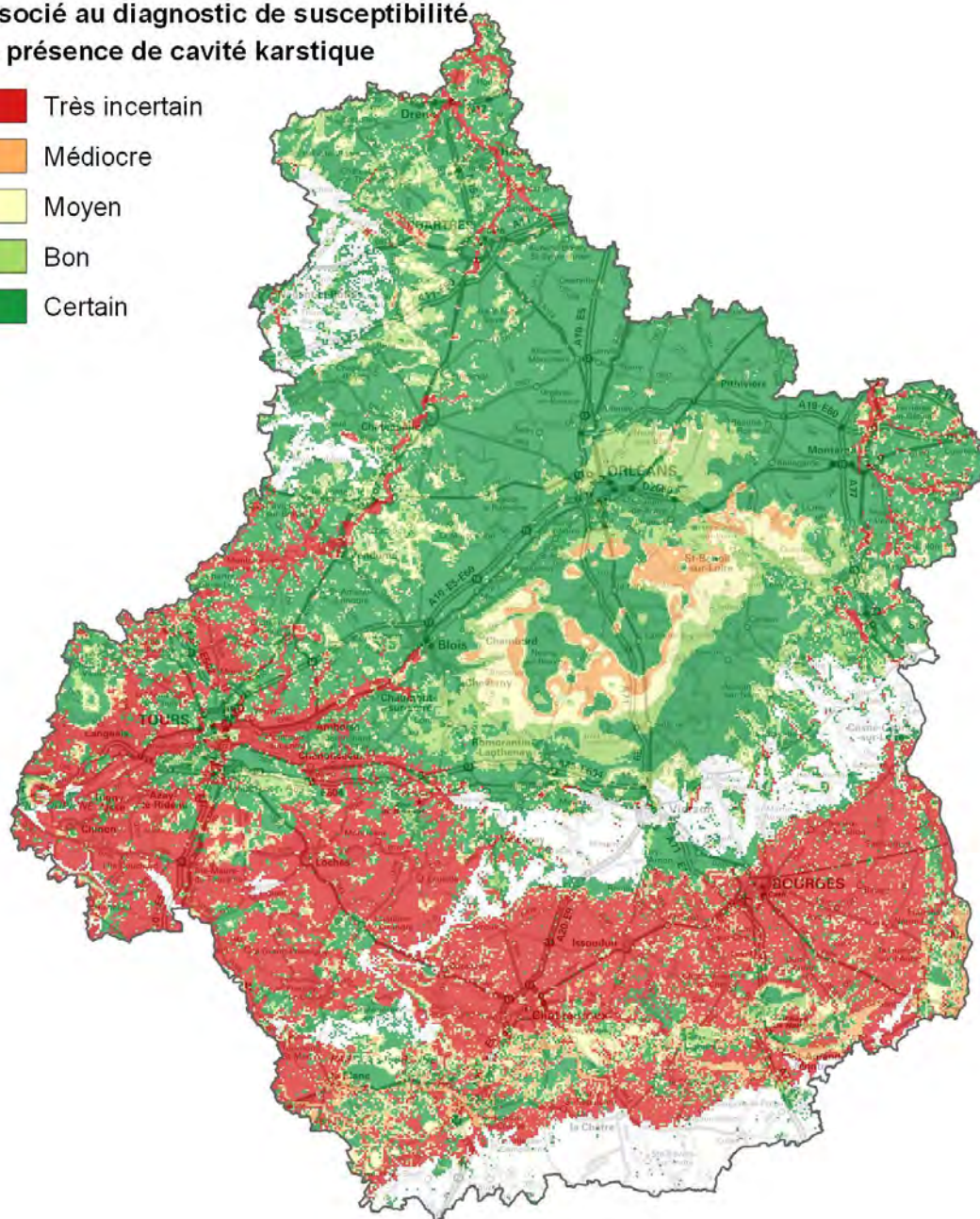


Illustration 25 : Cartographie du niveau de confiance global associé au diagnostic de la susceptibilité de présence de cavité.

5. Evaluation de la susceptibilité d'effondrement de cavité karstique

L'évaluation de la susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique est réalisée selon la méthode décrite au chapitre 2.2. Celle-ci comporte les étapes suivantes :

- constitution d'un inventaire des effondrements de cavités karstiques sur le territoire de la région Centre-Val de Loire ;
- sélection de facteurs de prédisposition aux effondrements de cavités karstiques ;
- calcul du poids de chacun des facteurs retenus ;
- évaluation de la susceptibilité d'effondrement par combinaison des poids des différents facteurs ;
- évaluation de la susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique par croisement de la susceptibilité de présence de cavité évaluée dans la première phase de l'étude avec la susceptibilité d'effondrement calculée précédemment.

Ces étapes sont décrites dans les chapitres qui suivent.

5.1. INVENTAIRE DES EFFONDREMENTS DE CAVITES KARSTIQUES

5.1.1. Constitution de l'inventaire des effondrements de cavités karstiques sur la zone d'étude

La méthodologie utilisée pour l'élaboration de la carte de susceptibilité repose sur l'analyse d'un inventaire des événements représentatifs du phénomène considéré, en l'occurrence l'effondrement de cavités karstiques. Une étape préliminaire au travail d'évaluation de cette susceptibilité consiste donc à établir un catalogue d'événements le plus exhaustif et le plus fiable possible sur le territoire régional à partir de sources de données hétérogènes.

a) Sources de données

- **Base de donnée nationale des mouvements de terrain**

La base de données nationale des mouvements de terrain (BDMVT), constituée à la demande du MTES et gérée par le BRGM, recense les mouvements de terrain de tout type (hors mouvements de terrain différentiels liés au phénomène de retrait/gonflement des sols argileux) en France métropolitaine et en Outre-Mer. Elle est consultable librement sur le site internet www.georisques.gouv.fr.

L'acquisition des données se fait essentiellement à partir d'inventaires effectués par les organismes nationaux concernés par les mouvements de terrain : le BRGM, l'IFSTTAR, le CEREMA ainsi que les services RTM de l'ONF pour les régions montagneuses.

Les données contenues dans la base sont issues de différentes sources :

- anciennes bases de données et inventaires partiels détenus par les organismes contributeurs à l'alimentation de la base (BRGM et Cerema principalement) ;
- informations ponctuelles d'origines variées : dossiers d'expertises, médias, collectivités, ...

- Inventaires départementaux spécifiques réalisés par le BRGM depuis 2001.

A chaque événement est associée une fiche descriptive mentionnant notamment le type de phénomène, sa localisation, la précision de sa localisation, sa date d'occurrence, et l'origine de la donnée.

La base de données nationale des mouvements de terrain recensait, au moment de la constitution du catalogue d'événements (novembre 2017), 4 106 mouvements de terrain tous types confondus sur le territoire de la région Centre-Val de Loire.

- **Inventaires départementaux des mouvements de terrain**

La programmation des inventaires départementaux réalisés par le BRGM, pour couvrir le territoire national, a été établie en fonction de l'importance du nombre de phénomènes dans un département et des priorités accordées aux études susceptibles d'être cofinancées ou étant considérées comme préalables à d'autres études.

En région Centre-Val de Loire, ces inventaires ont été réalisés entre 2012 et 2017 et ont permis de recenser les événements suivants :

Type mouvement de terrain	départements CVL					
	Cher	Eure-et-Loir	Indre	Indre-et-Loire	Loir-et-Cher	Loiret
Chutes de blocs et éboulements	7	64	10	484	274	1
Coulées de boue	23	7	-	8	7	4
Effondrements et affaissements	201	661	272	365	375	3380
Erosions de berges	19	10	-	4	10	10
Glissements et fluages lents	13	10	3	164	111	7
nombre total d'évènements recensés	263	752	285	1025	777	3402

Illustration 26 : Recensement des différents types de mouvement de terrain en région Centre Val de Loire

La constitution de ces inventaires a donné lieu à la publication d'un rapport pour chaque département :

- Cher : Rapport BRGM/RP-62757-FR (Greffié, et al., 2013) ;
- Loiret : Rapport BRGM/RP-62722-FR (Greffié, et al., 2013) ;
- Indre-et-Loire : Rapport BRGM/RP-64393-FR (Greffié, 2015) ;
- Indre : Rapport BRGM/RP-64394-FR (Greffié, 2015) ;
- Eure-et-Loir : Rapport BRGM/RP-66587-FR (Greffié, et al., 2016) ;
- Loir-et-Cher : Rapport BRGM/RP-66588-FR (Greffié, et al., 2017).

La collecte des données pour réaliser ces inventaires départementaux se fait à partir de recherches bibliographiques, de questionnaires d'enquête envoyés aux communes, de recueils de données effectués auprès des services techniques concernés et de visites de terrain pour rassembler toutes les informations publiées ou connues, relatives aux événements historiques et récents.

Le recensement des données d'archives s'appuie sur :

- les données archivées au BRGM, notamment à la Direction Régionale Centre-Val de Loire ;
- les données relatives à la base de données nationale sur les mouvements de terrain BDMVT (Base à laquelle ont été intégrées les informations de la base de données

« HUMBERT » créée par le BRGM en 1977). A noter qu'au commencement en 2012 des inventaires départementaux en région Centre-Val de Loire, la base de données BDMVT ne recensait que de très rares événements mouvements de terrain, respectivement un événement pour le Cher, trois événements pour l'Eure-et-Loir, le Loir-et-Cher et le Loiret et huit événements pour l'Indre.

- la banque de données du sous sol (BSS) ;
- la base de données BD Cavité relative aux cavités souterraines, gérée par le BRGM ainsi que tous les dossiers papier archivés lors de cet inventaire ;
- la consultation des cartes géologiques au 1/50 000 du département ;
- les données fournies par les administrations et services de l'Etat, organismes publics, sociétés privées et associations (DDT, CEREMA, SNCF, ONF, DREAL, associations de spéléologie, syndicats, GEODERIS pour les provinces ayant connu une activité minière comme le sud de l'Indre par exemple) ;
- L'analyse des dossiers communaux spécifiques (enquêtes détaillées auprès des propriétaires sur l'aléa mouvement de terrain) et toute autre information ponctuelle d'origine variée : dossiers d'expertises, médias...

La principale difficulté rencontrée dans ces travaux d'inventaire est la grande disparité des données recueillies, que ce soit d'une commune à une autre ou d'un organisme à un autre. En effet, les différentes sources d'informations répondent souvent à des objectifs différents. A titre d'exemple, la BD Cavité a pour objectif de recenser l'existence de cavités souterraines, ce qui n'implique pas obligatoirement la prise en compte de désordres en surface (soit qu'ils n'existent pas, soit qu'ils n'ont pas été décrits). Aussi, certains départements disposent d'études scientifiques dédiées ayant permis de cartographier de façon relativement exhaustive les effondrements de terrain, c'est le cas par exemple du Loiret, avec les travaux suivants :

- une cartographie de l'aléa global relatif à la présence de cavités souterraines et de désordres de surface a été réalisée en 2003 à la demande de la DDT du Loiret (Giot et *al.*, 2003) ;
- une étude sur la présence de karsts sous les levées du bassin de la Loire réalisée en 2007 en collaboration avec la DREAL Centre (Donsimoni et *al.*, 2007) ;
- une étude sur l'hydrogéologie du Val d'Orléans comprenant un vaste inventaire des cavités d'origine karstique (Desprez et Martins, 1977) ; données digitalisées par Perrin et *al.* (2013).
- Des inventaires réalisés à l'échelle communale (Jargeau, La Chapelle Saint Mesmin...)

Globalement, la disparité du niveau d'information relatif aux mouvements de terrain signalés, tant au niveau de la précision de localisation que de l'exhaustivité de la donnée recueillie, comprend :

- absence de localisation ou localisation très sommaire (nom du Lieu dit) ; et à l'autre extrême fourniture d'un plan cadastral de la parcelle ;
- disparité locale quant à la qualité de l'information, liée au fait légitime que les intéressés privilégient de manière générale les secteurs à forts enjeux actuels, délaissant les zones non-urbanisées ;
- pour les enquêtes communales, l'ampleur des phénomènes est parfois mal évaluée soit parce que le phénomène est considéré comme « habituel » (« il y a toujours eu

des affaissements de terrain sur ces parcelles agricoles ») soit parce que, au contraire, il est amplifié ;

- certaines communes gardent trace des événements passés (la transmission de la connaissance du territoire est maintenue dans les communes rurales), d'autres non.

La majorité des événements recensés dans ces inventaires départementaux sont décrits avec une précision de localisation **d'ordre décimétrique** ce qui correspond à une localisation précise sur un extrait de carte IGN à 1/25 000 (via les enquêtes communales par exemple). Un certain nombre d'événements sont décrits **à l'échelle métrique**, ce qui correspond à une mesure GPS lors de la visite de terrain ou à une localisation précise à partir d'une adresse complète ou d'une localisation sur plan cadastral. Les mouvements de terrain recensés à l'échelle hectométrique ou kilométrique sont issus de sources de données ayant fourni une adresse incomplète. Lorsque seul le nom de la commune est fourni, une précision de localisation d'ordre communal est indiquée.

Les données recueillies dans le cadre des inventaires départementaux des mouvements de terrain sont versées dans la base de données nationale des mouvements de terrain (cf. paragraphe précédent). Au moment de la constitution du catalogue d'événement, toutes les données issues des inventaires départementaux n'étaient pas encore saisies dans la base de données.

- **Retour d'expérience sur les effondrements survenus dans le Loiret suite aux précipitations du printemps 2016**

La crise météorologique de fin mai et début juin 2016 ayant touché la moitié nord de la France métropolitaine a sévèrement affecté le Loiret : 72% des communes du département étaient reconnues en état de catastrophe naturelle pour inondation en juin 2016 (Noury, et al., 2017). Dans le secteur d'Orléans, les fortes précipitations, et surtout les inondations par ruissellement, ont causé de nombreux mouvements de terrain liés à des cavités souterraines.

Les informations issues des expertises réalisées par le BRGM, le Cerema et les services techniques d'Orléans Métropole sur les mouvements de terrain associés à des cavités dans le Loiret suite à l'événement météorologique du printemps 2016 ont été synthétisées dans le rapport BRGM/RP-66462-FR (Noury, et al., 2017). Ce rapport répertorie 83 événements, dont 37 sont localisés sur la commune de Gidy, au nord d'Orléans, et 24 sont localisés sur la commune de Chécy, dans le val de Loire à l'est d'Orléans.

b) Sélection des événements et homogénéisation de l'inventaire

Les différentes sources de données permettent de constituer un catalogue comportant 6 734 mouvements de terrain. Un certain nombre d'opérations sont effectuées sur ce catalogue afin de sélectionner les données pertinentes pour la suite de l'étude.

- **Sélection par type de mouvement de terrain**

Un premier filtre consiste à écarter de l'inventaire les mouvements de terrain qui ne sont pas de type « Effondrement ». Cette opération conduit à conserver 5 481 événements.

- **Sélection par précision de localisation**

Les données issues de la BDMVT et des inventaires départementaux sont le plus souvent associées à une information sur la précision de leur localisation. L'analyse de ces données a conduit à classer les événements en cinq groupes selon leur précision de localisation :

- métrique ;
- décamétrique ;
- hectométrique ;
- kilométrique ;
- communal.

La localisation des événements issus du retour d'expérience sur les effondrements survenus suite à la crise météorologique de 2016 dans le Loiret est jugée fiable. De ce fait une précision de localisation métrique leur est affectée.

Pour les autres événements ne comportant pas d'information sur la précision de leur localisation, une précision décamétrique leur est affectée arbitrairement.

Afin de ne pas biaiser les résultats des calculs de susceptibilité avec des événements positionnés au mauvais endroit, il convient d'écarter de l'inventaire les événements mal localisés. De ce fait, les événements dont la précision de localisation est moins bonne que le kilomètre sont écartés. Le choix de ce seuil représente un compromis acceptable permettant de conserver un maximum d'événements tout en étant compatible avec l'échelle de travail (cartographie selon une maille de 500 m).

A l'issue de cette phase, 5 213 événements sont conservés. Treize événements supplémentaires, situés en limite du territoire régional et en dehors de l'emprise du modèle géologique utilisé dans la suite de l'étude, sont également écartés, ce qui conduit à conserver 5 200 événements.

- **Sélection par nature de la cavité à l'origine de l'événement**

La dernière phase de filtrage des données consiste à sélectionner les effondrements associés à des cavités karstiques (donc naturelles). L'analyse des données d'inventaire permet de classer les événements en trois catégories :

- Effondrements associés à une cavité naturelle avérée : 4 197 événements ;
- Effondrements associés à une cavité d'origine anthropique avérée : 382 événements ;
- Effondrement associés à une cavité d'origine indéterminée : 621 événements.

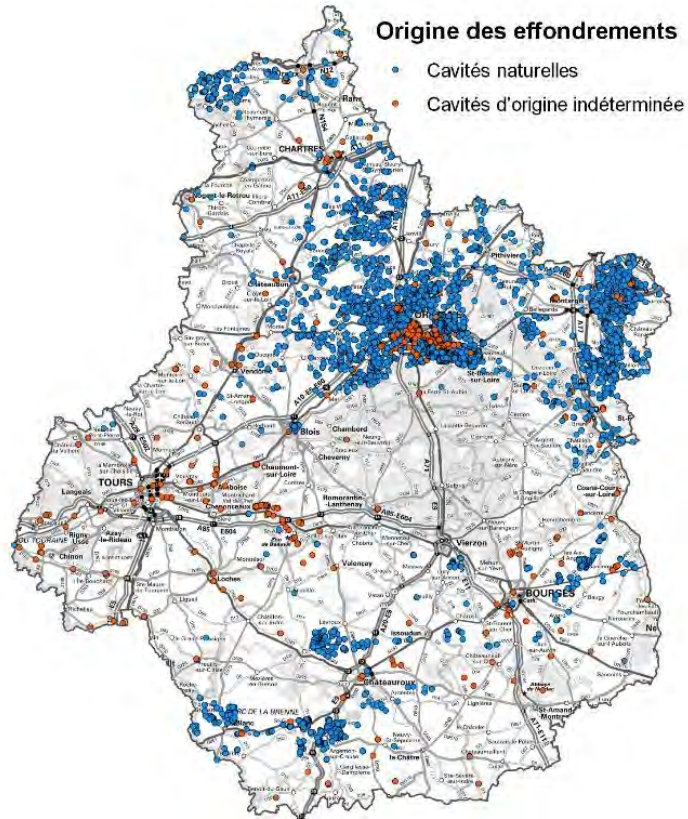
Une analyse de la répartition spatiale des événements selon leur origine conduit notamment à constater que le nombre d'effondrements d'origine naturelle recensés sur la partie ouest de la région, plus particulièrement en Indre-et-Loire, est particulièrement faible (Illustration 27a, seulement huit effondrements d'origine naturelle avérée dans le département, soit 0,2 % des effondrements d'origine naturelle). Par ailleurs, le département de l'Indre-et-Loire comporte une part importante d'effondrements d'origine indéterminée. Cette proportion d'événements d'origine indéterminée reflète manifestement une source de données de qualité médiocre spécifiquement sur ce département ne permettant pas de déterminer l'origine des désordres. D'autre part, le département d'Indre-et-Loire comporte la surface d'affleurement de la craie séno-turonienne (CRAI sur l'illustration 27b) la plus importante de la région.

Afin de ne pas conduire à une sous-estimation artificielle de la susceptibilité d'effondrement de la craie séno-turonienne par une sous-représentation des événements qui y sont associés, il est décidé de conserver les effondrements d'origine indéterminée pour la suite de l'étude.

Néanmoins, afin de vérifier l'influence de ce choix sur les résultats, les calculs de susceptibilité seront par la suite réalisés systématiquement sur un jeu de données comportant les effondrements d'origine naturelle seuls et sur un autre jeu de données comportant les effondrements d'origine naturelle et indéterminée.

A l'issue des différentes phases de sélection des données, le catalogue d'événements retenus comporte 4 818 événements (4 197 d'origine naturelle + 621 d'origine indéterminée).

a



b

Géologie

- SOCL
- GTRI
- DOLI
- KIOX
- MKIM
- CJUR
- IALB
- SALB
- ICEN
- SCEN
- ICRA
- CRAI
- IBEA
- CABE
- RECO
- ALLU

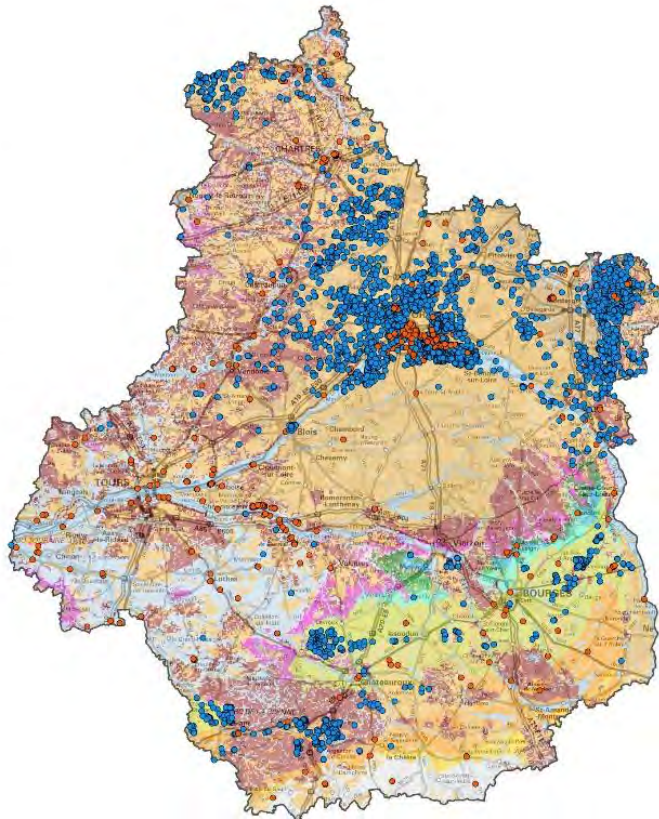


Illustration 27 : Répartition des événements selon leur origine naturelle ou indéterminée.

5.1.2. Représentativité de l'inventaire

Le catalogue d'événements constitué à l'issue des différentes phases de sélection décrites dans les paragraphes précédents est issu de sources de données dont la répartition spatiale et la qualité est hétérogène. L'illustration 28 représente les emprises concernées par les principaux inventaires des mouvements de terrains réalisés sur des secteurs géographiques spécifiques et pris en compte dans l'étude.

Le département du Loiret, et le val d'Orléans en particulier, a historiquement fait l'objet d'un effort de recensement important en raison notamment de la concentration importante des enjeux sur ce secteur. Plusieurs sources de données ciblées sur la région orléanaise ont été intégrées au catalogue d'événements, soit directement (Noury, et al., 2017), soit par l'intermédiaire de l'inventaire départemental des mouvements de terrain (par exemple Donsimoni, et al., 2008). Si le département du Loiret est indéniablement soumis à de nombreux effondrements, on peut cependant supposer une surreprésentation des événements pour ce département dans le catalogue (Illustration 28).

De même, un certain nombre d'effondrements provenant de la base de données nationale des mouvements de terrain est issu de morphologies karstiques (gouffres, dolines) reportées sur les cartes géologiques au 1/50 000. L'exhaustivité de ces informations est variable selon les coupures de la carte géologique, introduisant là encore une hétérogénéité de répartition spatiale des observations.

A l'inverse, dans certains départements tels que l'Eure-et-Loir et l'Indre-et-Loire, une proportion significative des communes sollicitées lors de la réalisation des inventaires départementaux n'a pas répondu (Illustration 28). Cette absence de réponse, si elle n'empêche pas totalement de collecter des données sur ces territoires via d'autres sources, réduit cependant la représentativité de l'inventaire pour ces départements.

Ce constat démontre la nécessité d'adopter une méthode de cartographie de la susceptibilité d'effondrement permettant de pallier cette hétérogénéité de répartition spatiale des événements.

Inventaires locaux

-  Giot et al 2003
-  Noury et al 2017
-  Donsimoni et al 2008
-  Perrin et al 2013
-  Cerema 2016

**Communes ayant répondu
aux enquêtes des
inventaires départementaux**

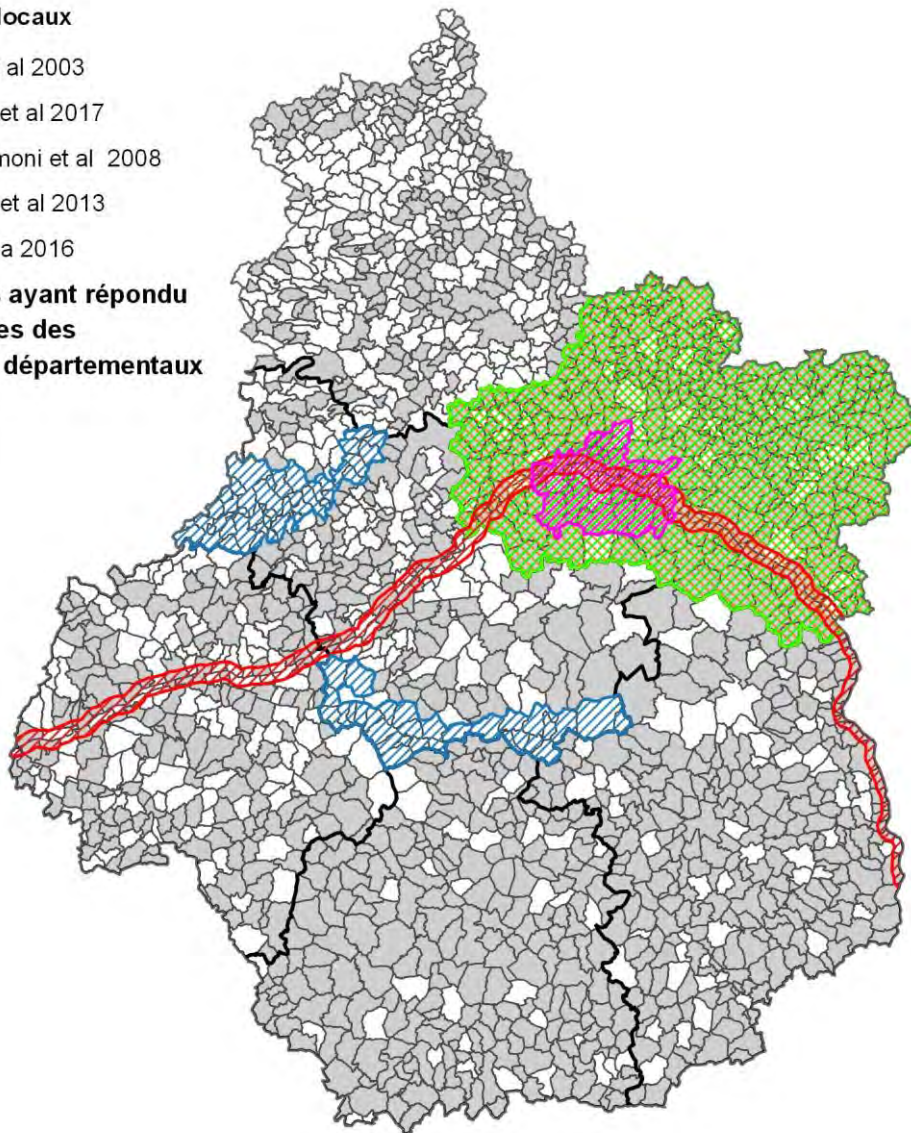


Illustration 28 : Emprise des inventaires des mouvements de terrain localisés sur des secteurs spécifiques et communes ayant répondu aux enquêtes menées dans le cadre des inventaires départementaux des mouvements de terrain.

5.2. SELECTION DES CRITERES EXPLICATIFS DE L'EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES

5.2.1. Identification des facteurs de prédisposition

La démarche de cartographie de la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique s'appuie sur l'identification de critères explicatifs cartographiables sur l'ensemble de l'emprise étudiée, de façon à extrapoler la connaissance du phénomène sur les zones où les données d'inventaire manquent. Les différents critères explicatifs sont identifiés, dans un premier temps, sur la base d'une recherche bibliographique et sur l'analyse des données d'inventaire. Dans un second temps, une sélection des critères exploitables dans le cadre de l'étude est effectuée en fonction des données disponibles et cartographiées à une échelle adaptée sur l'ensemble du territoire régional.

D'après la littérature (Waltham, 2008; Perrin, et al., 2013), les mouvements de terrain liés au karst les plus répandus sont les dolines de soutirage. Celles-ci se forment au droit d'une cavité préexistante dans la formation karstique sous-jacente par le soutirage des matériaux de la couverture vers les vides karstiques (Alboresha, 2016). La propension de ces vides créés au sein de la couverture à évoluer et atteindre la surface est conditionnée par les caractéristiques géomécaniques (cohésion) de la formation de couverture et par son épaisseur (Donsimoni, et al., 2008; Perrin, et al., 2013; Perrin, et al., 2015; Alboresha, 2016). Les vides initiés à la base de couvertures de faible cohésion ne sont pas stables et tendent à évoluer vers des dolines de suffosion (subsidence suffosion sinkhole sur l'illustration 2). A l'inverse, dans le cas d'une couverture cohésive, la cloche de vide peut acquérir une forme stable. La taille de cette cloche stable est dépendante de la largeur du vide karstique sous-jacent (Alboresha, 2016) qui, elle-même, peut-être reliée au degré de maturité du karst. L'existence d'un vide au sein d'une couverture cohésive peut aboutir à l'effondrement brutal des terrains qui subsistent entre le vide et la surface (subsidence dropout sinkhole sur l'illustration 2). L'occurrence de ce type de phénomène est dépendante notamment de l'épaisseur des terrains subsistant entre la cloche de vide et la surface.

A ces caractéristiques géométriques et mécaniques de la couverture s'ajoutent des critères d'ordre hydrodynamiques. Il ressort en effet de l'analyse bibliographique que les variations piézométriques des nappes d'eau souterraines au sein des formations karstiques et de leur couverture constituent un facteur prédominant d'apparition et d'évolution de vides de soutirage au sein de la couverture (Donsimoni, et al., 2008; Waltham, 2008; Perrin, et al., 2013; Perrin, et al., 2015; Perrin, et al., 2016). Plus particulièrement, l'apparition d'un fontis est favorisée par un abaissement brutal du niveau de la nappe jusqu'en dessous du niveau du toit de la formation karstique. Cet abaissement rapide crée une circulation d'eau verticale favorisant le soutirage de matériaux vers le karst. Dans le cas d'un karst sous couverture alluviale et en présence d'une nappe alluviale en connexion avec le cours d'eau, un contraste de diffusivité entre l'aquifère alluvial et l'aquifère karstique peut entraîner un déphasage des variations piézométriques dans les deux aquifères. Un gradient hydraulique se crée alors entre le karst et sa couverture et favorise le phénomène de soutirage (Donsimoni, et al., 2008; Perrin, et al., 2016). L'existence de zones d'infiltrations privilégiées vers le karst, où l'eau s'écoule à travers la couverture à des vitesses importantes, tend à produire des effets similaires. Des processus comparables entrent en jeu lors d'inondations par ruissellement : la lame d'eau accumulée en surface s'infiltré au travers des terrains de couverture vers la nappe karstique qui reste à un niveau bas. La surcharge créée par la lame d'eau en surface et la circulation d'eau verticale au travers de la couverture favorise là encore le soutirage vers le karst ou le débouillage de conduits colmatés (Noury, et al., 2018).

Dans une moindre mesure, les autres facteurs influençant l'occurrence de désordres d'origine karstique mis en évidence dans la littérature sont la présence de failles/fractures et l'occupation du sol notamment.

Les principaux critères à prendre en compte pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique sont donc :

- des critères d'ordre géologique :
 - o présence d'une couverture et épaisseur de celle-ci ;
 - o caractéristiques mécaniques de la couverture ;
 - o caractéristiques hydrodynamiques de la couverture ;
 - o maturité du karst apportant une information sur les dimensions des vides ;
- des critères d'ordre hydrogéologique :
 - o position de la nappe d'eau souterraine par rapport au toit de la formation karstique et à sa couverture ;
 - o amplitude et vitesse de variation du niveau de la nappe ;
 - o existence de zones d'infiltration préférentielles.

5.2.2. Données disponibles

L'objectif de l'étude étant d'évaluer la susceptibilité d'effondrement de cavités karstiques à l'échelle de la région Centre-Val de Loire sur la base des données existantes, aucune production de donnée nouvelle spécifique n'est prévue pour cette étude. La seconde étape de sélection des critères explicatifs pris en compte pour l'évaluation de la susceptibilité consiste donc à identifier les données disponibles permettant la cartographie de ces critères sur le territoire régional à une échelle appropriée.

En fonction de facteurs de prédisposition mis en évidence précédemment, les sources de données suivantes ont été identifiées :

- le modèle géologique 3D produit dans le cadre du projet SIGES³ Centre ;
- la carte d'épaisseur de la zone non saturée produite par le BRGM pour l'évaluation du risque d'inondation par remontée de nappe (Allier, et al., 2011) ;
- la carte de l'Indice Développement et de Persistance des Réseaux (Mardhel, et al., 2004).

Ces différentes sources de données sont décrites dans les paragraphes suivants.

a) Modèle géologique 3D

Le modèle géologique 3D réalisé dans le cadre du projet SIGES Centre en 2012 modélise les principaux aquifères présents sur la région Centre-Val de Loire.

Les aquifères modélisés sont :

- l'ensemble calcaire oligocène de Beauce – Sables de Fontainebleau ;
- la craie séno-turonienne ;
- les sables cénomaniens ;
- les sables albiens ;
- les calcaires du Jurassique supérieur.

³ Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines - <http://sigescen.brgm.fr>

De ce fait, la pile stratigraphique modélisée est celle présentée sur l'illustration 29.

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
ALLU		Alluvions		F16
RECO	EROD	Recouvrement Plio-Quat	B16	F15
CABE	EROD	Calcaires de Beauce	B15	F14
IBEA		Sables et Argiles eocènes	T13	F13
CRAI	EROD	Craie du Séno-Turonien	B13	F12
ICRA		Marnes du Séno-Turonien	T11	F11
SCEN		Sables du Cénomaniens	T10	F10
ICEN	EROD	Marnes Cénom et Argiles albien	B10	F09
SALB		Sables de l'Albien	T08	F08
IALB	EROD	Aptien à Tithonien	B08	F07
CJUR		Calcaires du J. sup	T06	F06
MKIM		Marnes Kimmeridgien	T05	F05
KIOX		Calcaires Kim-Oxf	T04	F04
DOLI		Marnes Calcaires Dogger-Lias	T03	F03
GTRI	EROD	Grès du Trias	B03	F02
SOCL	EROD	Socle	B02	F01

Illustration 29 : Pile stratigraphique modélisée dans le cadre du modèle SIGES Centre

Le modèle géologique est issu d'un calcul par interpolation à partir de données d'entrées existantes sur la zone à modéliser. Ces données d'entrée sont :

- le modèle numérique de terrain au pas de 50 m d'origine IGN ;
- 13 359 forages issus de la base de données des forages validés de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), gérée par le BRGM ;
- une carte géologique harmonisée à l'échelle de la région, réalisée à partir des cartes harmonisées départementales et des cartes géologiques au 1/50 000 ;
- trois jeux de failles issues des cartes géologiques et des modèles sismiques du Bassin de Paris concernant les formations tertiaires, les formations crétacées et les formations ante-crétacées.

Il apparaît que les sondages disponibles fournissent une bonne densité d'information jusqu'au toit de la craie séno-turonienne. Pour les couches inférieures, la densité de forages les traversant devient hétérogène. Cette plus faible densité n'empêche pas le calcul si on prend une grande distance de rayon d'interpolation mais on génère alors un modèle avec de nombreux artefacts qui entachent la fiabilité du résultat, augmentés par la prise en compte des failles.

Inversement, quand il y a beaucoup d'informations disponibles, on génère une surface irrégulière car on prend en compte toutes les variations locales d'épaisseurs et/ou d'observations et/ou d'interprétation.

Les calculs d'interpolation ont été réalisés au moyen du logiciel GDM-Multilayer, développé par le BRGM. Les paramètres de calculs sont les suivants :

- maille finale du modèle : 500 m ;
- voisinage rectangulaire variable de 40 km pour les calcaires de Beauce, 60 km pour la craie, 80 km pour les sables cénomaniens, 100 km pour les sables albiens, et 150 km pour le toit du Trias. Ce rayon variable est imposé pour la densité fortement décroissante de forages en profondeur ;
- seuil de fusion de variable : de 50 à 100 m ;
- méthode d'interpolation : krigeage linéaire sans dérive.

Le modèle, une fois calculé, permet de connaître en tout point de la grille la cote de chacune des interfaces modélisées.

Pour la cartographie de susceptibilité d'effondrement, les informations suivantes ont été exportées depuis le modèle sous forme de couches raster à la résolution de 500 m pour chaque formation modélisée :

- altitude du toit de la formation ;
- altitude du mur de la formation ;
- épaisseur de la formation.

Le modèle géologique ayant été construit dans le système de coordonnées NTF/Lambert 2, les couches raster exportées ont été reprojétées dans le système RGF93/Lambert 93 avant utilisation.

b) Epaisseur de la zone non saturée

En 2011, le Ministère de l'Ecologie a mandaté le BRGM pour la réalisation d'une évaluation préliminaire du risque inondation par remontée de nappes (Allier, et al., 2011). Dans le cadre de ce projet, une cartographie de l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) a été élaborée pour l'ensemble du territoire métropolitain.

Les données d'entrées utilisées pour l'élaboration de cette cartographie sont :

- 131 820 ouvrages référencés comme points d'eau dans la BSS ;
- les chroniques piézométriques de 3 900 piézomètres référencés dans la base de données ADES (Accès aux Données des Eaux Souterraines) ;
- des cartes piézométriques, sélectionnées et combinées afin de calculer une carte de synthèse représentant l'état de la nappe en conditions de « moyennes eaux ».

Afin de densifier les points issus d'ADES et de la BSS, et de ce fait de contraindre au mieux l'interpolation des données, des points de calage ont été placés le long des isopièzes des cartes piézométriques ainsi que le long des cours d'eau et des plans d'eau qui sont considérés comme des points d'affleurement de la nappe.

Ces points ont été interpolés par la méthode de pondération par l'inverse de la distance pour établir une carte de la profondeur moyenne de la nappe (ou épaisseur de la ZNS) à une résolution de 100 m pour l'ensemble de la France Métropolitaine (Illustration 30).

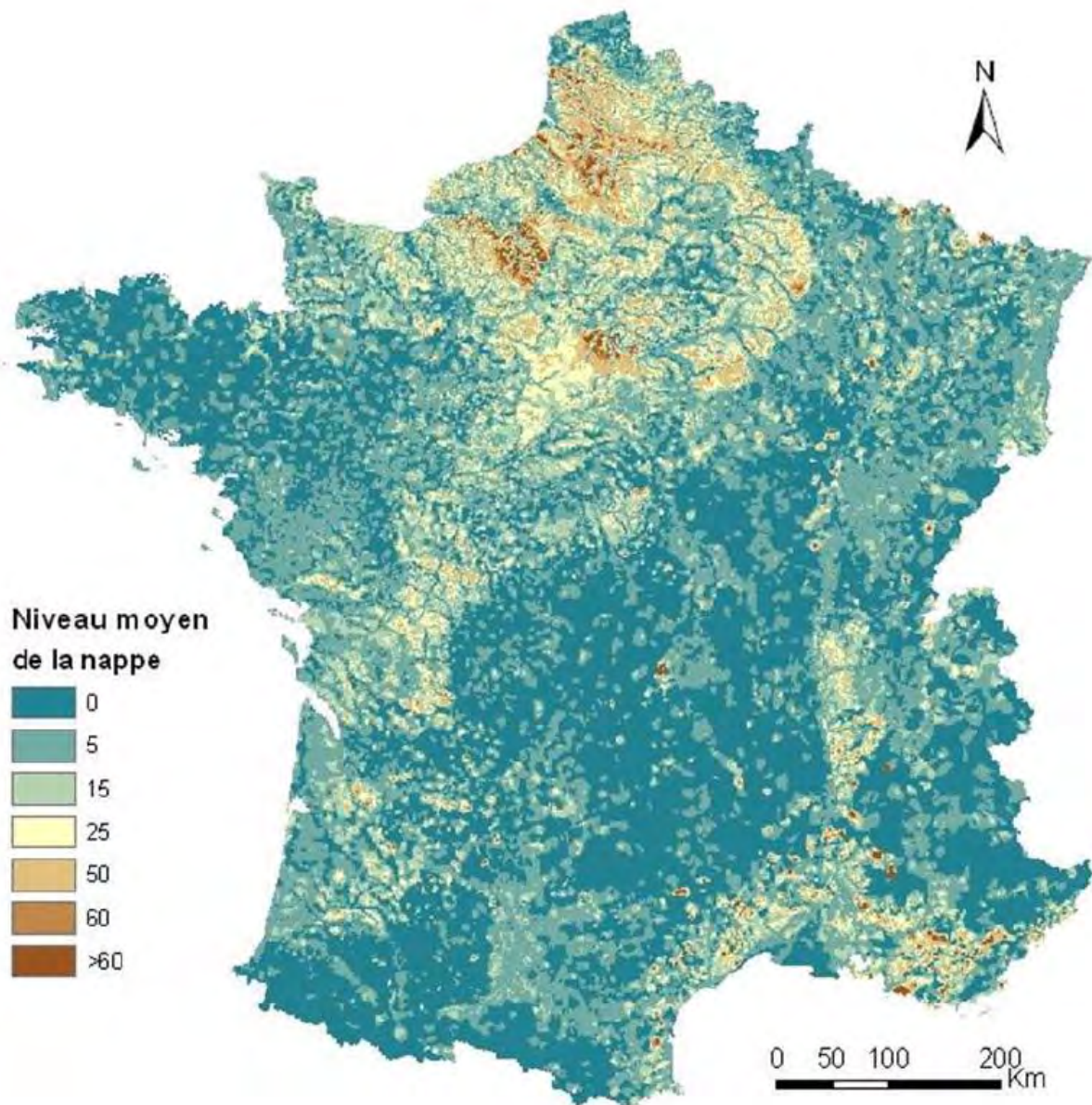


Illustration 30 : Carte de la profondeur moyenne de la nappe (Allier, et al., 2011)

Pour les besoins de l'étude, la couche raster d'épaisseur de la ZNS, découpée sur l'emprise de la région Centre-Val de Loire, a été soustraite au MNT BDAlti à la résolution de 25 m de l'IGN. La couche résultante correspond à un niveau moyen de la nappe dans un référentiel altimétrique NGF comparable avec les données issues du modèle géologique 3D.

c) Indice de Développement et de Persistance des Réseaux

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) a été créé par le BRGM (Mardhel, et al., 2004) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoriques. L'eau qui n'est pas réémise vers l'atmosphère par évapotranspiration peut quitter son bassin versant de deux manières distinctes :

- elle ruisselle à la surface, se concentre dans le réseau hydrographique superficiel et quitte le bassin versant par un exutoire en surface ;

- elle s'infiltré dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère et quitte ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau hydrographique.

L'idée qui sous-tend l'IDPR découle de l'observation suivante : l'organisation du réseau hydrographique en surface est dépendante des formations géologiques qui le supportent. En effet, la densité de drainage est un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin constitué de matériaux très perméables favorisera préférentiellement l'infiltration au détriment du ruissellement et aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé d'un substratum imperméable présentera souvent un réseau de drainage développé.

Le calcul de l'IDPR est basé sur la comparaison d'un réseau hydrographique théorique, calculé le long des talwegs à partir du MNT BDALTI à 25 m de l'IGN, avec le réseau hydrographique réel provenant de la composante hydrographie de la BDTOPO. Concrètement, pour chaque point du territoire étudié, l'IDPR correspond au rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé. L'indice présente donc une métrologie de l'écart constaté entre réseaux hydrographiques théoriques et réels (Illustration 31).

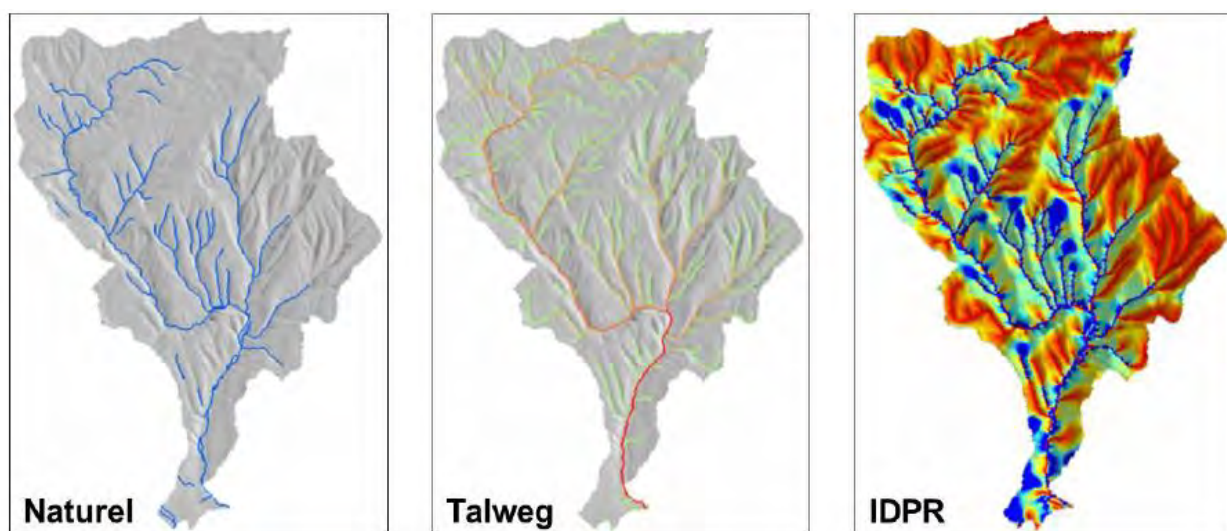


Illustration 31 : Principe de calcul de l'IDPR.

Les valeurs calculées sont arbitrairement rapportées à une gamme variant de 0 à 2 000 dont l'interprétation peut se faire selon la grille de lecture présentée par le tableau de l'illustration 32.

L'IDPR, calculé sur l'ensemble de la France métropolitaine, est fourni sous la forme d'une grille raster au pas de 25 m (Illustration 33).

L'IDPR constitue donc un indice intégrateur des caractéristiques de la formation karstique et de sa couverture. Les valeurs d'IDPR inférieures à 1 000, associées à des zones d'infiltration préférentielle, doivent permettre de mettre en évidence les secteurs karstiques sous couverture perméable où l'eau peut circuler verticalement, favorisant ainsi l'apparition de fontis. L'IDPR constitue donc *a priori* un critère explicatif indirect de la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique.

IDPR	Interprétation	
< 1 000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talwegs de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
= 1 000	Infiltration et ruissellement de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques en place.
> 1 000	Ruissellement majoritaire par rapport à l'infiltration	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci ne soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
> 2 000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Un IDPR supérieur ou égal à 2 000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est peu épaisse, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltré pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus profonde, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2 000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides induisant le possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Illustration 32 : Grille d'interprétation de l'IDPR.

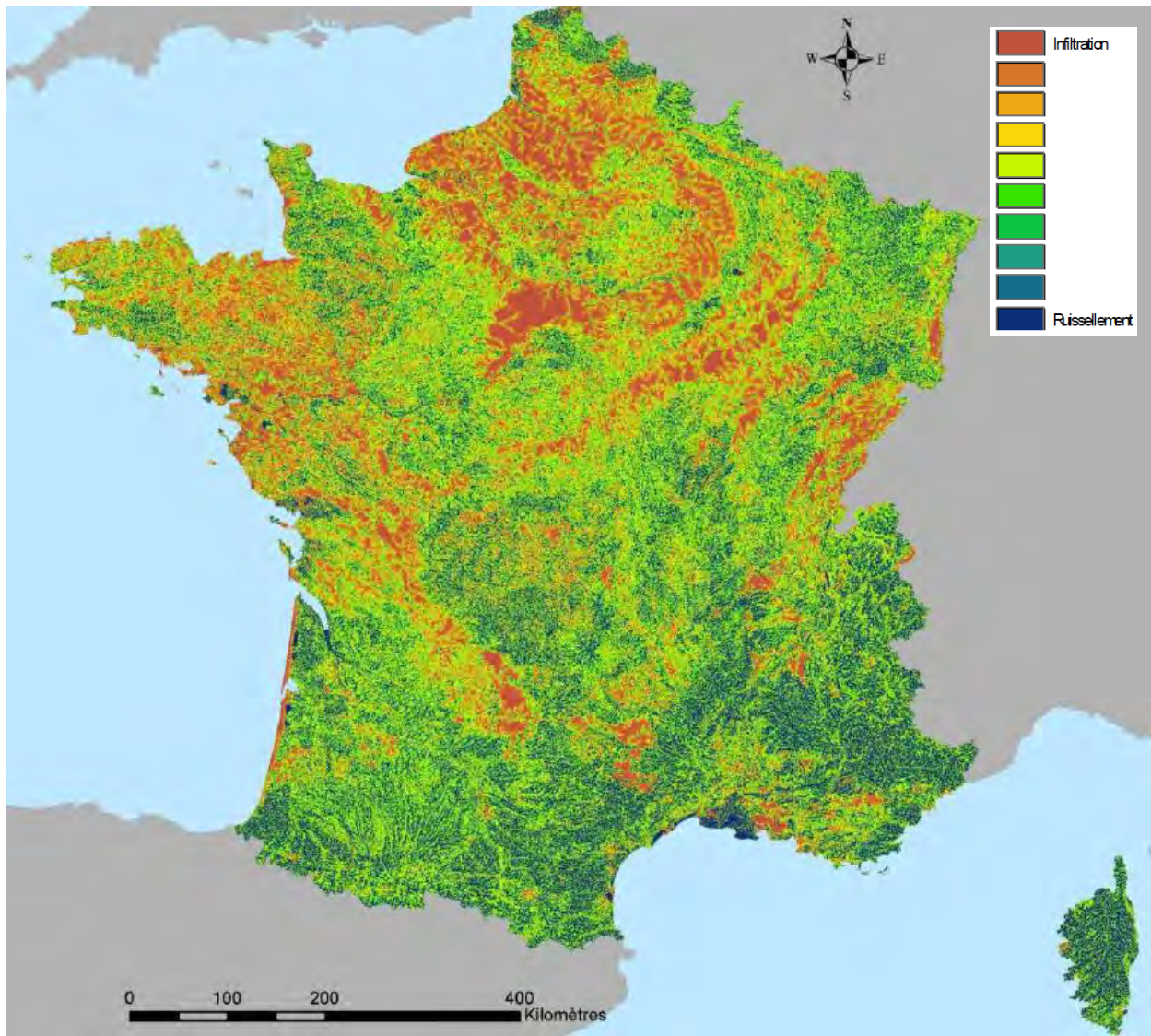


Illustration 33 : IDPR calculé pour la France métropolitaine.

5.2.3. Critères explicatifs retenus

En fonction des facteurs de prédisposition à l'effondrement identifiés au chapitre 5.2.1 et des données existantes décrites au chapitre 5.2.2, les critères explicatifs retenus pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement sont listés dans le tableau de l'illustration 34.

Critère	Type de critère	Données sources
Nature de la formation karstique	Qualitatif	Modèle géologique SIGES Centre
Existence d'une couverture	Qualitatif	
Epaisseur de la formation karstique	Quantitatif	
Epaisseur de recouvrement	Quantitatif	
Position moyenne de la nappe par rapport au toit du karst	Quantitatif	Epaisseur moyenne de la ZNS BDALTI
IDPR	Quantitatif	IDPR

Illustration 34 : Critères explicatifs retenus pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

5.3. EVALUATION DU POIDS DES CRITERES RETENUS DANS LA SUCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES

Le niveau de susceptibilité est évalué par la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables ou défavorables (critères explicatifs). La pertinence de ces facteurs est analysée en les confrontant aux données recensées. Les critères explicatifs envisageables pour la susceptibilité d'effondrement liée à des cavités karstiques ont été présentés au chapitre 5.2.

Les critères retenus pour expliquer l'occurrence d'effondrements associés à des cavités naturelles sont :

- la nature lithologique de la formation à laquelle est associée l'effondrement et l'existence d'une formation de couverture ;
- l'épaisseur de la formation karstique ;
- l'épaisseur de recouvrement ;
- la position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation karstique ;
- l'IDPR.

Les paragraphes suivants décrivent la démarche de calcul de la note de susceptibilité associée à chacun des critères retenus.

5.3.1. Critère « géologie » : nature de la formation karstique et présence d'une formation de couverture

L'évaluation de ce critère consiste dans un premier temps à associer chacun des événements recensés sur le territoire étudié à une formation potentiellement karstique. En un point donné du territoire, un effondrement peut théoriquement être dû à une cavité développée dans n'importe quelle formation sous-jacente. En l'absence d'informations sur la formation comportant la cavité à l'origine du désordre, l'hypothèse suivante est formulée : un effondrement est associé à la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface à l'endroit où il se produit.

La sensibilité à la dissolution des différentes formations a été déterminée dans le cadre de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014). Cette classification est reprise dans le tableau de l'illustration 35.

Code formation	Description	Sensibilité à la dissolution
ALLU	Alluvions	Nulle à faible
RECO	Recouvrement Plio-Quaternaire	Nulle à faible
CABE	Calcaires de Beauce	Moyenne à forte
IBEA	Sables et argiles éocènes	Nulle à faible
CRAI	Craie du Séno-Turonien	Moyenne à forte
ICRA	Marnes du Séno-Turonien	Moyenne
SCEN	Sables du Cénomanién	Nulle à faible
ICEN	Marnes du Cénomanién et argiles de l'Albien	Nulle à faible
SALB	Sables de l'Albien	Nulle à faible
IALB	Aptien à Tithonien	Moyenne
CJUR	Calcaires du Jurassique supérieur	Moyenne à forte
MKIM	Marnes du Kimméridgien	Nulle à faible
KIOX	Calcaires du Kimméridgien et Oxfordien	Moyenne à forte
DOLI	Marnes calcaires du Dogger-Lias	Moyenne
GTRI	Grès du Trias	Nulle à faible
SOCL	Socle	Nulle à faible

Illustration 35 : Sensibilité à la dissolution des différentes couches du modèle géologique (Vanoudheusden, 2014).

Les formations géologiques dont la classe de sensibilité à la dissolution est moyenne ou moyenne à forte sont jugées susceptibles de renfermer des cavités à l'origine d'effondrements.

Lorsque les données d'inventaire sont suffisamment nombreuses (CABE, CRAI), une distinction est faite entre les zones où la formation est à l'affleurement, les zones où la formation est sous couverture alluviale, et les zones où la formation est sous couverture autre qu'alluviale. La nature de la formation de couverture considérée correspond à la formation immédiatement sus-jacente à la formation karstique. Pour les formations où les données d'inventaire sont moins nombreuses (KIOX, DOLI), seule la distinction « à l'affleurement » ou « sous couverture » a été considérée. Enfin pour les formations ICRA, IALB, et CJUR, aucune distinction en fonction du caractère nu ou sous couverture de la formation n'a été faite.

La cartographie des unités géologiques retenues pour le calcul des densités d'effondrements est présentée sur l'illustration 36.

**Formations karstiques
et recouvrement pris en compte**

- CABE sous couverture alluviale
- CABE sous couverture quaternaire
- CABE nu
- CRAI sous couverture alluviale
- CRAI sous couverture autre
- CRAI nu
- ICRA
- IALB
- CJUR
- KIOX sous couverture
- KIOX nu
- DOLI sous couverture
- DOLI nu

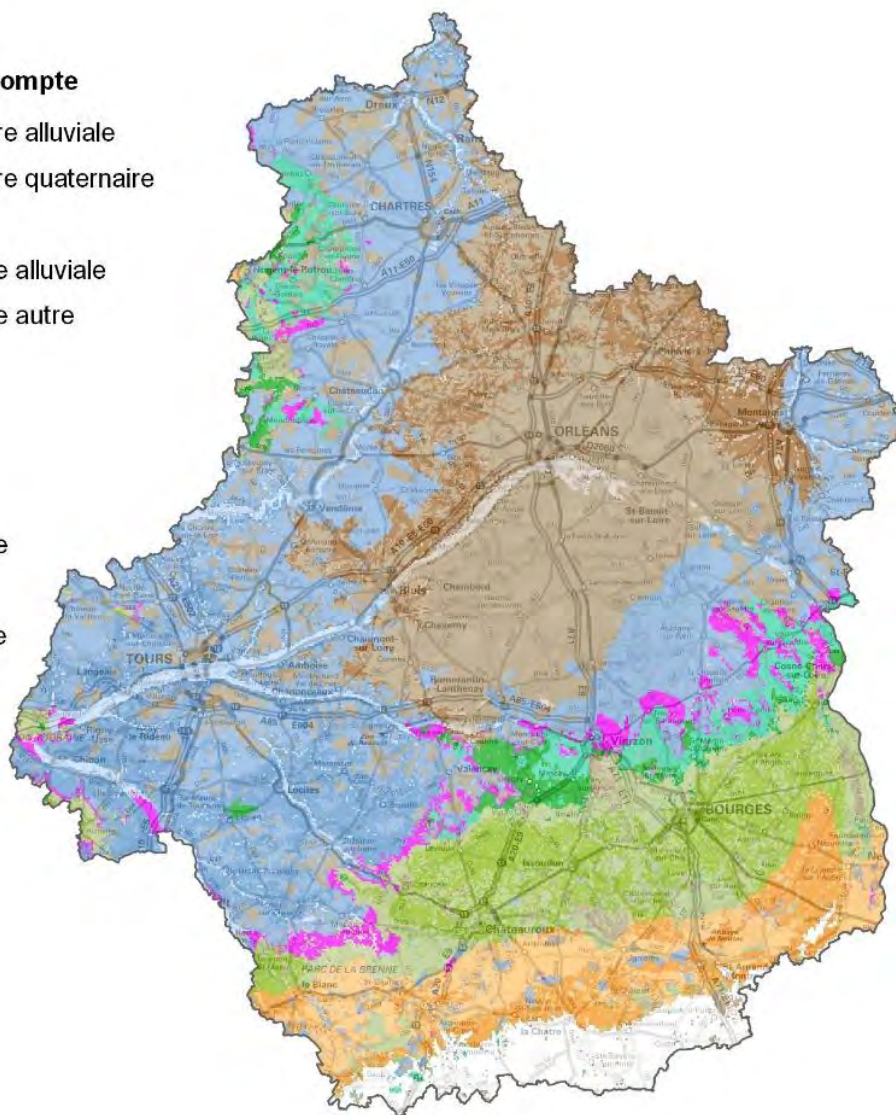


Illustration 36 : Unités spatiales géologiques prises en compte pour le calcul de susceptibilité d'effondrement.

Pour chaque unité géologique (formation karstique + couverture éventuelle), une densité d'effondrements est calculée selon la méthode décrite au paragraphe 2.2.2. Les résultats de ce calcul sont reportés dans le tableau de l'illustration 37.

Les densités d'effondrements calculées pour les différentes formations montrent une très large prédominance des effondrements associés aux calcaires de Beauce sous couverture alluviale (densité d'effondrements > 8). Ce contexte correspond essentiellement à la plaine alluviale de la Loire dans le Val d'Orléans. Cette zone, effectivement soumise à des effondrements karstiques fréquents, a fait l'objet d'un effort particulier de recensement des événements et plusieurs études ciblées sur le Val d'Orléans ou ses abords ont été prises en compte dans les sources de données d'inventaire utilisées en entrée de la présente étude. Il est donc probable que le contexte « calcaire de Beauce sous couverture alluviale » bénéficie d'une surreprésentation dans le catalogue d'événements, tirant ainsi artificiellement la densité d'effondrements vers le haut. Afin de pallier cette surreprésentation de ce contexte, le poids de l'unité spatiale « calcaire de Beauce sous couverture alluviale » est fixé arbitrairement à 4.

Code formation	Description	Superficie (km ²)	Nombre d'effondrements recensés		Densité d'effondrements	
			Origine naturelle	Origine naturelle + indéterminée	Origine naturelle	Origine naturelle + indéterminée
CABE	Calcaires de Beauce	13894	2789	3167	1,91	1,67
	Sous couverture alluviale	614	519	605	8,05	8,19
	Sous couverture quaternaire	10716	1901	2147	1,69	1,66
	A l'affleurement	2565	369	415	1,37	1,34
CRAI	Craie du Séno-Turonien	14491	911	1093	0,60	0,52
	Sous couverture alluviale	933	18	48	0,18	0,43
	Sous couverture autre	10288	861	938	0,8	0,76
	A l'affleurement	3270	32	107	0,09	0,27
ICRA	Marnes du Séno-Turonien	965	4	4	0,04	0,03
IALB	Aptien à Tithonien	1415	19	28	0,13	0,16
CJUR	Calcaires du Jurassique supérieur	599	4	7	0,06	0,10
KIOX	Calcaires du Kimméridgien et Oxfordien	5356	303	335	0,54	0,47
	Sous couverture	2948	143	161	0,46	0,45
	A l'affleurement	2409	160	174	0,63	0,60
DOLI	Marnes calcaires du Dogger-Lias	3235	167	177	0,49	0,43
	Sous couverture	1894	111	116	0,56	0,51
	A l'affleurement	1341	56	61	0,40	0,38

Illustration 37 : Densités d'effondrements calculées pour chaque unité géologique.

L'illustration 38 présente les densités d'effondrements pour les différentes unités spatiales géologiques considérées calculées, d'une part, à partir de l'inventaire des effondrements d'origine naturelle avérée seuls et, d'autre part, à partir de l'inventaire incluant, en plus, les effondrements d'origine indéterminée. Le choix de conserver les événements d'origine indéterminée permet de densifier l'inventaire dans le département de l'Indre-et-Loire (principale zone d'affleurement de la craie séno-turonienne) en raison du faible nombre d'événements d'origine naturelle avérée recensés sur ce territoire (cf. chapitre 5.1.1). On constate à la lecture de l'illustration 38 que la prise en compte des événements d'origine indéterminée conduit à augmenter le poids des unités « craie séno-turonienne sous couverture alluviale » et « craie séno-turonienne à l'affleurement ». Pour les autres unités spatiales, les différences observées entre les poids calculés à partir des deux inventaires ne montrent pas d'écarts significatifs. Les poids calculés à partir de l'inventaire incluant les événements d'origine indéterminée seront donc conservés pour la suite de la démarche.

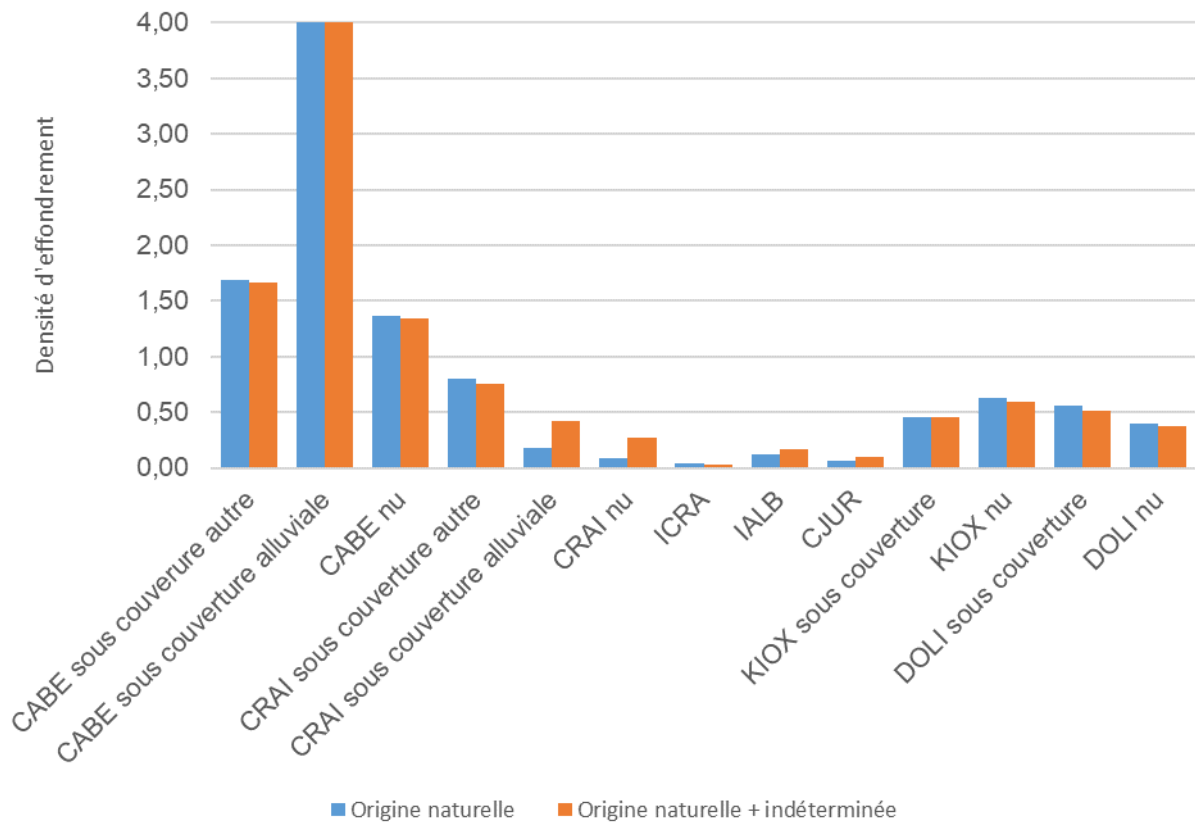


Illustration 38 : Densités d'effondrements des unités spatiales géologiques considérées pour les effondrements d'origine naturelle avérée seuls et pour les effondrements d'origine naturelle et d'origine indéterminée (la densité d'effondrement pour le calcaire de Beauce sous couverture alluviale a été arbitrairement limitée à 4).

L'illustration 39 présente la répartition des densités d'effondrement calculées pour le critère « nature lithologique ».

**Densité d'effondrement
en fonction du critère
"géologie"**

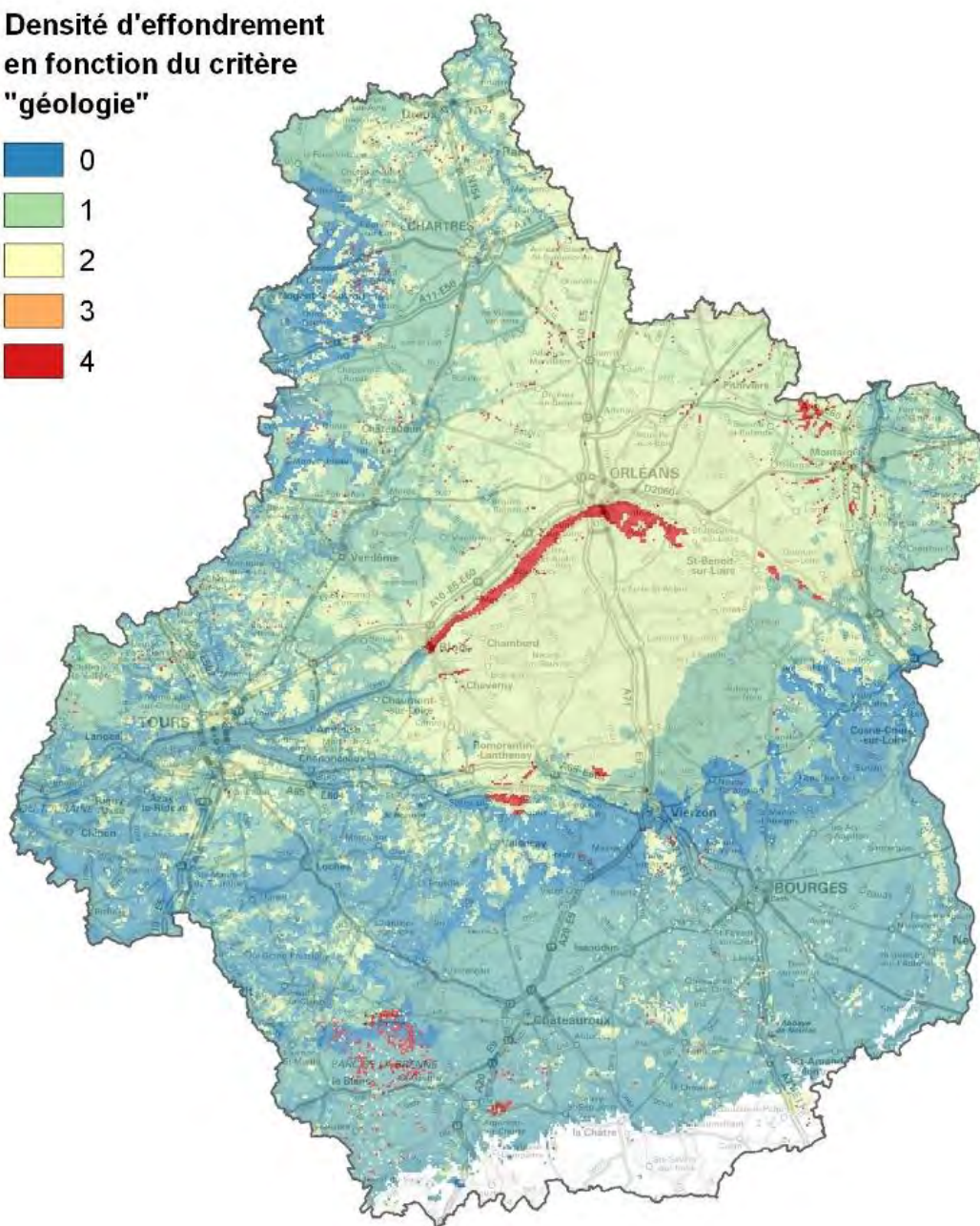
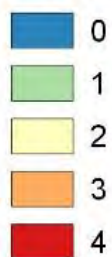


Illustration 39 : Densités d'effondrement calculées pour le critère « nature lithologique »

5.3.2. Critère « épaisseur de la formation karstique »

L'épaisseur des formations sensibles à la dissolution telles que définies au paragraphe précédent est cartographiée à partir du modèle géologique (Illustration 40).

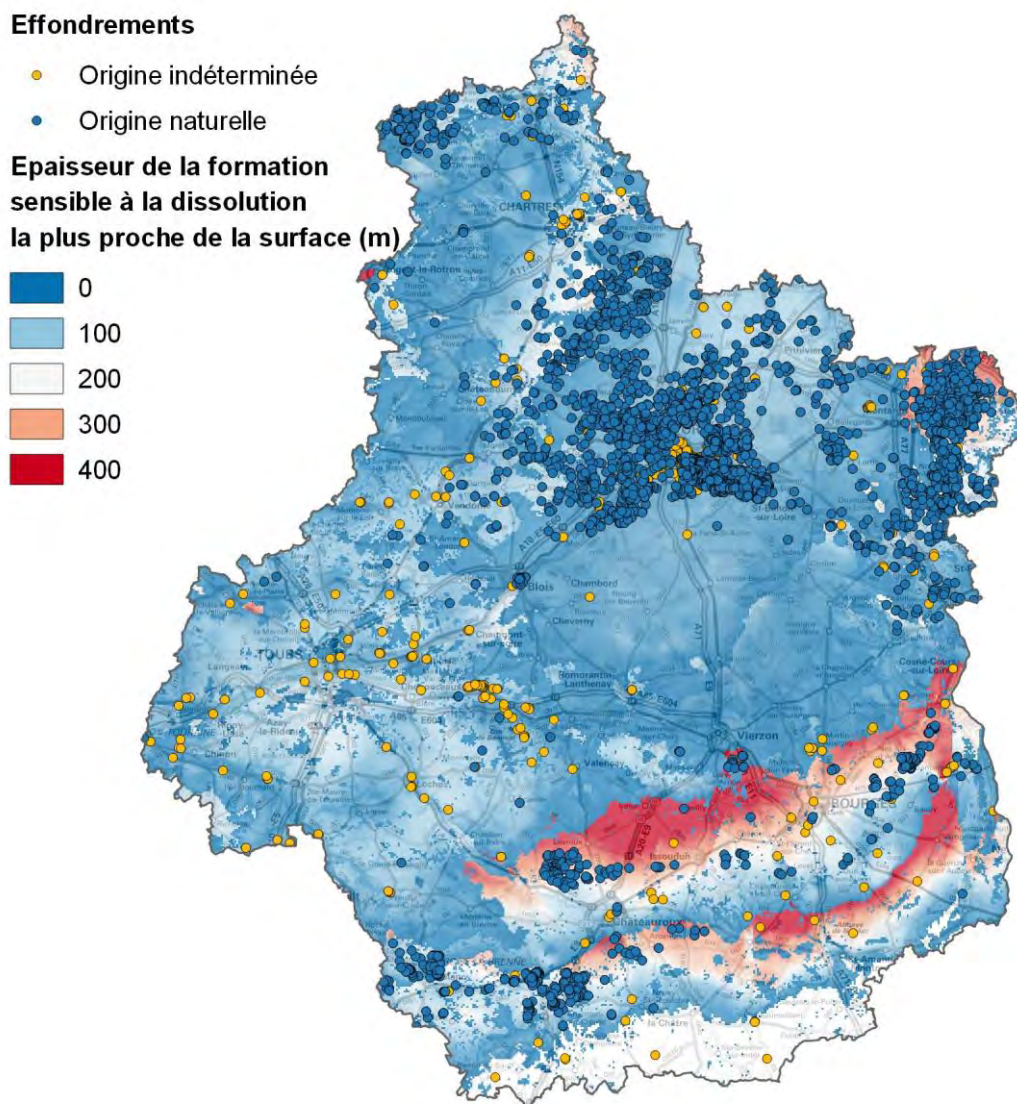


Illustration 40 : Epaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface et inventaire des effondrements.

L'analyse des données d'inventaire semble montrer, pour certaines formations, une relation entre l'épaisseur de la formation karstique et la répartition spatiale des effondrements. L'illustration 41 représente la densité d'effondrements recensés en fonction de l'épaisseur de la formation à laquelle ils sont associés pour les calcaires de Beauce (CABE), la craie séno-turonienne (CRAI), les calcaires du Kimméridgien et de l'Oxfordien (KIOX) et les marnes calcaires du Dogger-Lias (DOLI). Pour les autres formations sensibles à la dissolution, le nombre d'événements recensés est trop faible pour mener cette analyse. Le critère « épaisseur de la formation karstique » ne pourra pas être évalué pour ces formations.

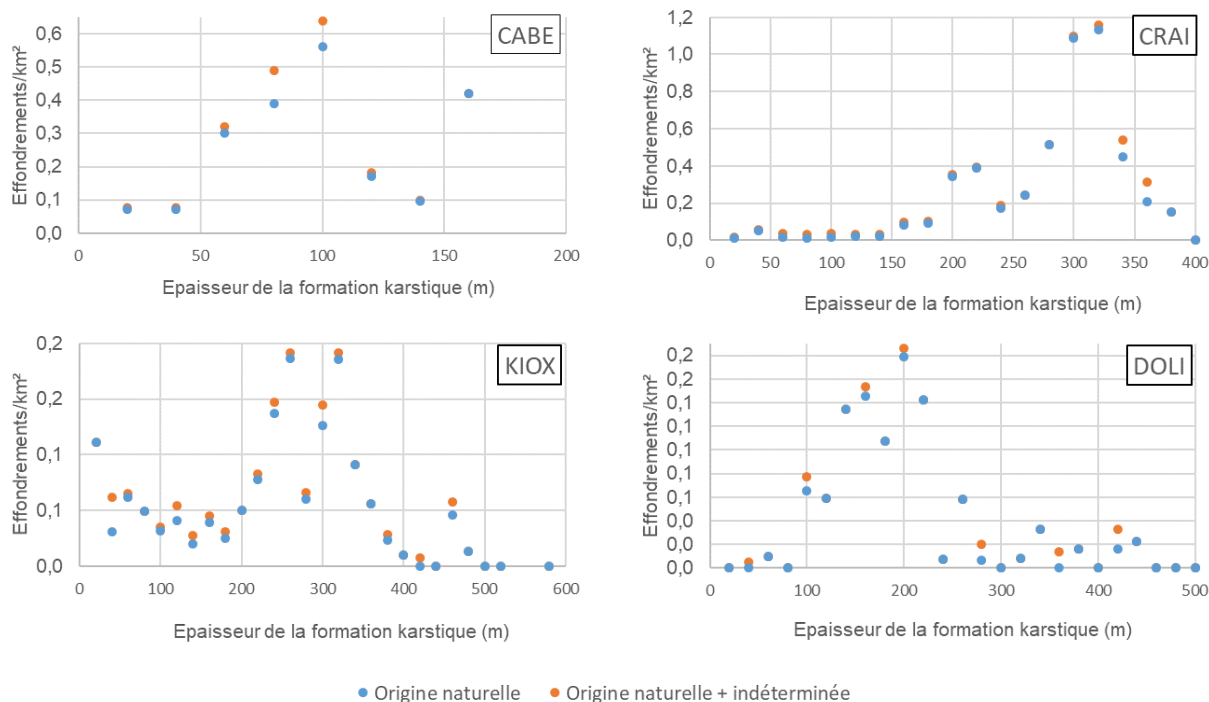


Illustration 41 : Densités d'effondrements en fonction de l'épaisseur de la formation karstique pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.

Pour chacune des formations considérées, la densité d'effondrements recensés est plus élevée sur une gamme d'épaisseur de la formation, variable selon la formation. Pour les calcaires de Beauce cette densité est maximale pour une épaisseur de 100 m, tandis que pour la craie sénonturonienne ou les calcaires kimméridgiens-oxfordiens elle est maximale pour une épaisseur d'environ 300 m. Pour les marnes calcaires du Dogger-Lias, cette densité maximale est observée pour une épaisseur d'environ 200 m. Les densités d'effondrements calculées à partir des inventaires d'effondrements d'origine naturelle seuls et des effondrements d'origine naturelle ou indéterminée ne montrent pas de disparités significatives, ce qui confirme le choix de conserver les effondrements d'origine indéterminée pour le calcul des poids d'appartenance.

Pour chacune de ces quatre formations, une fonction de possibilité traduisant la répartition des effondrements en fonction de l'épaisseur de la formation a été définie. Ces fonctions sont représentées sur l'illustration 42. La cartographie des poids d'appartenance calculés à partir des fonctions de possibilité est représentée sur l'illustration 43.

Afin de tenir compte de l'incertitude sur le choix des seuils des fonctions de possibilité définies par jugement d'expert, deux fonctions de possibilité supplémentaires sont proposées. Elles correspondent à des scénarii optimiste et pessimiste encadrant la fonction de possibilité paraissant la plus vraisemblable (Illustration 42). La différence entre les fonctions de possibilité pessimiste et optimiste permet de quantifier l'incertitude associée à la détermination du poids d'appartenance. Cette incertitude est traduite en niveaux de confiance associés à ce critère l'illustration 44.

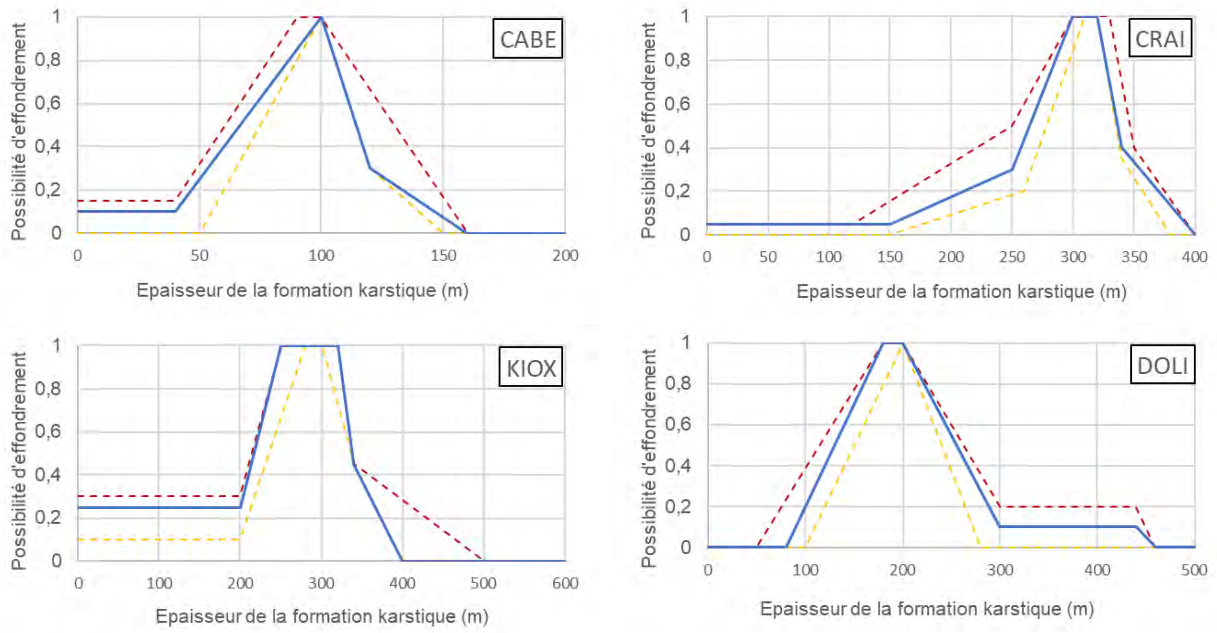


Illustration 42 : Poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface. Scenarii optimistes, pessimistes et retenus pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.

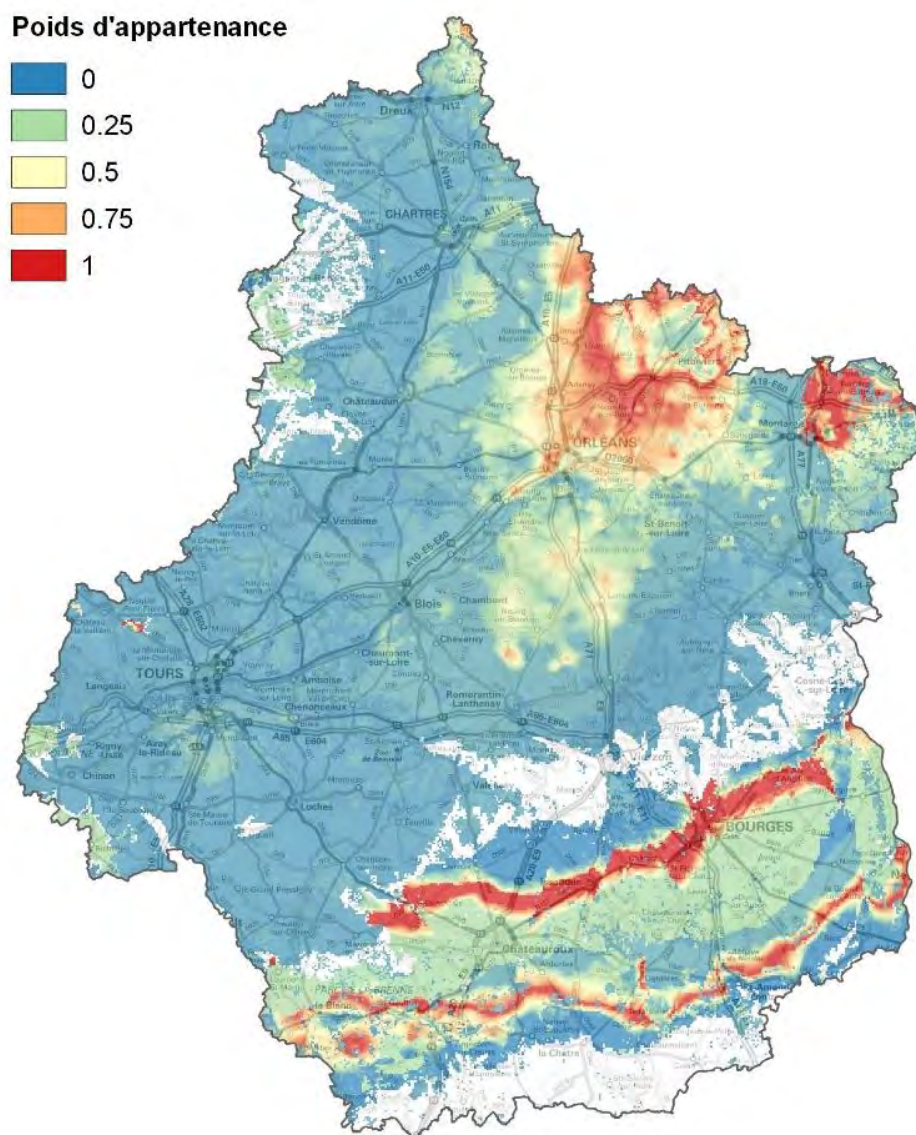


Illustration 43 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.

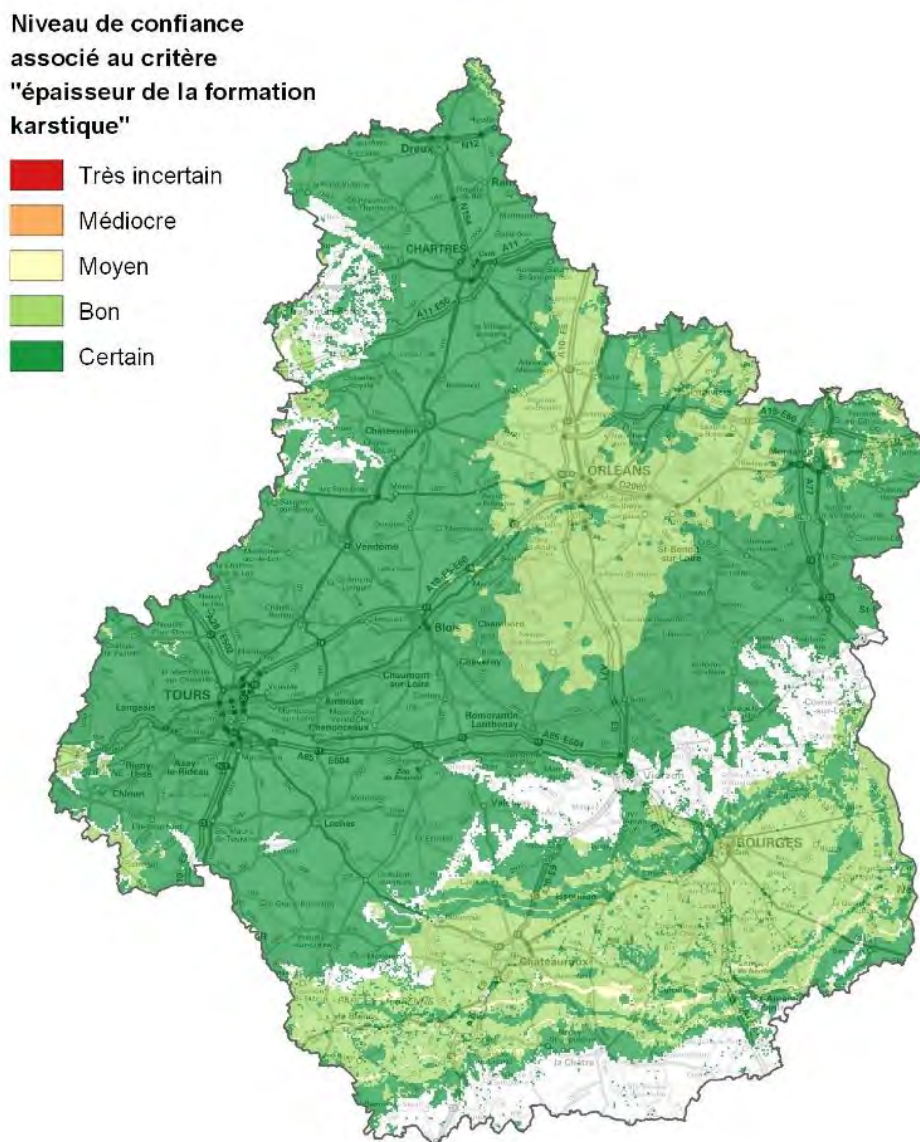


Illustration 44 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

5.3.3. Critère « épaisseur de recouvrement »

L'épaisseur de recouvrement est définie comme la somme des épaisseurs des formations situées au-dessus de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface. Les formations prises en compte dans le recouvrement sont donc toutes jugées insensibles à la dissolution. En région Centre-Val de Loire, les principales formations de couverture sont les alluvions (ALLU), les formations plio-quaternaires (RECO) et les sables et argiles éocènes (IBEA) pour le recouvrement de la craie séno-turonienne. Les épaisseurs de recouvrement calculées à partir du modèle géologique sont représentées sur l'illustration 45. L'analyse des données et la bibliographie tend à montrer qu'il existe une relation entre l'épaisseur de recouvrement et la possibilité d'effondrement.

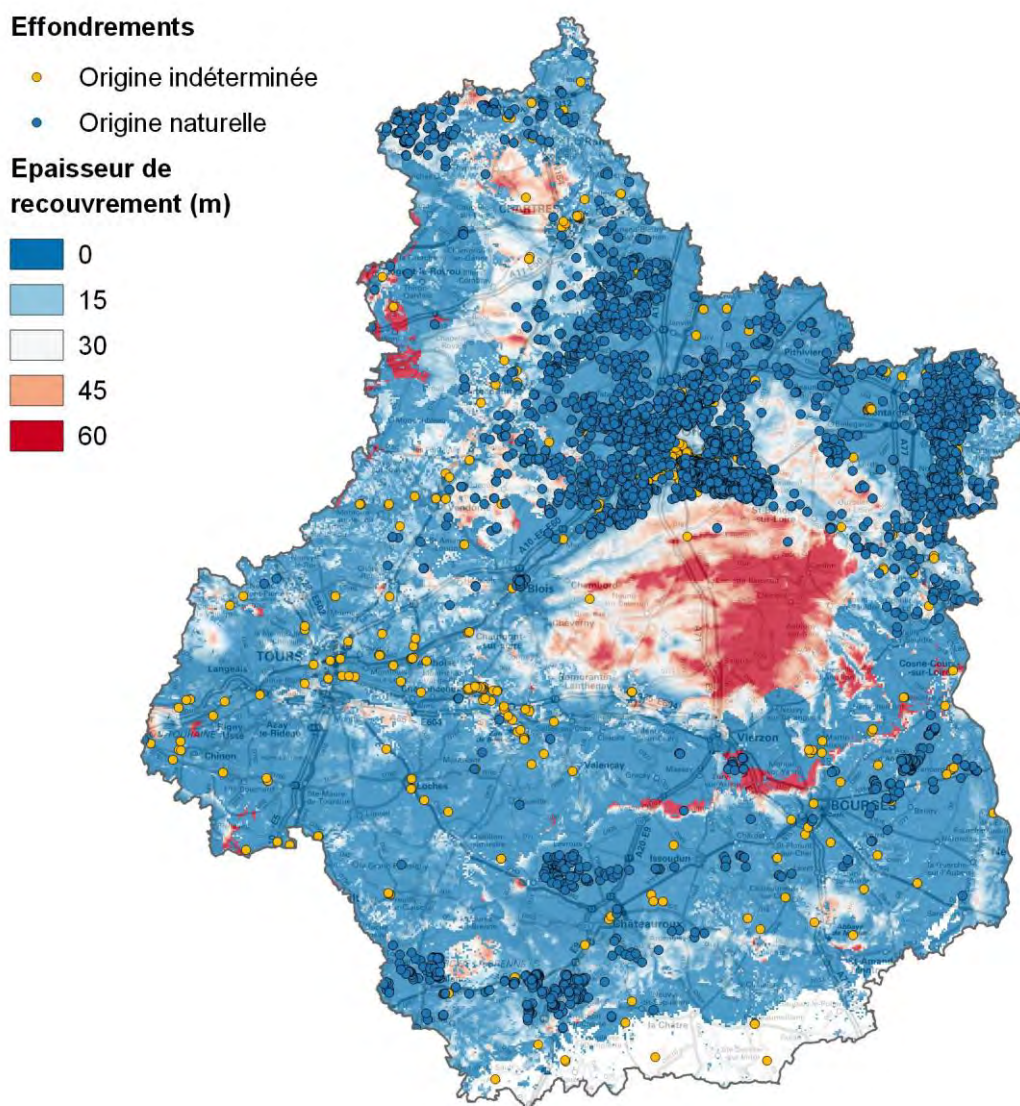


Illustration 45 : Épaisseur de la couverture située au dessus de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface et inventaire des effondrements.

L'illustration 46 représente la densité d'effondrements recensés en fonction de l'épaisseur de recouvrement pour les calcaires de Beauce (CABE), la craie séno-turonienne (CRAI), les calcaires du Kimméridgien et de l'Oxfordien (KIOX) et les marnes calcaires du Dogger-Lias (DOLI). Pour les autres formations sensibles à la dissolution, le nombre d'événements recensés est trop faible pour mener cette analyse. Le critère « épaisseur recouvrement » ne pourra pas être évalué pour ces formations.

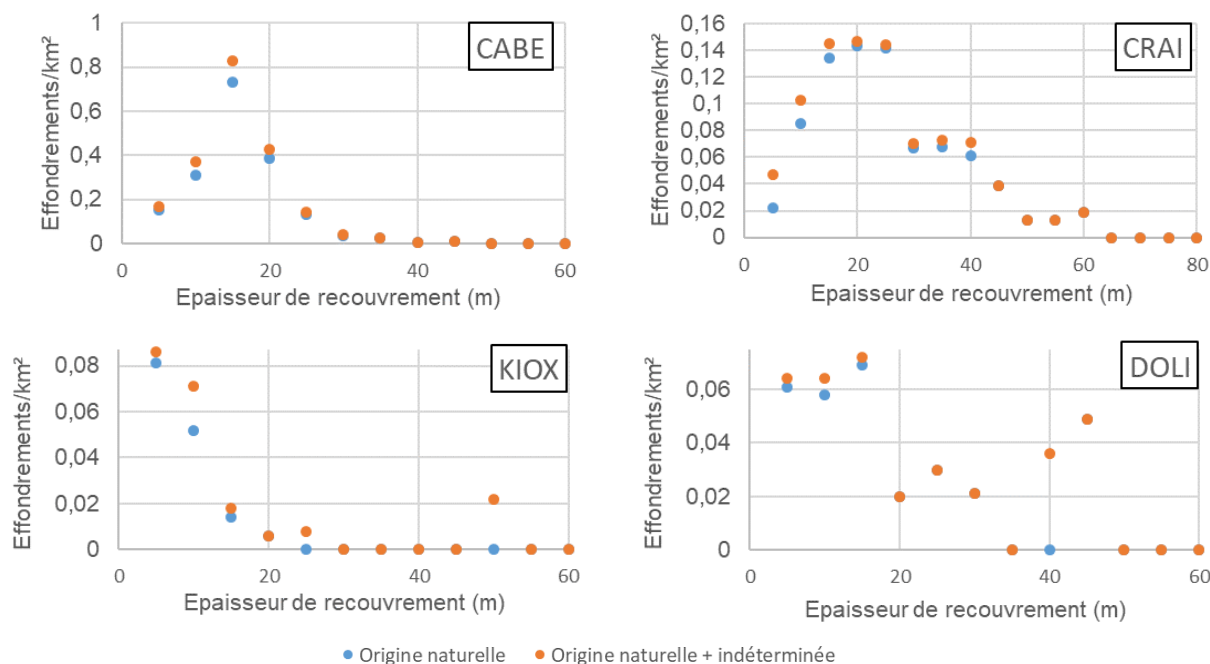


Illustration 46 : Densités d'effondrement en fonction de l'épaisseur de recouvrement pour les formations CABE, CRAI, KIOX et DOLI.

Pour les calcaires de Beauce, la densité d'effondrement est maximale pour une épaisseur de recouvrement de 15 m. Elle est beaucoup plus faible pour les faibles épaisseurs de recouvrement et les épaisseurs de recouvrements supérieures à 25 m. Les densités d'effondrements observées au sein de la craie séno-turonienne montrent une distribution similaire mais plus étalée. La densité est maximale pour des épaisseurs de recouvrement comprise entre 15 et 20 m. Elle diminue ensuite pour devenir négligeable à partir d'une épaisseur de 65 m. Pour les calcaires kimméridgiens et oxfordiens et pour les marnes calcaires du Dogger-Lias, les densités d'effondrements sont plus élevées pour les faibles épaisseurs de recouvrement (0 à 10 m pour KIOX et 0 à 15 m pour DOLI). Pour KIOX, la densité d'effondrements devient négligeable au-delà d'une épaisseur de recouvrement supérieure à 25 m. Pour DOLI la distribution des densités d'effondrement est plus dispersée. Néanmoins on peut estimer qu'elle est négligeable au-delà d'une épaisseur de recouvrement de 35 m. Les densités élevées observées pour des épaisseurs de recouvrement supérieures à 35 m sont associées à des effondrements isolés survenus sur des zones de forte épaisseur de recouvrement de superficie très limités. Ces densités ne sont donc pas jugées représentatives d'une tendance d'ensemble.

Les faibles densités d'effondrements observées pour CABE et CRAI pour des épaisseurs de recouvrement inférieure à 15 m ne sont pas cohérentes avec ce qui est généralement admis dans la bibliographie. Néanmoins, le calcul de ces densités étant basé pour les deux cas sur plusieurs centaines d'événements, cette distribution est prise en compte dans la définition des fonctions de possibilité. L'incertitude sur ces faibles densités d'effondrements pour les faibles épaisseurs de recouvrement est prise en compte dans la fonction de possibilité correspondant au scénario pessimiste.

Pour chacune des quatre formations, une fonction de possibilité traduisant la répartition des effondrements en fonction de l'épaisseur du recouvrement a été définie. Ces fonctions sont représentées sur l'illustration 47. La cartographie des poids d'appartenance calculés à partir des fonctions de possibilité est représentée sur l'illustration 48.

Afin de tenir compte de l'incertitude sur le choix des seuils des fonctions de possibilité définies par jugement d'expert, deux fonctions de possibilité supplémentaires sont proposées. Elles correspondent à des scénarii optimiste et pessimiste encadrant la fonction de possibilité paraissant la plus vraisemblable (Illustration 47). La différence entre les fonctions de possibilité pessimiste et optimiste permet de quantifier l'incertitude associée à la détermination du poids d'appartenance. Cette incertitude est traduite en niveaux de confiance associés à ce critère l'illustration 49.

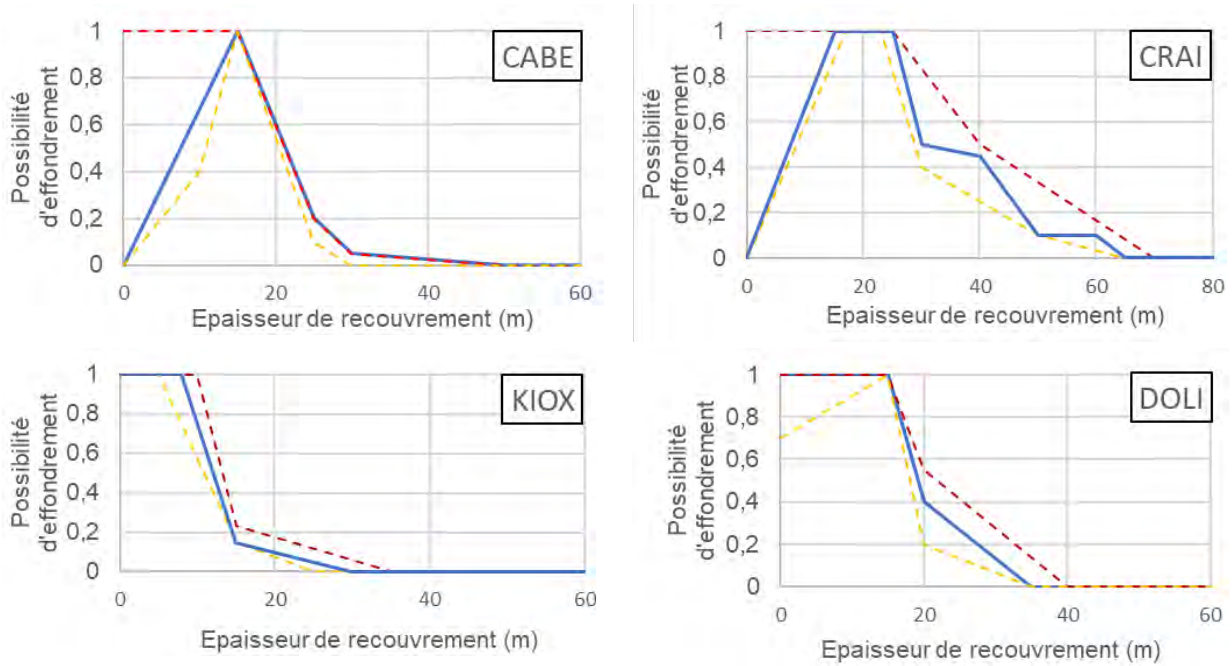


Illustration 47 : Poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur recouvrement. Scénarii optimistes, pessimistes et retenus pour les formations CABA, CRAI, KIOX et DOLI.

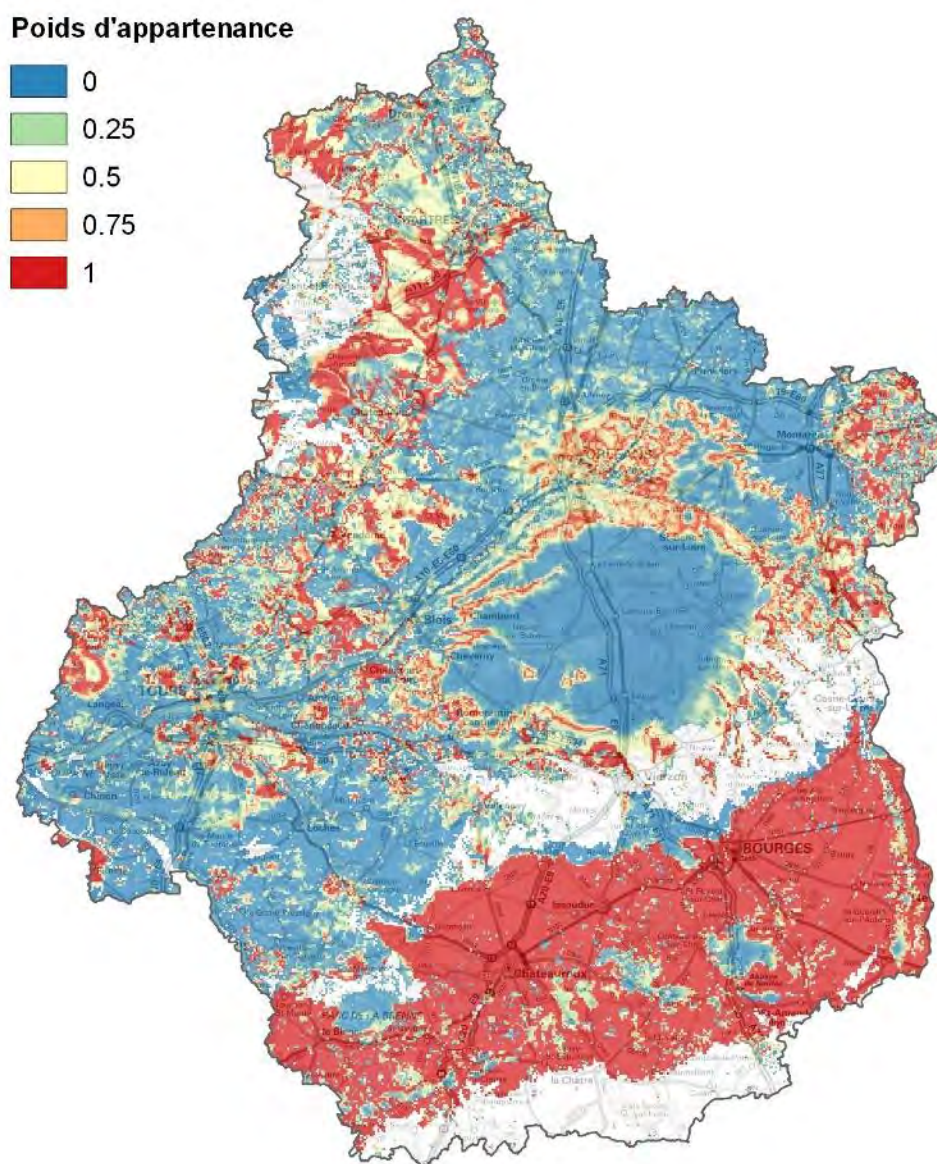


Illustration 48 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'épaisseur de recouvrement.

Niveaux de confiance
associés au critère
"épaisseur de recouvrement"

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

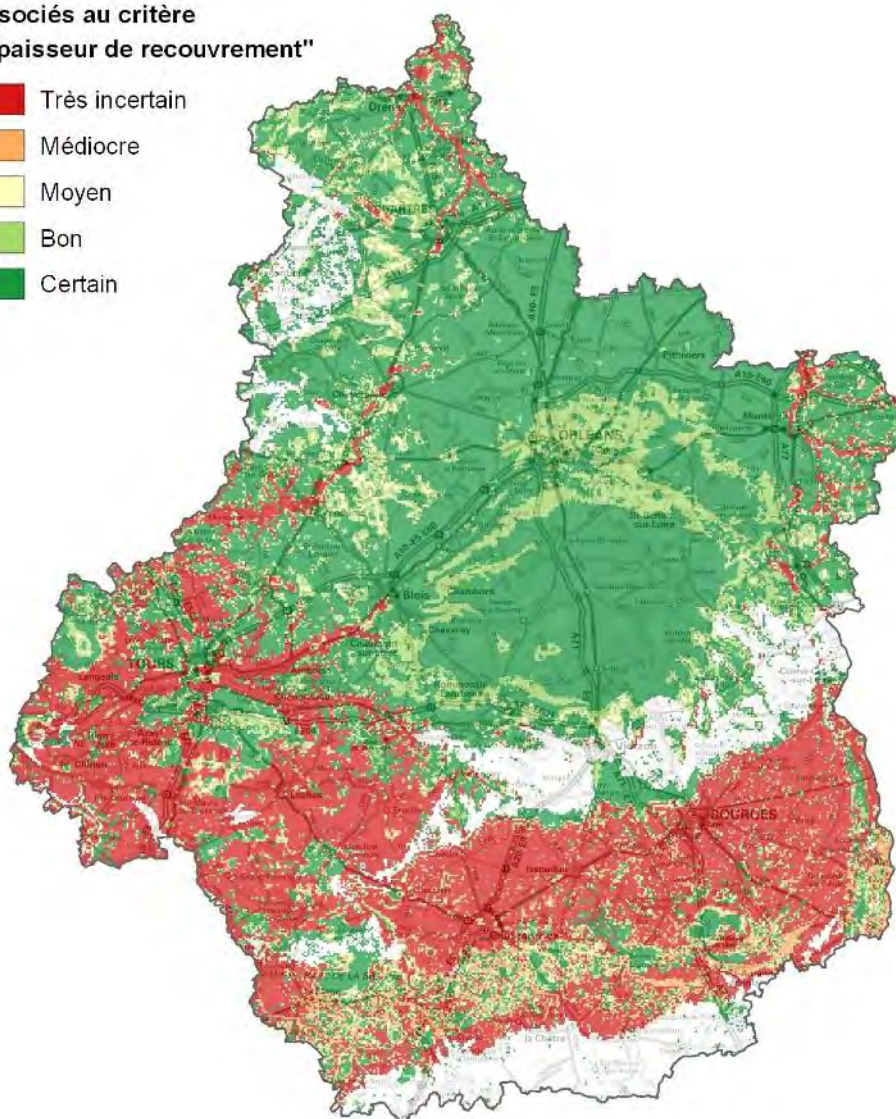


Illustration 49 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « épaisseur de recouvrement » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

5.3.4. Critère « position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation karstique »

D'après la bibliographie, l'occurrence d'effondrements karstiques est favorisée par des battements de nappe d'eau souterraine importants et plus particulièrement par une baisse rapide du niveau de la nappe. En l'absence de données sur le battement de nappe exploitables à l'échelle de la région Centre-Val de Loire, ce critère est approché par la position moyenne du niveau de la nappe par rapport au toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.

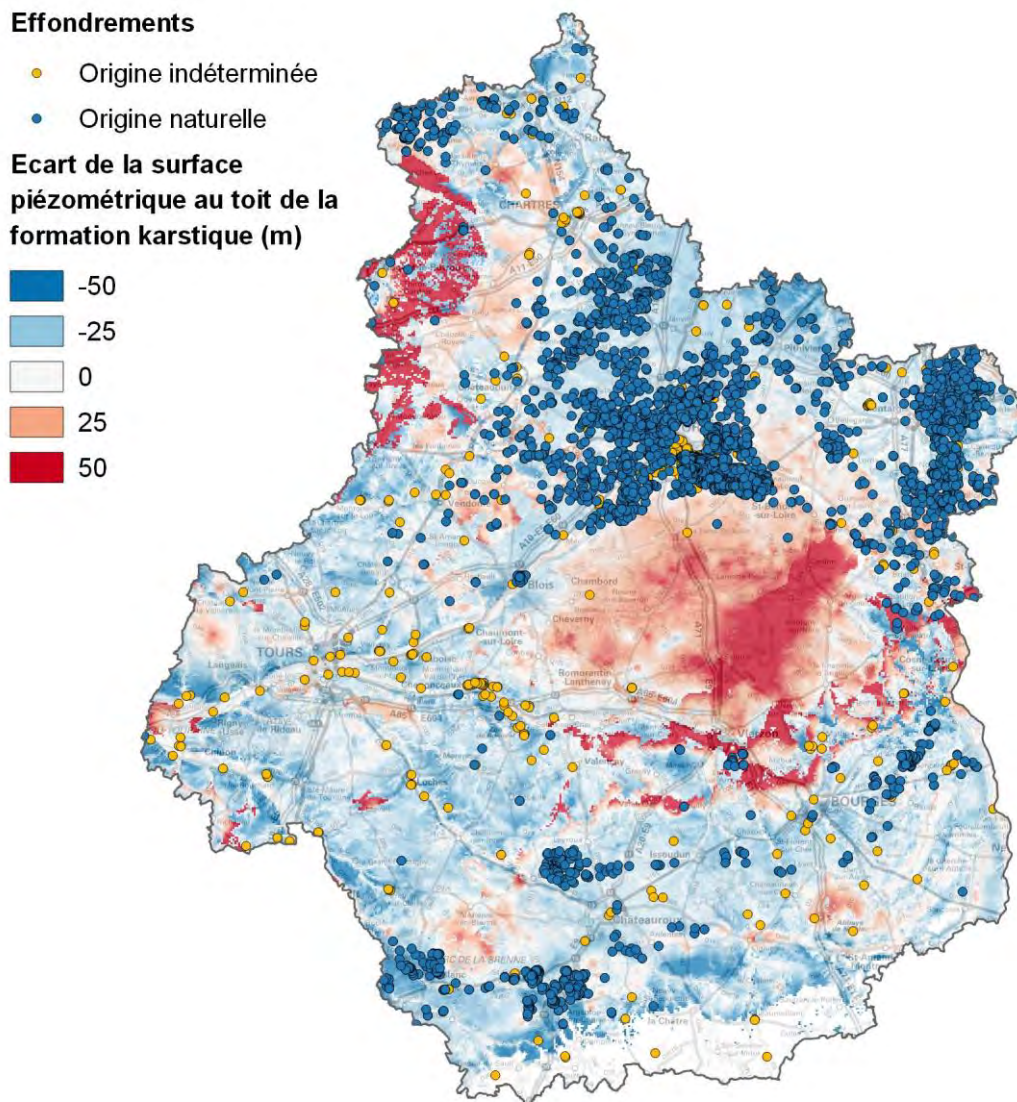


Illustration 50 : Ecart de la surface piézométrique au toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.

Pour générer cette donnée, l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (Allier, et al., 2011) est retranchée à l'altitude du sol issue du MNT BD Alti à 25 m de l'IGN. La couche obtenue correspond à l'altitude moyenne de la nappe. La position moyenne de la nappe par rapport au toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface est ensuite obtenue en faisant la différence entre l'altitude moyenne de la nappe calculée précédemment et l'altitude du toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface issue du modèle géologique.

La cartographie de la position de la nappe par rapport au toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface est représentée sur l'illustration 50. Les valeurs positives représentent les zones où le niveau moyen de la nappe est au-dessus du toit de la formation considérée, tandis que les valeurs négatives correspondent aux zones où le niveau moyen de la nappe est en dessous du toit de la formation considérée.

L'illustration 51 représente la densité d'effondrements en fonction de l'écart entre le niveau moyen de la nappe et le toit de la formation karstique. La densité d'effondrements maximale est observée dans le cas d'un niveau de nappe moyen très proche du toit de la formation karstique (entre -5 m et +5 m). Au fur et à mesure que l'écart entre le niveau de la nappe et le toit de la formation augmente, la densité d'effondrements diminue. Cette diminution est plus progressive lorsque le niveau de la nappe est en dessous du toit de la formation. On peut supposer que, dans le cas d'un niveau de nappe moyen au-dessus et proche du toit de la formation karstique, l'interface karst/couverture est située dans l'intervalle de battement de la nappe ; les fluctuations du niveau de celle-ci favorisant la déstabilisation des matériaux de la couverture.

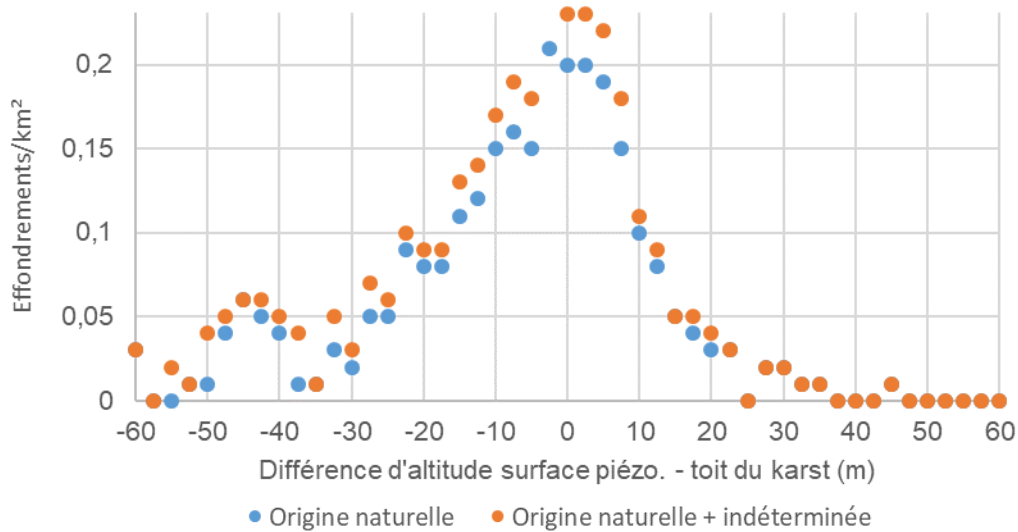


Illustration 51 : Densité d'effondrements en fonction de la différence d'altitude entre la surface piézométrique et le toit de la formation karstique.

Une fonction de possibilité traduisant la répartition des effondrements en fonction de l'écart entre le niveau moyen de la nappe et le toit de la formation karstique a été définie. Cette fonction est représentée sur l'illustration 52. La cartographie des poids d'appartenance calculés à partir des fonctions de possibilité est représentée sur l'illustration 53.

Afin de tenir compte de l'incertitude sur le choix des seuils de la fonction de possibilité définie par jugement d'expert, deux fonctions de possibilité supplémentaires sont proposées. Elles correspondent à des scénarii optimiste et pessimiste encadrant la fonction de possibilité paraissant la plus vraisemblable (Illustration 52). En l'occurrence le choix a été fait, au vue de la répartition des données présenté sur l'illustration 51, de considérer la fonction de possibilité la plus vraisemblable comme étant la plus pessimiste. La différence entre les fonctions de possibilité pessimiste et optimiste permet de quantifier l'incertitude associée à la détermination du poids d'appartenance. Cette incertitude est traduite en niveaux de confiance associés à ce critère l'illustration 54.

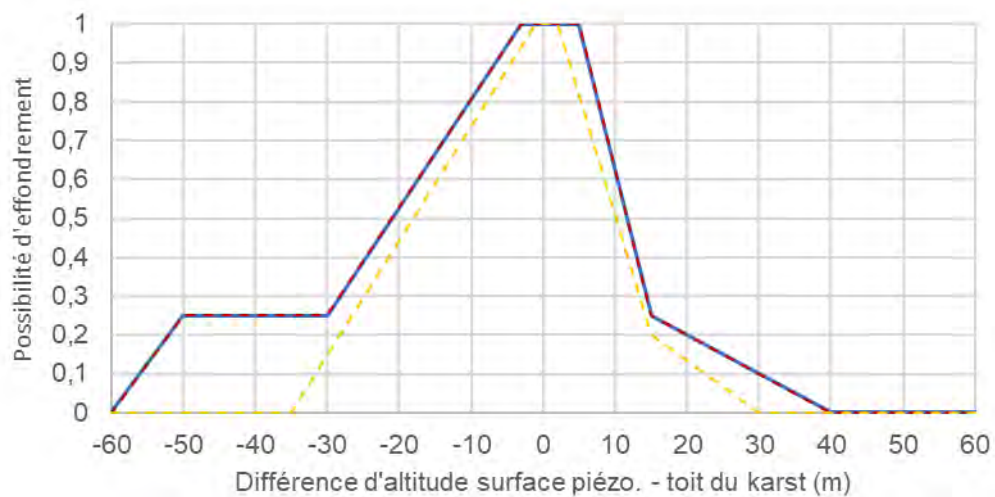


Illustration 52 : Poids d'appartenance en fonction de la différence d'altitude entre la surface piézométrique et le toit de la formation karstique. Scenarii optimiste, pessimiste et retenu.

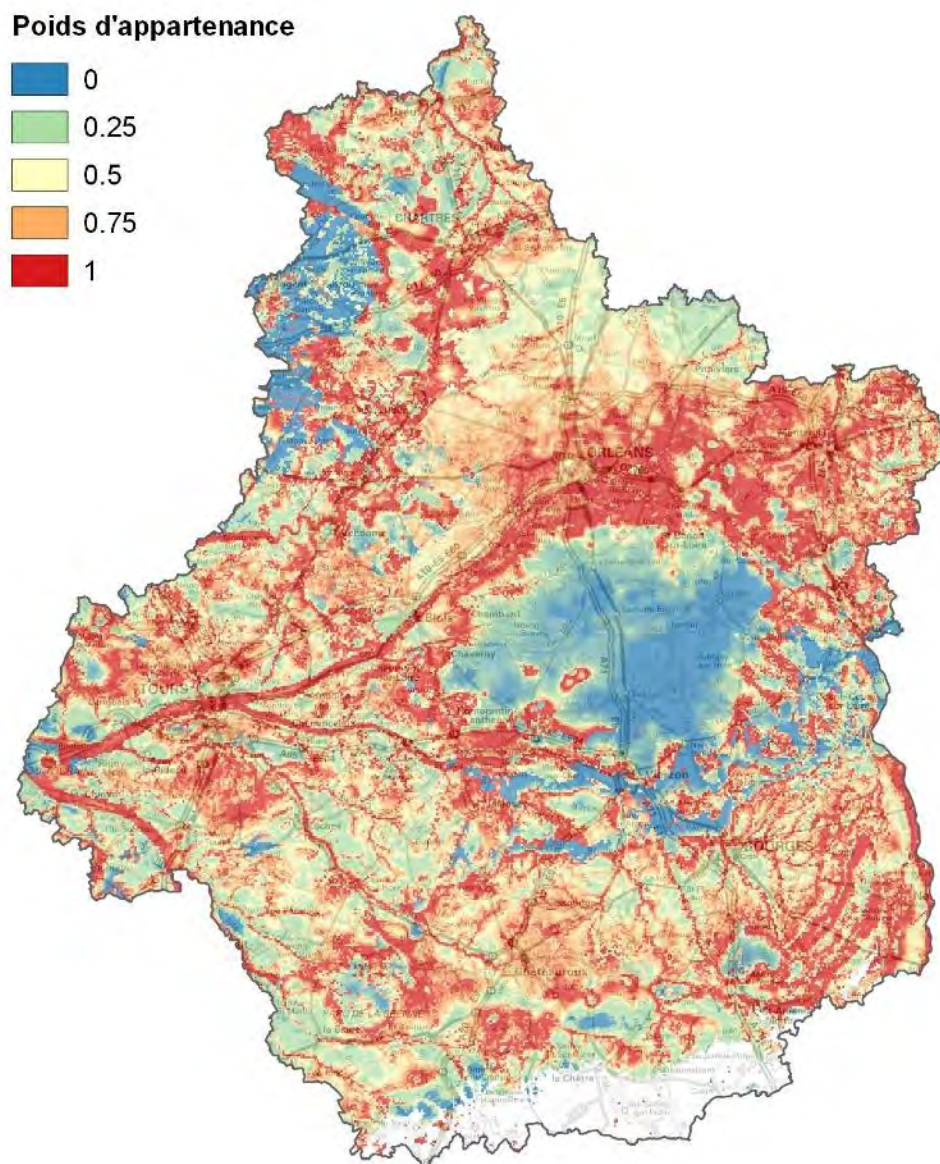


Illustration 53 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'écart entre le niveau moyen de la nappe et le toit de la formation sensible à la dissolution la plus proche de la surface.

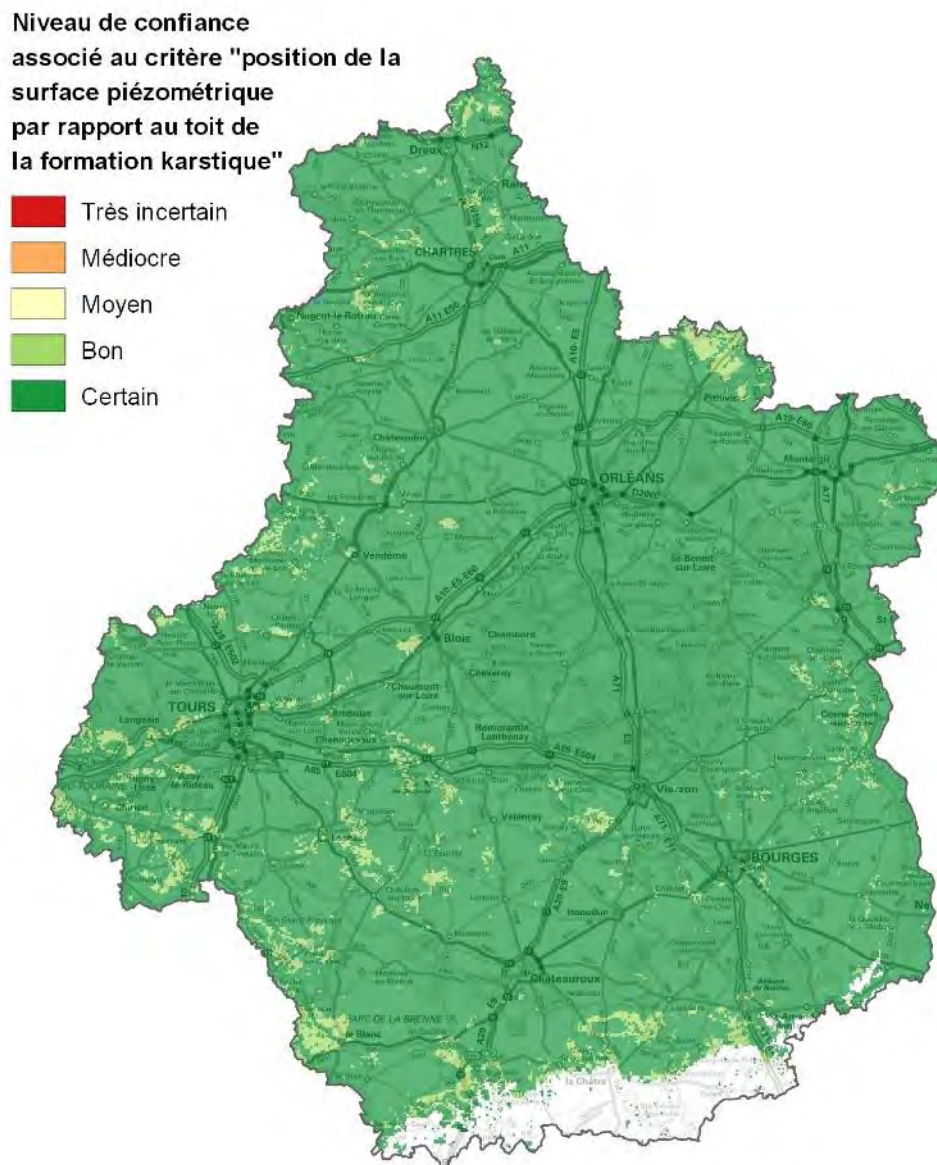


Illustration 54 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation karstique » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

5.3.5. Critère « IDPR »

L'analyse bibliographique a montré que l'occurrence d'effondrements d'origine karstique est favorisée par l'existence de zones d'infiltration préférentielle. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) reflète la propension des terrains à laisser s'infiltrer l'eau ou au contraire à favoriser son ruissellement. L'illustration 55 présente la cartographie de l'IDPR sur le territoire de la région Centre-Val de Loire.

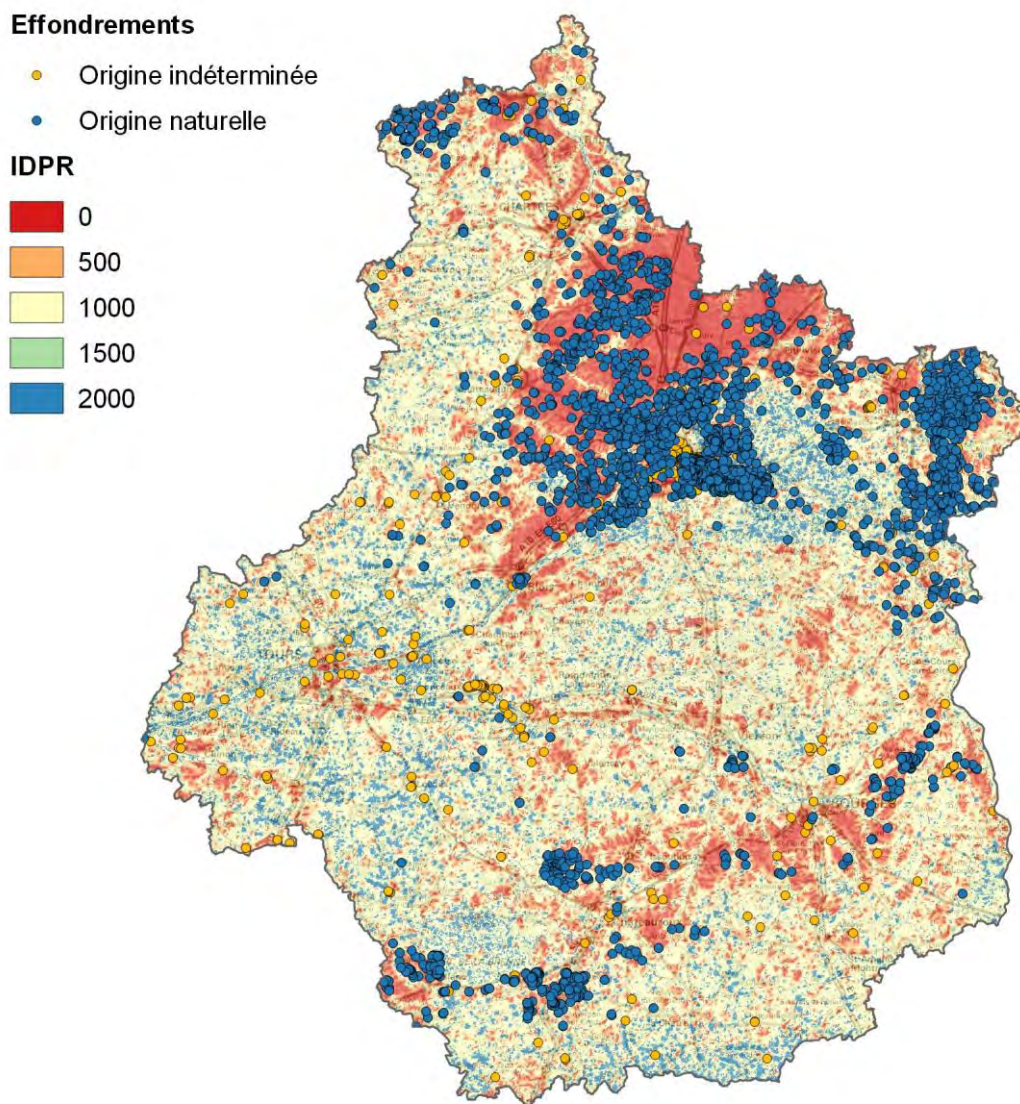


Illustration 55 : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux.

L'illustration 56 représente la densité d'effondrements en fonction de l'IDPR. Les densités les plus élevées sont observées pour les valeurs d'IDPR inférieures à 300. Elles diminuent ensuite progressivement jusqu'à la valeur d'IDPR de 1000. Pour mémoire les valeurs d'IDPR inférieures à 1000 traduisent une prédominance de l'infiltration par rapport au ruissellement. Les densités d'effondrements observées pour les zones où l'IDPR est compris entre 1000 et 2000 sont faibles et relativement constantes.

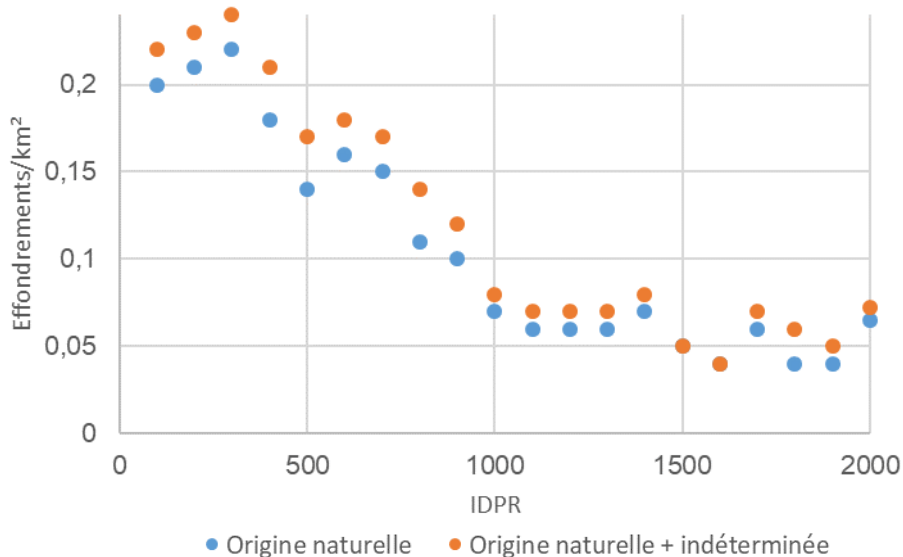


Illustration 56 : Densité d'effondrements en fonction de l'IDPR.

Une fonction de possibilité traduisant la répartition des effondrements en fonction de la valeur d'IDPR a été définie. Cette fonction est représentée sur l'illustration 57. La cartographie des poids d'appartenance calculés à partir des fonctions de possibilité est représentée sur l'illustration 58.

Afin de tenir compte de l'incertitude sur le choix des seuils de la fonction de possibilité définie par jugement d'expert, deux fonctions de possibilité supplémentaires sont proposées. Elles correspondent à des scénarii optimiste et pessimiste encadrant la fonction de possibilité paraissant la plus vraisemblable (Illustration 57). La différence entre les fonctions de possibilité pessimiste et optimiste permet de quantifier l'incertitude associée à la détermination du poids d'appartenance. Cette incertitude est traduite en niveaux de confiance associés à ce critère sur l'illustration 59.

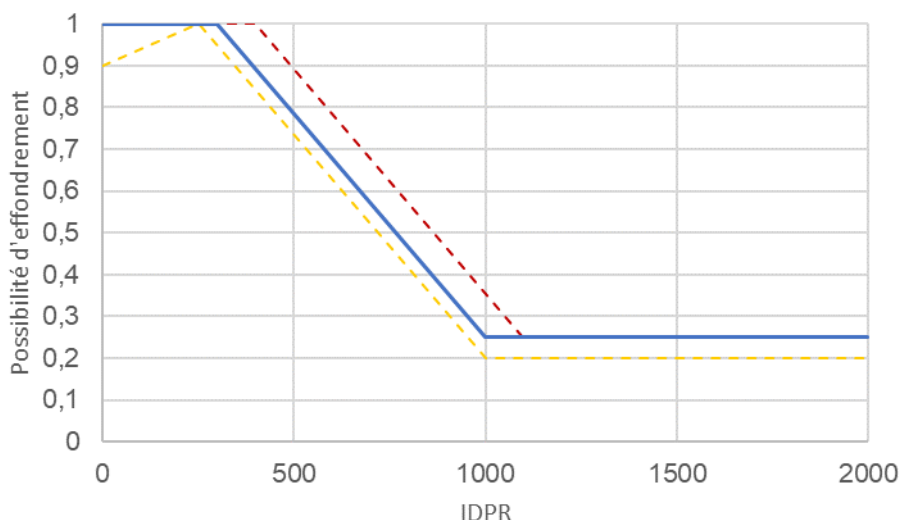


Illustration 57 : Poids d'appartenance en fonction de l'IDPR. Scénarii optimiste, pessimiste et retenu.

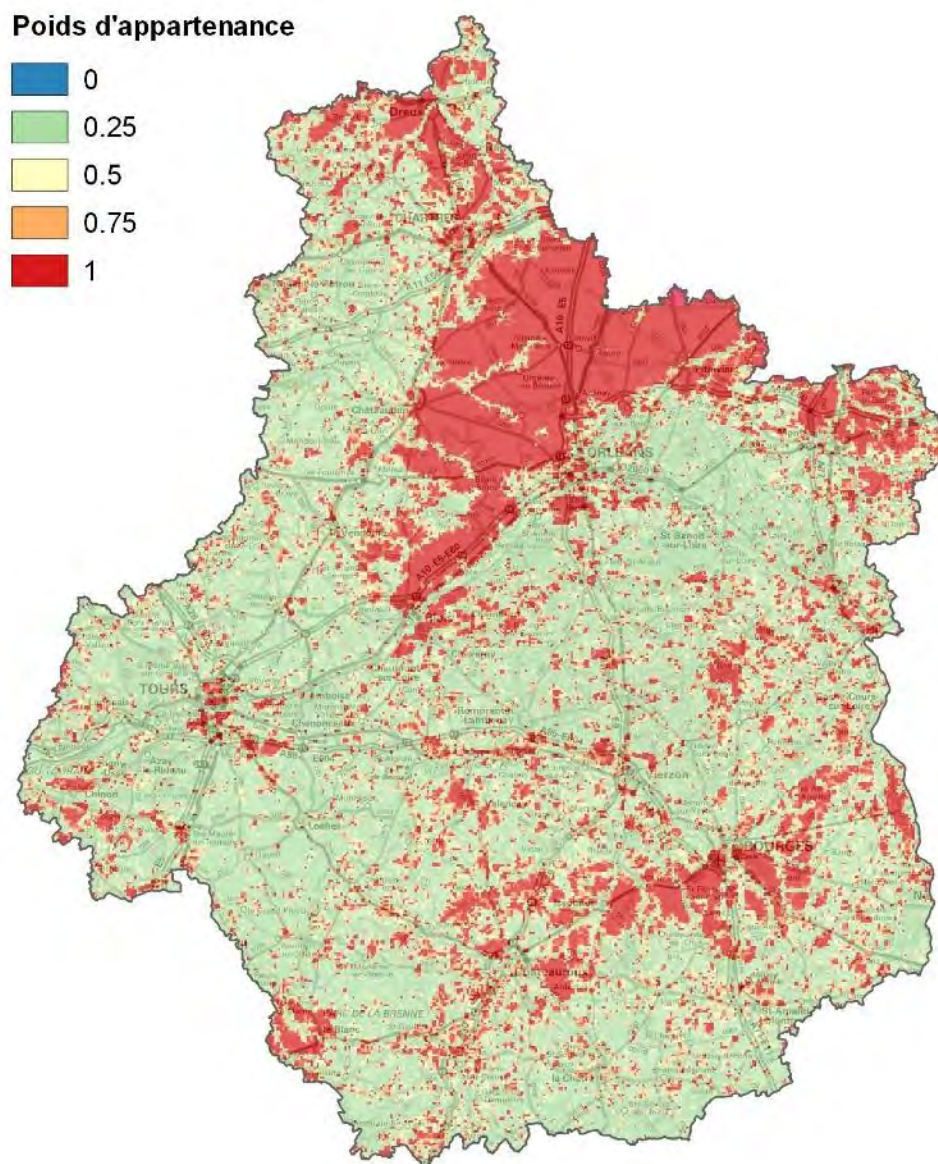


Illustration 58 : Cartographie du poids d'appartenance en fonction de l'IDPR.

Niveau de confiance
associé au critère
"IDPR"

-  Très incertain
-  Médiocre
-  Moyen
-  Bon
-  Certain

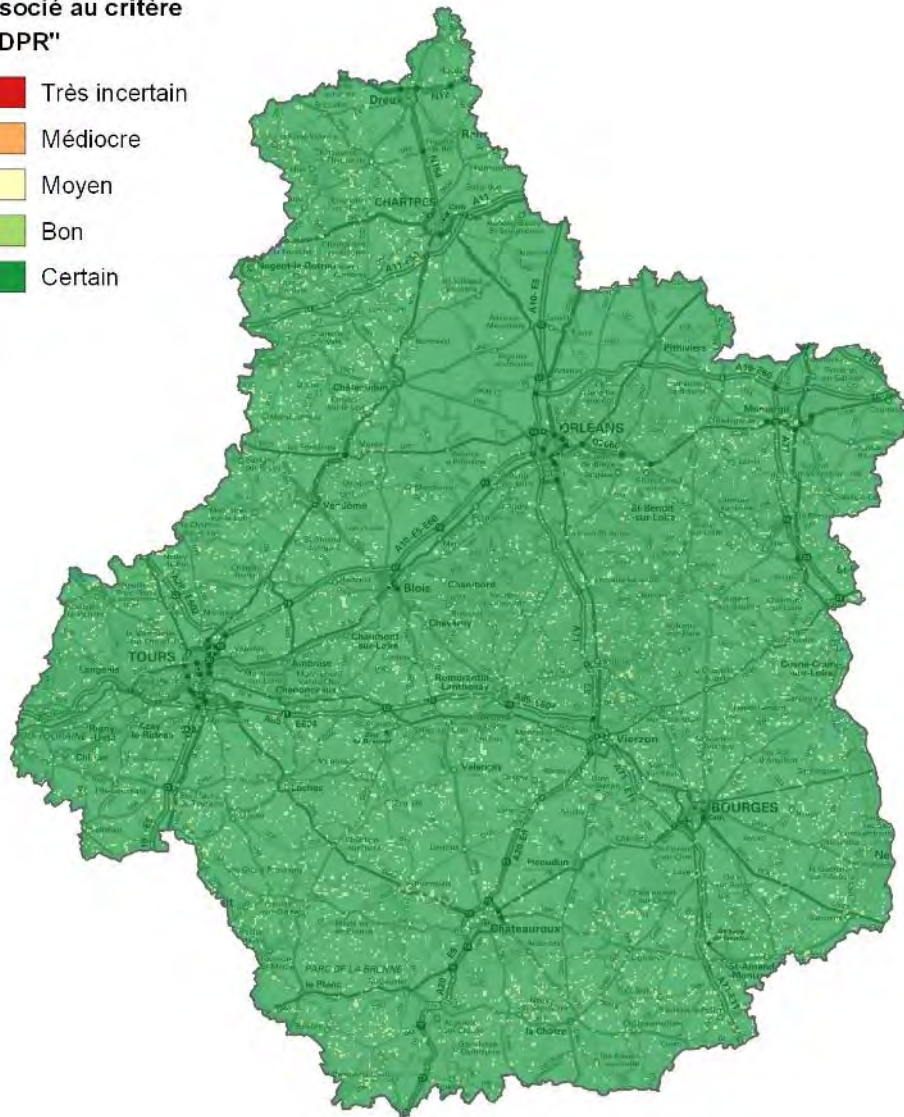


Illustration 59 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic du critère « IDPR » utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

5.4. SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT

La susceptibilité d'effondrement est déterminée par la combinaison des poids de chaque critère explicatif calculés précédemment :

- densité d'effondrement des critères qualitatifs : ici le critère « géologie » ;
- possibilités d'effondrement des critères quantitatifs : « épaisseur de la formation karstique », « épaisseur de recouvrement », « position de la nappe par rapport au toit de la formation karstique » et « IDPR ».

Dans un premier temps les poids des différents critères quantitatifs sont combinés. La susceptibilité d'effondrement est ensuite issue du produit de la combinaison des poids des critères quantitatifs et du poids du critère « géologie ».

La méthodologie développée dans le cadre des scénarios cavités départementaux (Fontaine, et al., 2008) préconise de combiner les critères quantitatifs en conservant, pour chaque maille de la grille de calcul, le poids le plus élevé parmi les poids calculés pour les différents critères quantitatifs. Cette méthode constitue une approche conservatrice en maximisant la susceptibilité d'effondrement. Cependant elle prive le résultat du pouvoir discriminant de certains critères.

En l'occurrence, en région Centre-Val de Loire, cette opération conduit à obtenir un poids maximal (égal à 1) sur une majeure partie du territoire régional, supprimant ainsi le pouvoir discriminant des différents critères quantitatifs. De ce fait, il a été décidé de combiner les différents critères quantitatifs en calculant la moyenne des possibilités d'effondrement. Ainsi le poids combiné des critères quantitatifs varie toujours entre 0 et 1 mais permet de nuancer la note de susceptibilité en fonction du cumul ou non de facteurs favorables aux effondrements. L'illustration 60 présente la carte des poids des critères quantitatifs combinés.

L'illustration 61 présente la carte de susceptibilité d'effondrement issue du produit des poids combinés des critères quantitatifs et du poids du critère « géologie ».

Les niveaux de confiance calculés pour chaque critère quantitatif sont également combinés en faisant la moyenne des indicateurs de confiance (notes de 0 à 5, cf § 2.2.5) associés à ces critères. Le résultat permet de quantifier en tout point du territoire le niveau de confiance associé à la susceptibilité d'effondrement (Illustration 62)

**Moyenne des possibilités
d'effondrement**

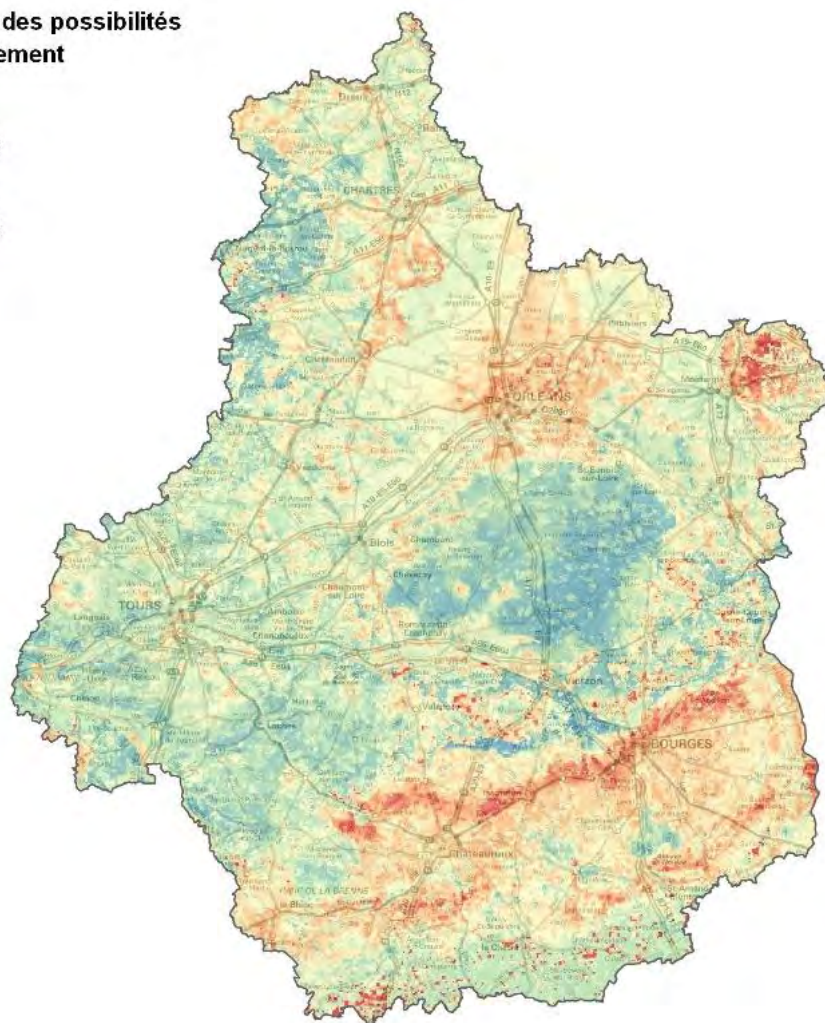
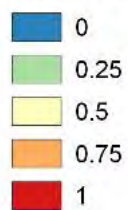


Illustration 60 : Moyennes des possibilités d'effondrement associées aux critères quantitatifs.

Susceptibilité d'effondrement

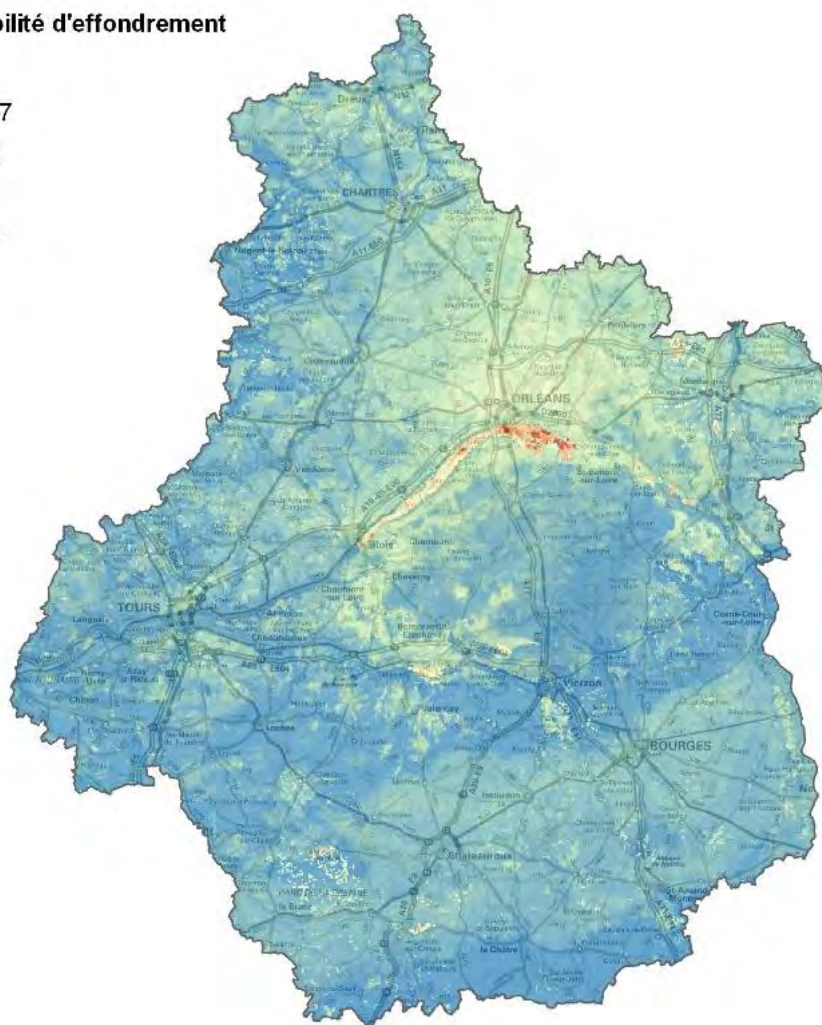
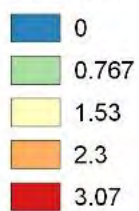


Illustration 61 : Cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavité karstique.

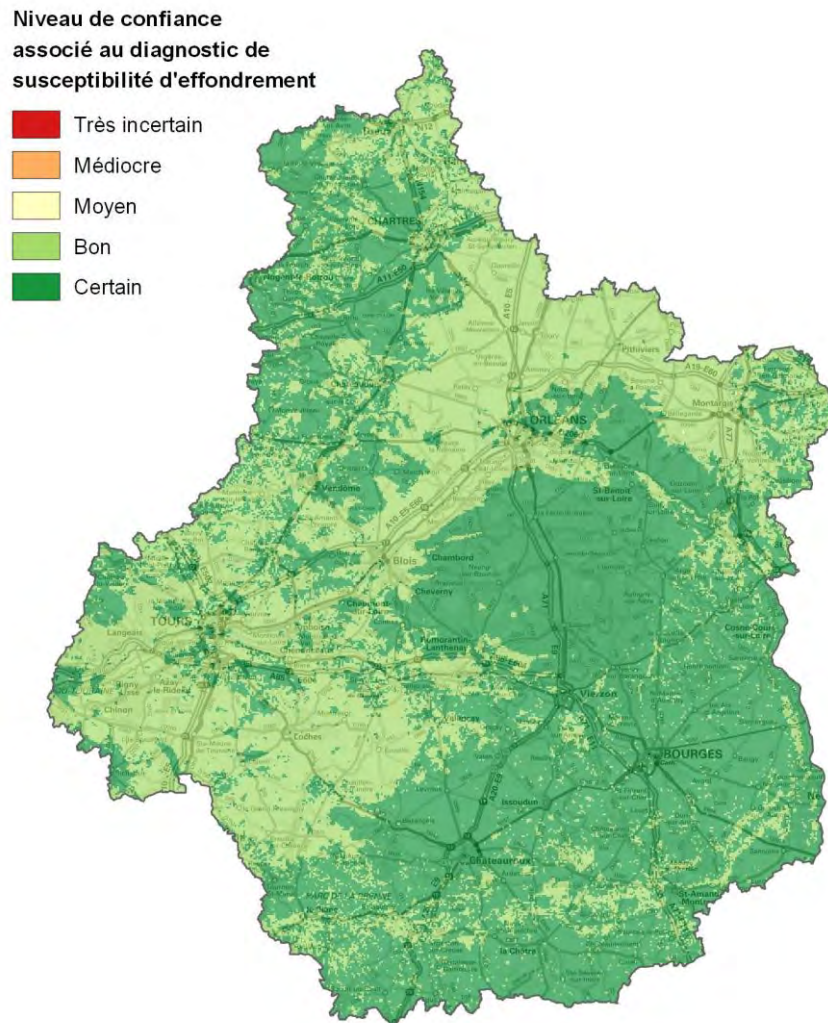


Illustration 62 : Niveau de confiance associé au diagnostic de susceptibilité d'effondrement.

5.5. SUSCEPTIBILITE FINALE D'EFFONDREMENT DE CAVITE KARSTIQUES

La susceptibilité finale d'effondrement est issue du croisement de deux susceptibilités :

- La susceptibilité de présence de cavité, déterminée dans le cadre de la première phase de l'étude (Vanoudheusden, 2014) ;
- La susceptibilité d'effondrement, déterminée précédemment.

La susceptibilité finale d'effondrement correspond au produit de ces deux susceptibilités. Le résultat en présenté sur l'illustration 63.

La combinaison des incertitudes calculées pour chacun des critères explicatifs rentrant en jeu dans l'évaluation de la susceptibilité de présence de cavité et dans la susceptibilité d'effondrement conduit à proposer une cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic de susceptibilité finale d'effondrement. Cette cartographie est présentée en illustration 64.

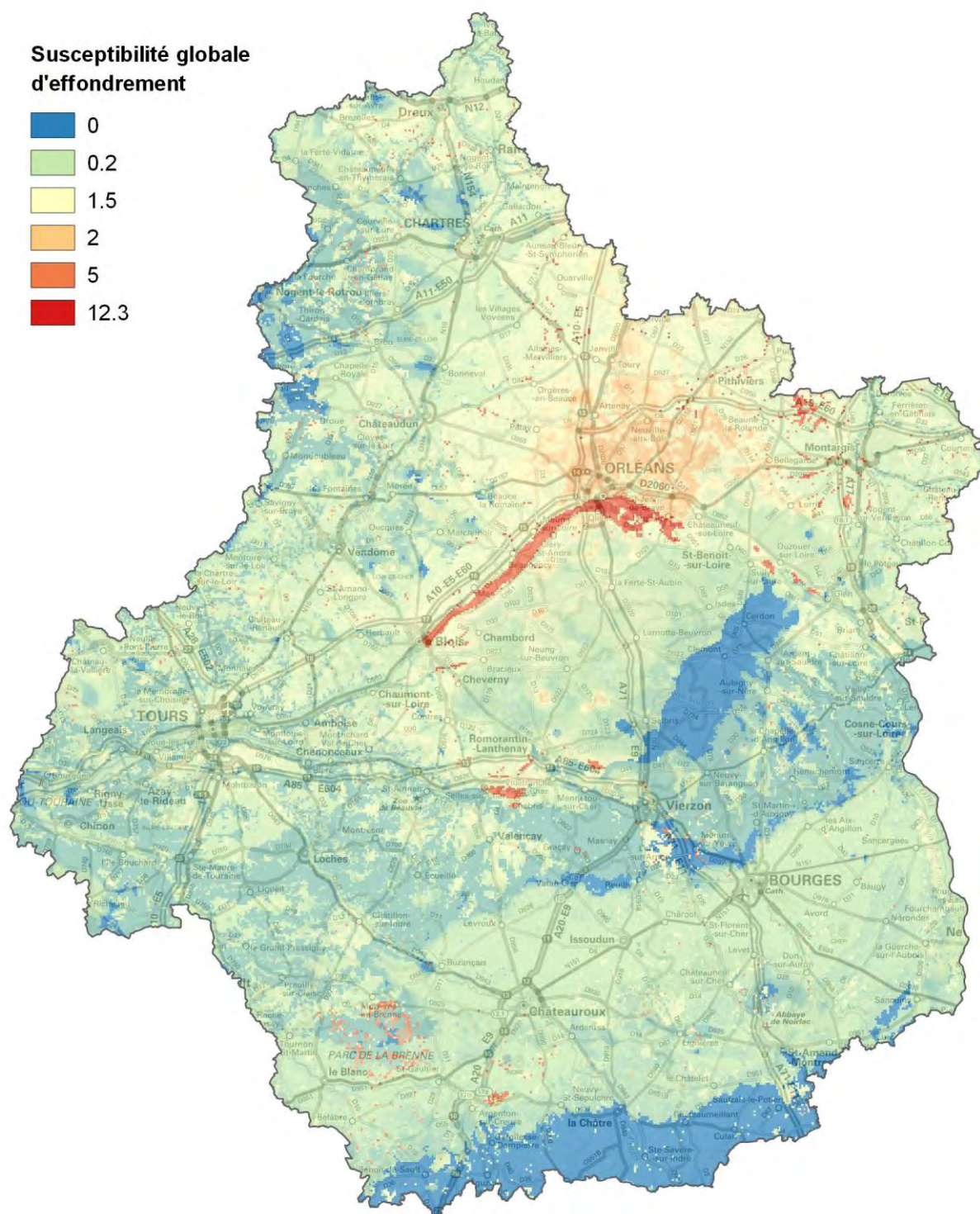


Illustration 63 : Cartographie de la susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique.

**Niveau de confiance
associé au diagnostic de
susceptibilité finale d'effondrement**

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

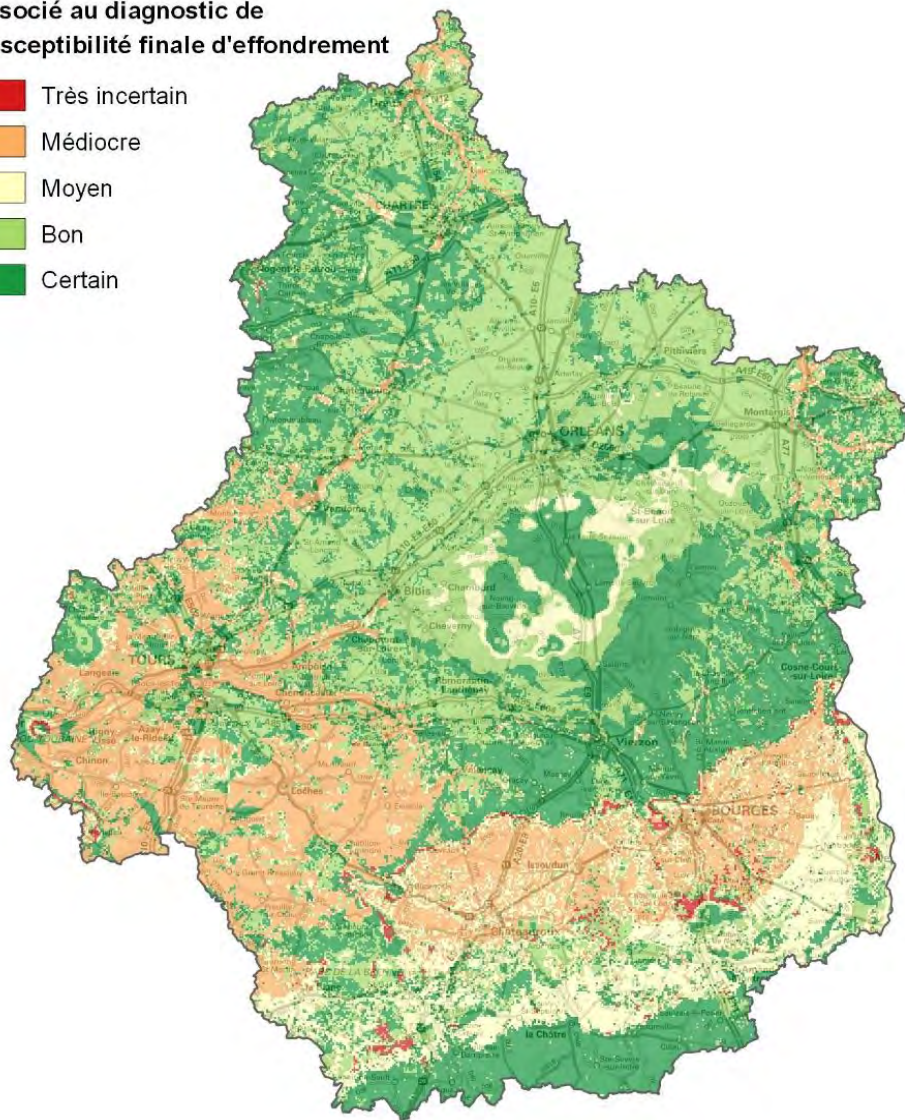


Illustration 64 : Cartographie du niveau de confiance associé au diagnostic de susceptibilité finale d'effondrement.

Afin de simplifier la lecture de la carte de susceptibilité globale d'effondrement, les notes de susceptibilité peuvent être classées par niveaux. Les cinq niveaux retenus en fonction du contexte de l'étude sont décrits dans le tableau de l'illustration 65.

La cartographie des niveaux de susceptibilité finale d'effondrement de cavité karstique sur le territoire de la région Centre-Val de Loire est présentée sur l'illustration 66.

Valeur de susceptibilité	Niveau de susceptibilité
$SE_{finale} = 0$	Nul
$0 < SE_{finale} \leq 0,2$	Faible
$0,2 < SE_{finale} \leq 1,5$	Moyen
$1,5 < SE_{finale} \leq 5$	Fort
> 5	Très fort

Illustration 65 : Classification des notes de susceptibilité en niveaux.

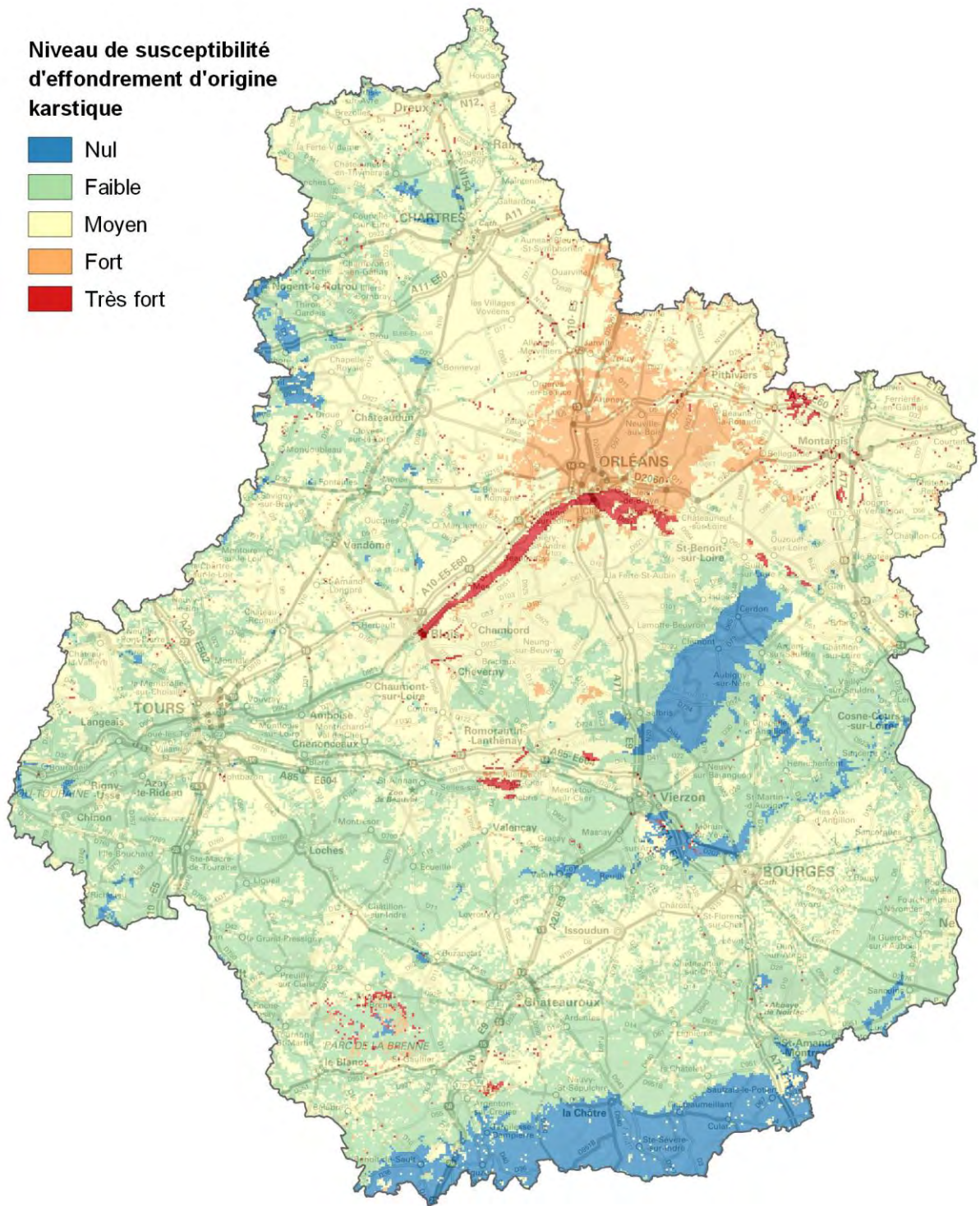


Illustration 66 : Niveau de susceptibilité globale d'effondrement d'origine karstique.

6. Exposition des communes à la susceptibilité d'effondrement et recommandations associées

6.1. EVALUATION DE L'EXPOSITION DES COMMUNES A LA SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT

En complément de la carte de susceptibilité d'effondrement d'origine karstique établie précédemment, une démarche d'évaluation de l'exposition à la susceptibilité d'effondrement karstique à l'échelle communale est entreprise.

En première approche, les limites communales sont superposées à la carte des niveaux de susceptibilité d'effondrement karstique élaborée précédemment. Cette représentation, présentée sur l'illustration 67 permet de visualiser la répartition des différents niveaux de susceptibilité sur le territoire communal. Une déclinaison de cette carte pour chaque département est présentée en Annexe 2.

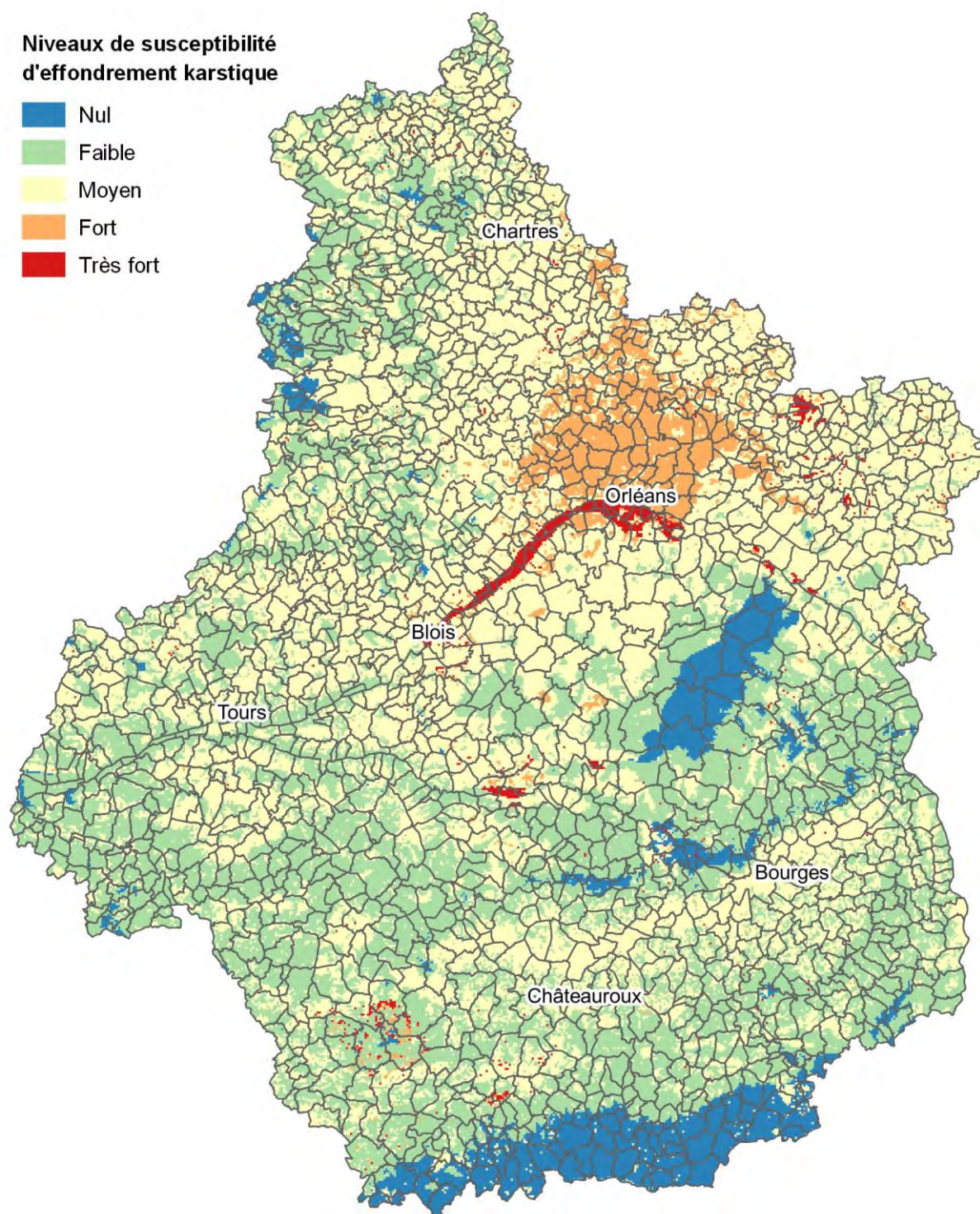


Illustration 67 : Superposition de la carte des niveaux de susceptibilité d'effondrement avec les contours communaux.

Afin d'introduire une notion d'enjeu dans la hiérarchisation des communes en fonction de leur niveau d'exposition, sans pour autant s'inscrire dans une démarche d'évaluation du risque proprement dite, la carte des niveaux de susceptibilité d'effondrement karstique établie précédemment est croisée avec l'emprise des zones urbanisées de chaque commune. De cette manière, le niveau d'exposition à l'échelle des communes est déterminé spécifiquement à partir de l'exposition des zones urbanisées, où se concentrent les enjeux (populations, bâti, infrastructures, ...)

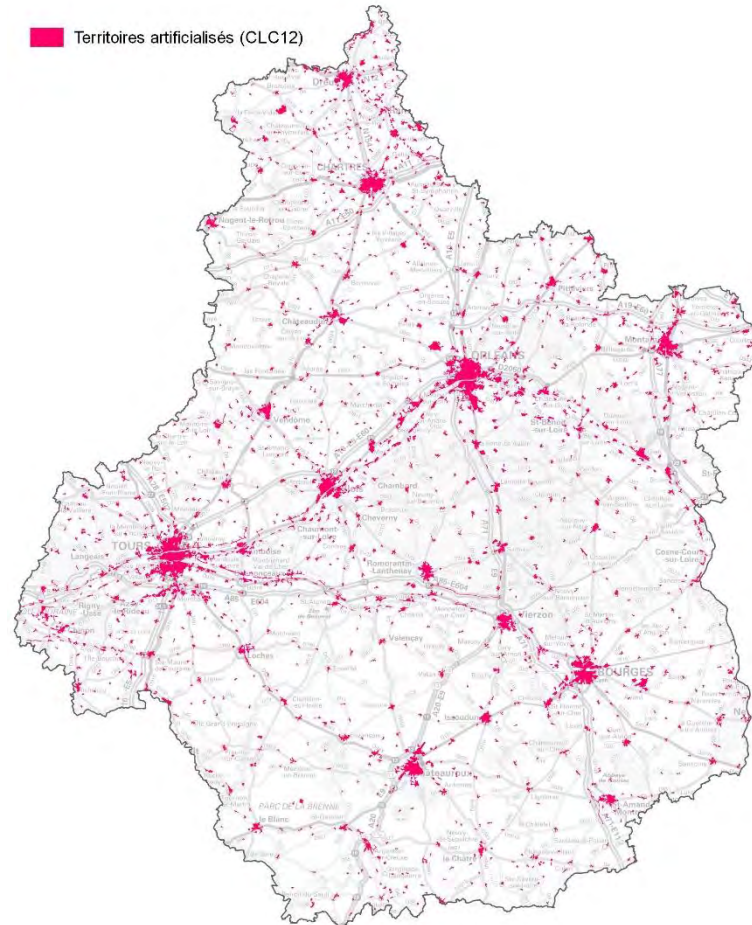


Illustration 68 : Zones urbanisées prises en compte pour l'évaluation de l'exposition des communes.

L'emprise des zones urbanisées est obtenue à partir de la base de données d'occupation du sol Corine Land Cover, version de 2012. Pour l'ensemble du territoire régional, les surfaces correspondant au code Corine Land Cover de niveau 1, « 1 – Territoires artificialisés », sont extraites (Illustration 68). L'intersection de ces surfaces avec la carte de susceptibilité finale d'effondrement (Illustration 66) permet ensuite de calculer la superficie des zones urbanisées de chaque commune concernée par chaque niveau de susceptibilité.

Ainsi, pour chaque commune, le choix a été fait de retenir le niveau de susceptibilité le plus élevé impactant au moins 10% de la superficie des zones urbanisées de la commune. Le fait de ne prendre en considération que les niveaux de susceptibilité concernant plus de 10% de la superficie urbanisée permet de s'affranchir de l'influence d'une éventuelle susceptibilité élevée sur une maille de calcul isolée qui ne serait pas représentative de l'exposition réelle du territoire.

Une analyse au cas par cas des communes dont les surfaces urbanisées sont concernées à plus de 10% par une susceptibilité de niveau « Très fort » conduit à réduire arbitrairement le niveau

d'exposition de certaines communes. En effet, pour les communes rurales dont l'étendue de zones urbanisée est très faible (typiquement du même ordre de grandeur que la taille de la maille de calcul, soit 0,25 km²), l'existence d'une susceptibilité de niveau très fort sur une maille de calcul isolée, vraisemblablement due à un artefact de calcul, peut conduire à considérer une susceptibilité de niveau très fort sur toute la commune. Les niveaux de susceptibilité sur les communes manifestement impactées par ces artefacts sont réajustés manuellement (Illustration 69).

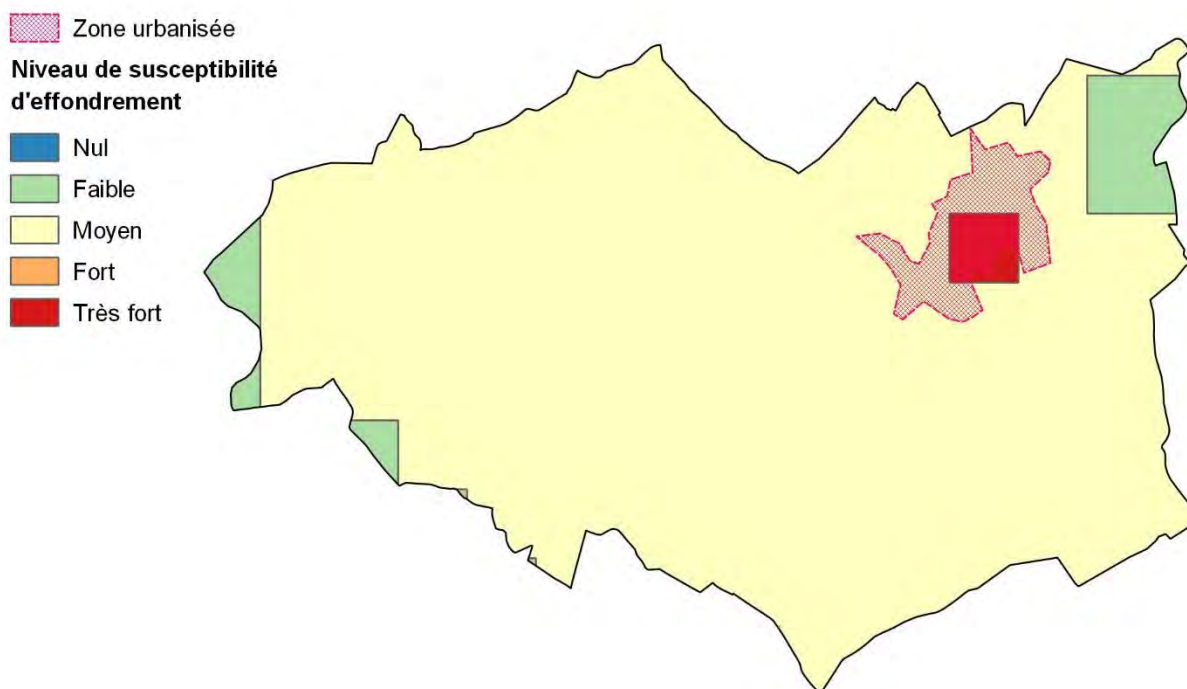


Illustration 69 : Exemple d'une commune dont le niveau de susceptibilité d'effondrement devrait être considéré comme « très fort » en raison de la présence d'une maille de calcul isolée de niveau « très fort » au droit de la zone urbanisée. Pour cette commune le niveau de susceptibilité retenu a été réduit arbitrairement à « moyen ».

La démarche de prise en compte des zones urbanisées a pour effet de faire ressortir, dans la hiérarchisation de l'exposition des communes, les communes dont les enjeux (i.e. les zones habitées) sont fortement exposés par rapport à des communes concernées par des niveaux de susceptibilité élevés mais où les enjeux sont moins exposés.

La carte de l'illustration 70 représente les niveaux de susceptibilités d'effondrement de cavité karstique retenus pour chaque commune. Elle prend également en compte le niveau de confiance associé au diagnostic. Une déclinaison de cette carte pour chaque département figure en Annexe 2.

Les informations sur l'exposition de chaque commune sont regroupées dans un tableau de synthèse fourni en Annexe 2.

Les données contenues dans le tableau de synthèse pour chaque commune sont les suivantes :

- Département ;
- N° INSEE ;
- Nom ;

- Superficie de la commune ;
- Superficie urbanisée ;
- Nombre d'effondrements recensés ;
- Note de susceptibilité d'effondrement moyenne ;
- Pourcentage de la superficie de la commune classé en susceptibilité nulle ;
- Pourcentage de la superficie de la commune classé en susceptibilité faible ;
- Pourcentage de la superficie de la commune classé en susceptibilité moyenne ;
- Pourcentage de la superficie de la commune classé en susceptibilité forte ;
- Pourcentage de la superficie de la commune classé en susceptibilité très forte ;
- Note de susceptibilité la plus élevée concernant au moins 10% de la superficie de la commune ;
- Niveau de susceptibilité occupant la plus grande superficie sur la commune ;
- Pourcentage de la superficie urbanisée de la commune classé en susceptibilité nulle ;
- Pourcentage de la superficie urbanisée de la commune classé en susceptibilité faible ;
- Pourcentage de la superficie urbanisée de la commune classé en susceptibilité moyenne ;
- Pourcentage de la superficie urbanisée de la commune classé en susceptibilité forte ;
- Pourcentage de la superficie urbanisée de la commune classé en susceptibilité très forte ;
- Note de susceptibilité la plus élevée concernant au moins 10% de la superficie urbanisée de la commune (calculée) ;
- Note de susceptibilité la plus élevée concernant au moins 10% de la superficie urbanisée de la commune (corrigée) ;
- Niveau de confiance associé au diagnostic (niveau moyen sur la commune).

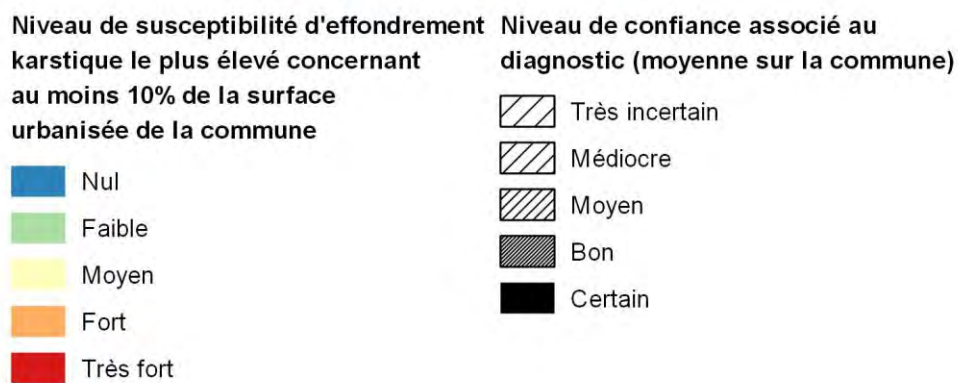
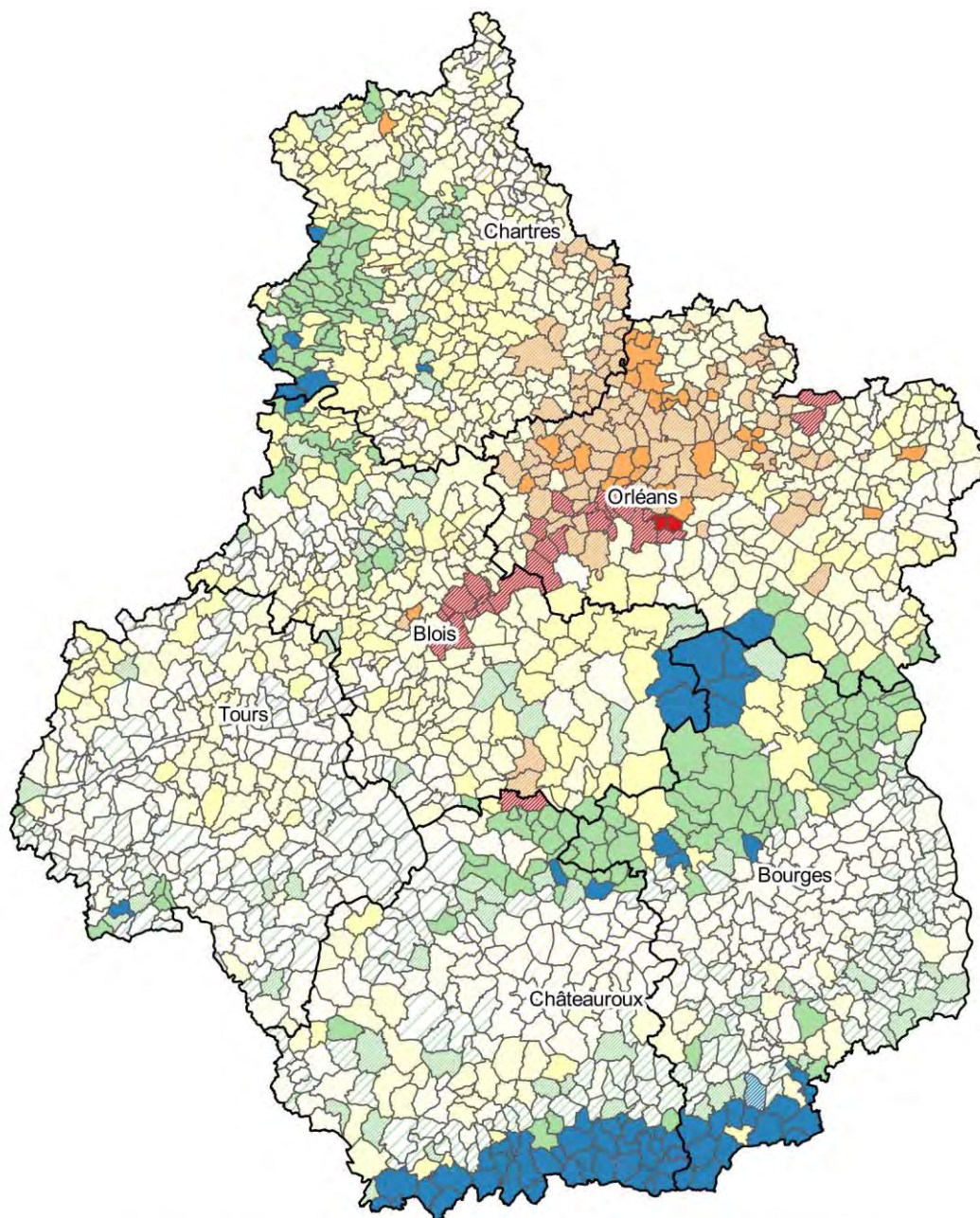


Illustration 70 : Niveau de susceptibilité d'effondrement concernant au moins 10% de la surface urbanisée de chaque commune.

6.2. ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse des résultats de l'évaluation de l'exposition de chaque commune à la susceptibilité d'effondrement karstique présentée précédemment (Illustration 69 et Illustration 70) montre que la majeure partie de la région Centre-Val de Loire est concernée à différents degrés par un risque d'effondrement d'origine karstique. En effet, à l'échelle régionale, les surfaces urbanisées de 96% des communes sont concernées par une susceptibilité d'effondrement karstique de niveau Faible ou supérieur (Illustration 71).

Cependant l'exposition des communes à la susceptibilité d'effondrement karstique montre de fortes disparités entre les départements. Le département du Cher apparaît comme le moins exposé, avec 58% des communes pour lesquelles les niveaux de susceptibilité sont nuls ou faibles. Le département de l'Indre présente une proportion équivalente de communes exposées à des susceptibilités nulles ou faibles.

Sur ce département, seule la commune de Chabris fait exception avec une susceptibilité de niveau très fort. La singularité que fait ressortir le calcul sur le cas de Chabris est due principalement à la combinaison de deux facteurs :

- facteur géologique : la commune est située en bordure du Cher. Au niveau de la commune, la vallée du Cher incise les calcaires de Beauce qui sont surmontés par une couche d'alluvions ;
- facteur hydrogéologique : la surface piézométrique au niveau de la plaine alluviale du Cher est proche du toit du calcaire de Beauce.

Ces facteurs reflètent un contexte similaire à celui de la plaine alluviale de la Loire dans sa traversée du calcaire de Beauce (Loiret et Loir-et-Cher), où de très nombreux effondrements ont été recensés. La méthode d'évaluation de la susceptibilité d'effondrement a donc conduit à extrapoler la note de susceptibilité calculée pour la plaine alluviale de la Loire à l'ensemble des zones concernées par ce contexte.

Aucune cavité karstique ni effondrement associé n'a été recensé sur la commune de Chabris dans les inventaires pris en compte dans cette étude. L'absence d'informations sur cette commune malgré le niveau de susceptibilité très fort qui lui est attribué peut être expliqué de deux manières :

- soit il existe des effondrements sur la commune mais ceux-ci n'ont pas été recensés ;
- soit il n'y a pas d'effondrement à Chabris et un facteur explicatif de la répartition des cavités/effondrements n'a pas été pris en compte dans l'étude. On peut penser par exemple à une hétérogénéité spatiale de la karstification du calcaire de Beauce.

Contrairement au département du Cher, les départements du Loiret et du Loir-et-Cher concentrent à eux seuls 97% des communes dont les zones urbanisées sont exposées à une susceptibilité de niveau très fort (31 communes) et le département du Loiret compte 75% des communes exposées à une susceptibilité de niveau Fort.

Cette disparité dans la répartition spatiale des expositions à la susceptibilité d'effondrement est à mettre en relation avec le contexte géologique régional. Le calcaire de Beauce sous couverture alluviale apparaît en effet comme le contexte pour lequel la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique est de loin la plus élevée sur le territoire régional. Cette configuration correspond à la plaine alluviale de la Loire, entre Jargeau (45) et Blois (41), où de nombreux effondrements d'origine karstique sont observés. Le Val de Loire concentre également une grande partie des enjeux du territoire régional. Le contexte de calcaire de Beauce sous couverture alluviale se

retrouve également au sud de la Sologne, dans les vallées du Cher et de la Sauldre, entre le Cher et le Loir-et-Cher, ainsi que dans le Gâtinais, au nord-est du Loiret, où la susceptibilité d'effondrement peut être localement très forte (cf. cas de Chabris traité précédemment) malgré un nombre d'effondrements recensés moins important que dans le Val de Loire.

Dans une moindre mesure, les territoires situés en contexte de calcaire de Beauce sous recouvrement plio-quadernaire au nord de la Loire sont exposés à un niveau de susceptibilité fort. Cette zone concerne une grande partie du département du Loiret ainsi que la bordure orientale de l'Eure-et-Loir.

L'ouest de la région, où affleure principalement la craie séno-turonienne, est concerné en majorité par des niveaux de susceptibilité d'effondrement de niveau faible à moyen. 59% des communes d'Indre-et-Loire sont classées en niveau moyen et 41% en niveau faible (Illustration 71). Toutefois, sur ce département et plus généralement sur la zone d'extension de la craie séno-turonienne, le niveau de confiance accordé au diagnostic est considéré comme médiocre à moyen pour une majorité des communes (Illustration 70). Il en est de même dans les départements de l'Indre et du Cher, dans les zones d'extension des formations du Dogger-Lias et du Kimméridgien-Oxfordien pour lesquelles le niveau de susceptibilité d'effondrement est en majorité faible à moyen mais avec des niveaux de confiance associés qualifiés de médiocres à moyens. Il conviendra d'être prudent dans l'interprétation des notes de susceptibilité d'effondrement fournies pour les territoires où le niveau de confiance accordé au diagnostic n'est pas bon ou certain.

A l'extrême sud de la région, où affleurent les formations de socle du nord du Massif Central, la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique est estimée nulle. Il en est de même pour une large bande de 80 km par 20 km concernant sept communes situées en contexte de craie séno-turonienne entre le sud du département du Loiret, le nord du Cher et l'est du Loir-et-Cher, pour lesquelles la susceptibilité d'effondrement est également considérée comme nulle.

Les communes de Romorantin-Lanthenay (41) et de Briare (45), dont le diagnostic de susceptibilité de présence de cavité karstique a fait l'objet d'une analyse approfondie au chapitre 4.1, sont classées toutes les deux avec une susceptibilité finale d'effondrement de niveau moyen. Le niveau de confiance accordé au diagnostic de susceptibilité finale d'effondrement est certain dans le cas de Romorantin-Lanthenay et bon dans le cas de Briare. Cependant les sources d'incertitudes mises en évidence dans l'analyse du diagnostic de susceptibilité de présence de cavité (i.e imprécision du modèle géologique et manque de représentativité de l'inventaire dans certains contextes) restent valables pour le diagnostic de susceptibilité d'effondrement. Les outils d'évaluation du niveau de confiance associé au diagnostic ne permettent pas de quantifier l'incertitude sur le résultat final due à ces sources d'erreurs.

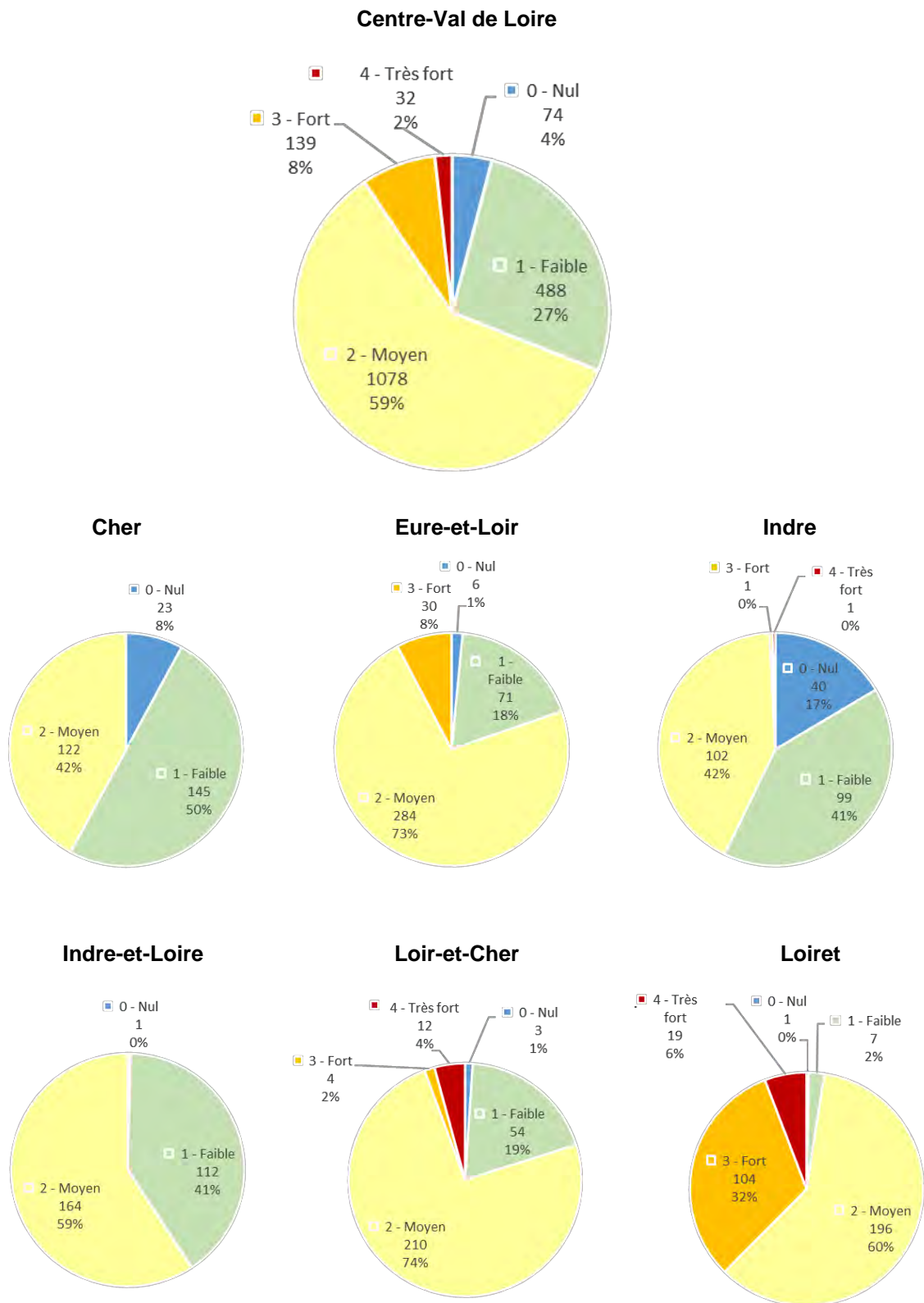


Illustration 71 : Proportion des communes concernées par chaque niveau de susceptibilité d'effondrement à l'échelle régionale et pour chaque département.

6.3. RECOMMANDATIONS ASSOCIEES AUX NIVEAUX DE SUSCEPTIBILITE

La méthodologie déroulée dans le cadre de cette étude conduit à une évaluation relative de l'exposition des communes à la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique à l'échelle régionale. Cette évaluation permet une hiérarchisation des territoires selon leur niveau d'exposition visant à mieux cibler les actions de prévention à mettre en place pour faire face au risque d'effondrement d'origine karstique.

Dans cette optique, des recommandations sont formulées pour chaque niveau de susceptibilité. Elles sont destinées à proposer aux services de l'Etat un panel de mesures qui pourront être adaptées aux contextes locaux et mises en œuvre via les outils réglementaires disponibles.

Les recommandations proposées sont synthétisées dans le tableau de l'illustration 72 et détaillées dans les paragraphes qui suivent.

Actions recommandées	Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique				
	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Information des collectivités et du public					
Information des communes et du public sur l'exposition de la commune au risque d'effondrement	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Connaissance et analyse du risque					
Signalement de toute découverte de cavité ou effondrement	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Réalisation d'un zonage des aléas mouvements de terrain liés aux cavités karstiques sur la base des connaissances existantes	Non	Non	Non	Oui	Oui
Gestion de crise					
Prise en compte du risque d'effondrement karstique dans la gestion de crise (PCS, ...)	Non	Non	Non	Oui	Oui

Illustration 72 : Synthèse des recommandations en fonction du niveau de susceptibilité d'effondrement karstique.

6.3.1. Recommandations applicables à l'ensemble du territoire

Toute cavité ou tout effondrement identifié devra être signalé aux services de l'Etat afin d'alimenter les bases de données nationales et affiner la connaissance du phénomène.

Pour mémoire, l'article L563-6 du Code de l'environnement stipule que :

« I. - Les communes ou leurs groupements compétents en matière de documents d'urbanisme élaborent, en tant que de besoin, des cartes délimitant les sites où sont situées des cavités souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol.

II. - Toute personne qui a connaissance de l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière dont l'effondrement est susceptible de porter atteinte aux personnes ou aux biens, ou d'un indice susceptible de révéler cette existence, en informe le maire, qui communique, sans délai, au représentant de l'Etat dans le département et au président du conseil général les éléments dont il dispose à ce sujet.

La diffusion d'informations manifestement erronées, mensongères ou résultant d'une intention dolosive relatives à l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière est punie d'une amende de 30 000 euros.

III. - Le représentant de l'Etat dans le département publie et met à jour, selon des modalités fixées par décret en Conseil d'Etat, la liste des communes pour lesquelles il a été informé par le maire de l'existence d'une cavité souterraine ou d'une marnière et de celles où il existe une présomption réelle et sérieuse de l'existence d'une telle cavité. »

Des démarches d'inventaires des cavités et effondrements complémentaires aux inventaires déjà réalisés pourront être entreprises si besoin, avec une priorité pour les territoires sur lesquels le niveau de confiance du diagnostic de susceptibilité d'effondrement est médiocre ou très incertain. Les données récoltées dans le cadre de ces inventaires devront être versées dans les bases de données nationales des mouvements de terrain (BD MVT) et des cavités souterraines (BD Cavité).

6.3.2. Recommandations associées au niveau de susceptibilité « Nul »

Aucune recommandation spécifique aux communes exposées à un niveau de susceptibilité nul n'est formulée. Il reste néanmoins nécessaire de prendre en compte la présence de cavité dans le dimensionnement des projets d'aménagement ou de construction dès lors que des indices de présence de cavités ou d'effondrements sont connus à proximité, et ce quel que soit le niveau de susceptibilité d'effondrement.

6.3.3. Recommandations associées aux niveaux de susceptibilité « Faible » et « Moyen »

Pour les communes exposées à une susceptibilité d'effondrement de niveau faible ou moyen, il est recommandé de prévoir une information des communes par les services de l'Etat de l'existence du risque. Cette information devra être transmises aux citoyens par les communes.

6.3.4. Recommandations associées aux niveaux de susceptibilité « Fort » et « Très fort »

Pour les communes dont le niveau d'exposition à la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique est qualifié de « fort » ou de « très fort », la réalisation d'un zonage des aléas mouvements de terrain liés aux cavités karstiques à une échelle adaptée aux documents d'urbanisme est également préconisée. Ce zonage se basera dans un premier temps sur les connaissances disponibles ou facilement accessibles (indices de terrain, archives, ...).

L'existence du risque d'effondrement karstique doit également être intégrée dans l'organisation de la gestion de crise communale. En particulier la concomitance d'effondrements avec des phénomènes d'inondation par débordement de cours d'eau ou par ruissellement doit être envisagée. En effet, le risque d'effondrement subsistant dans les zones inondées après le retrait des eaux est susceptible de ralentir le retour à une situation normale.

7. Conclusion

La démarche entreprise a permis la quantification de la susceptibilité d'effondrement de cavité karstique sur l'ensemble du territoire de la région Centre-Val de Loire. La méthodologie adoptée visait à pallier les hétérogénéités de répartition spatiale des données d'inventaire et les incertitudes associées au jugement d'expert. Néanmoins la méthodologie ne permet pas de s'affranchir de certaines sources d'incertitudes telles que le manque de données d'inventaire généralisé pour un contexte particulier ou l'imprécision des données utilisées pour la cartographie des facteurs.

A l'issue de l'étude, 32 communes de la région s'avèrent être exposées à une susceptibilité d'effondrement de niveau « Très fort ». 138 communes sont concernées par une susceptibilité de niveau « Fort », 1 079 communes par une susceptibilité de niveau « Moyen », 488 communes par une susceptibilité de niveau « Faible » et 74 communes par une susceptibilité de niveau « Nul ».

L'analyse, menée à l'échelle régionale, n'a pas la résolution suffisante pour être exploitable directement à l'échelle des documents d'urbanismes tels que le PPR. Néanmoins elle apporte aux services de l'Etat les moyens de hiérarchiser les communes de la région pour lesquelles des actions de prévention sont à mettre en place de façon prioritaire. Dans cette optique, des recommandations associées à chaque niveau de susceptibilité sont proposées. Elles sont destinées à fournir aux services de l'Etat un panel de mesures qui pourront être adaptées aux contextes locaux et mises en œuvre via les outils réglementaires disponibles.

Par ailleurs, cette étude réalisée sur la base des connaissances et des données existantes pointe, d'une part, la nécessité de poursuivre les efforts de recensement systématique des cavités et des effondrements et, d'autre part, le besoin d'approfondir la connaissance des mécanismes à l'origine des effondrements en fonction du contexte local.

8. Bibliographie

Alboresha, Rafid. 2016. *Evaluation of the impact of a cavity upon an earth dike (analytical and numerical approaches) - Application to the Val d'Orléans area (France)*. Université de Lorraine. 2016. Thèse de doctorat.

Allier, Delphine, et al. 2011. *Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes*. 2011. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-59890-FR.

Coolbaugh, Mark F. et Bedell, Richard. 2006. A simplification of weights of evidence using en density function and fuzzy distributions; Geothermal Systems, Nevada. *GIS for the Earth Sciences*. 2006, Vol. 44, pp. 115-130.

Desprez, C. et Martins, C. 1977. *Aménagement du Val d'Orléans, Etude Hydrogéologique*. 1977. Rapport BRGM 77 SGN582-BDP.

Donsimoni, M., et al. 2008. *Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales du bassin de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels - Tranche 1 : analyse géologique et hydrogéologique*. 2008. Rapport final. BRGM/RP-55711-FR.

Durand, Edouard. 2016. *Fiche d'intervention sur site du 05/07/2016. PCD n°383. Cerema. 2016.*

Fontaine, Mélanie, Nachbaur, Aude et Rohmer, Jérémy. 2008. *Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées. BRGM. 2008. Rapport final. BRGM/RP-56275-FR.*

Galve, A., et al. 2009. Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*. 2009, Vol. 111, 3-4, pp. 160-172.

Giot, D., et al. 2003. *Cartographie de l'aléa global relatif à la présence de cavités souterraines et de désordres de surface concernant le département du Loiret. 2003. Rapport BRGM/RP-52491-FR.*

Greffié, C. et Mercier, L. 2013. *Inventaire départemental des mouvements de terrain du Cher. Rapport final. 2013. Rapport. BRGM/RP-62757-FR.*

—. 2013. *Inventaire départemental des mouvements de terrain du Loiret. Rapport final. 2013. Rapport. BRGM/RP-62722-FR.*

Greffié, C. et Parillaud, G. 2016. *Inventaire départemental des mouvements de terrain de l'Eure-et-Loir. Rapport final*. 2016. Rapport. BRGM/RP-66587-FR.

—. 2017. *Inventaire départemental des mouvements de terrain du Loir-et-Cher. Rapport final*. 2017. Rapport. BRGM/RP-66588-FR.

Greffié, Catherine. 2015. *Inventaire départemental des mouvements de terrain de l'Indre et Loire. Rapport final*. 2015. Rapport. BRGM/RP-64393-FR.

—. 2015. *Inventaire départemental des mouvements de terrain de l'Indre. Rapport final*. 2015. Rapport. BRGM/RP-64394-FR.

Mardhel, Vincent, et al. 2004. Index of development and Persistence of the River networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. *Groundwater vulnerability assessment and mapping*. 2004.

Nachbaur, Aude et Rohmer, Jérémy. 2011. Managing expert-information uncertainties for assessing collapse susceptibility of abandoned underground structures. *Engineering Geology*. 2011, Vol. 123, pp. 166-178.

Noury, Gildas, et al. 2017. *Retour d'expérience sur les mouvements de terrains liés à des cavités survenus dans le Loiret suite à la crise météo du printemps 2016. Rapport final.* 2017. Rapport. BRGM/Rp-66462-FR.

Noury, Gildas, et al. 2018. Role of floods on sinkhole occurrence in covered karst terrains: case study of the Orléans area (France) during the 2016 meteorological event and perspectives for other karst environments. *15th Sinkhole Conference.* Avril 2018.

Parillaud, Gaëtan. 2015. *Les mouvements de terrain en région Centre : Recensement, hiérarchisation des phénomènes et contribution à l'élaboration de la susceptibilité d'effondrement des cavités souterraines karstiques en domaine calcaire.* Institut Polytechnique LaSalle Beauvais. 2015. Mémoire de Technicien Supérieur Professionnel en Géologie.

Perrin, Jérôme, et al. 2015. A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weight-of-evidence analysis. *Engineering Geology.* 2015, Vol. 197, pp. 396-305.

Perrin, Jérôme, et al. 2013. *ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques. Année 1 : bibliographie et étude de sites.* 2013. Rapport. BRGM/RP-62595-FR.

Perrin, Jérôme, et al. 2016. Les fontis du Val d'Orléans : Etude des mécanismes de formation afin d'améliorer la prévision. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. 2016.

Vanoudheusden, Emilie. 2014. *Cartographie de la susceptibilité de présence de cavités karstiques en Région Centre*. 2014. Rapport. BRGM/RP-62816-FR.

Waltham, Tony. 2008. Sinkhole hazard case histories in karst terrains. *Quarterly Journal of engineering Geology and Hydrogeology*. 2008, Vol. 41, 3, pp. 291-300.

Zadeh, L.A. 1965. "Fuzzy Sets". *Information and Control*. 1965, Vol. 8, pp. 338-353.

Annexe 1

Principes théoriques d'évaluation quantitative d'un niveau de susceptibilité – Méthodologie « scénario cavité » (Fontaine, et al., 2008)

Méthodologie Scénario Cavité

Les principes méthodologiques utilisés pour quantifier le niveau de susceptibilité, sont inspirés de la méthodologie « scénario cavité » (Fontaine, et al., 2008) développée par le BRGM dans le cadre d'une convention avec le Ministère de l'Environnement.

Au cœur de la méthode, l'expert synthétise et interprète l'information souvent imprécise, voire vague, résultant de l'inventaire et du contexte géologique, sur la base de son expérience et de sa connaissance régionale (Nachbaur, et al., 2011). La méthode fournit ensuite des outils analytiques qui mettent en valeur ce processus d'expertise tout en intégrant plusieurs formes d'incertitude qui entachent habituellement les procédures d'analyses de risque : subjectivité de la pondération, effet de seuil, « boîte noire », non exhaustivité de l'inventaire.

Ces outils sont adaptés d'une part de la « théorie des évidences » pour palier à l'hétérogénéité de répartition des données, et d'autre part, de la logique floue pour palier à l'imprécision et au manque de données. Ces deux outils sont particulièrement adaptés à l'échelle départementale ou régionale, quand des données géotechniques ou hydrogéologiques ne sont pas disponibles.

Les deux principes théoriques sont présentés ci-dessous.

A – La théorie des évidences

Dans le cadre de la méthodologie nationale, un outil spécifique a été développé pour quantifier le niveau de susceptibilité associé à une information d'expert qualitative.

La théorie des évidences (« Weight of evidence ») est utilisable pour quantifier convenablement l'influence de facteurs explicatifs dont le caractère qualitatif exigeait habituellement le poids arbitraire et subjectif d'un jugement d'expert. Initialement développée pour l'exploration minière, la théorie des évidences dérive de la théorie probabiliste de Bayes qui exprime la modification apportée par la réalisation d'un événement B (l'occurrence d'un facteur explicatif), à la probabilité de réalisation *a priori* de l'événement G (l'effondrement), notée $p(G)$. Dans ce cas, la probabilité *a posteriori* de réalisation de G, notée $P(G|B)$, est donnée par l'équation 1. Ces événements supplémentaires, appelés « évidences », correspondent ici aux facteurs explicatifs identifiés. En tout point de l'espace Ω est associée la probabilité de réalisation de l'évidence B.

$$\text{Équation 1} \qquad P(G|B) = \frac{p(B|G) \cdot p(G)}{p(B)}$$

Avec :

- G : l'événement ou phénomène géologique redouté : « occurrence d'un effondrement » ;
- B : l'évidence : « occurrence d'un facteur explicatif ».

Le « poids des évidences » W mesure alors la modification en terme de probabilité qu'apporte la présence du facteur explicatif B à la réalisation du phénomène géologique redouté (Équation 2)

$$\text{Équation 2} \qquad W = \log \left(\frac{p(B|G)}{p(B|\bar{G})} \right) \approx \log(D_i)$$

Dans la pratique, pour évaluer un indice de susceptibilité relatif à un critère de nature qualitative, le principe consiste à décomposer le secteur étudié en unités spatiales homogènes vis-à-vis de ce critère. Chaque unité spatiale sera ensuite associée à une densité de cavités D_i unique calée sur les événements observés (issus de l'inventaire). Dans le cas des effondrements, nous définissons la fonction de densité D_i par l'équation 3

Équation 3

$$D_{\text{unité}} = \frac{\frac{N_{\text{unité}}}{N_{\text{total}}}}{\frac{S_{\text{unité}}}{S_{\text{total}}}}$$

Avec : $\sum_i^n S_{\text{unité}} = S_{\text{total}}$ et $\sum_i^n N_{\text{unité}} = N_{\text{total}}$

- $N_{\text{unité}}$: nombre d'événements dans l'unité spatiale ;
- N_{total} : nombre total d'événement ;
- $S_{\text{unité}}$: surface de l'unité spatiale ;
- S_{total} : surface totale.

Cette approximation n'est valable que si les événements comptabilisés occupent une surface négligeable devant celle des unités considérées (Coolbaugh, et al., 2006), ce qui est le cas avec les effondrements localisés à l'échelle spatiale ciblée.

En attribuant une densité unique à chaque unité spatiale, cette méthode permet de propager une information qualitative tout en étant rigoureux sur le poids attribué, en s'affranchissant d'une pondération théorique abusive. La concentration d'information ne guide plus l'analyse ; les niveaux de susceptibilité obtenus ne privilégient pas les secteurs les plus documentés.

Le principe n'exige que la représentativité des données collectées pour que les ratios restent suffisamment discriminants et donnent plus de poids au nombre de désordres qu'à leur taille ou à leur fréquence.

B – La logique floue

En parallèle, un outil spécifique a été développé pour quantifier le niveau de susceptibilité associé à un facteur explicatif associé à une variable quantitative.

La logique floue (Zadeh, 1965) est particulièrement adaptée pour formaliser des raisonnements empiriques et intuitifs que peuvent établir les experts à partir de données imprécises et peu nombreuses. Elle permet notamment de gérer les effets de seuils habituellement introduits au niveau des limites de classe.

Dans le théorique classique de logique booléenne, on définit μ , la fonction d'appartenance d'un élément x à un ensemble X , comme binaire qui prend la valeur 1 si l'élément appartient à X et 0 sinon. Face à une information entachée d'incertitude, il apparaît parfois difficile de définir avec précision la frontière d'un ensemble X . La théorie de la logique floue introduit la notion de frontière « floue », qui se traduit mathématiquement par une fonction d'appartenance continue dans l'intervalle $[0 ; 1]$. Graphiquement cela se traduit par une frontière graduelle (Figure 1). L'élément x_2 de la figure 1B, situé dans la zone « floue » entre les frontières « certaines », est associé à un degré d'appartenance de 0,6, alors qu'il est totalement exclu de l'ensemble A dans la théorie classique.

Un ensemble flou M est un sous-ensemble d'une grandeur physique X (profondeur, distance, ...). La logique floue permet d'associer à chacune des valeurs de cet ensemble un degré d'appartenance à la réalisation de l'événement redouté.

$$\mu_M : X \rightarrow [0,1]$$
$$M = \{x, \mu_M(x) / x \in M; M \subset X\}$$

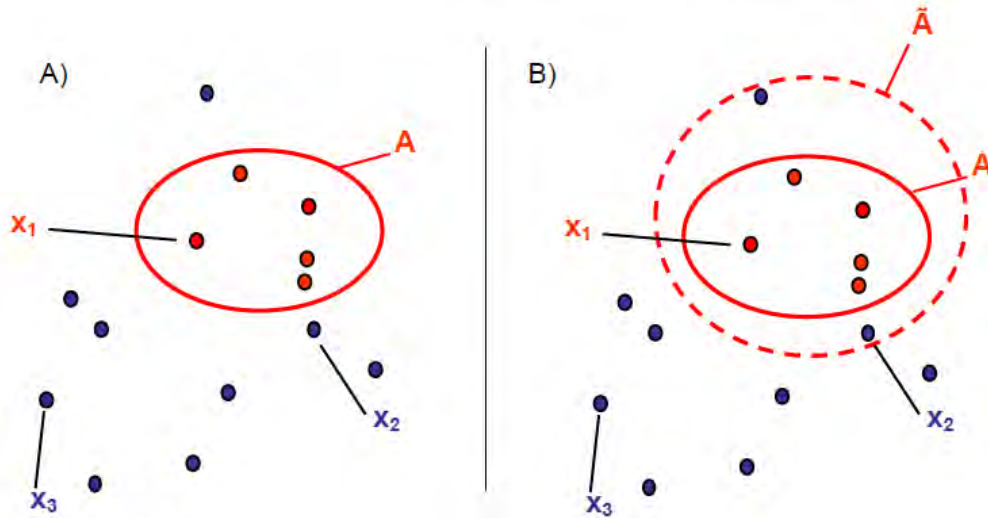


Figure 1 : Représentation graphique de la théorie des ensembles A) dans la théorie booléenne classique, et B) dans la théorie des ensembles flous (Nachbaur, et al., 2011).

Annexe 2

Niveaux d'exposition à la susceptibilité d'effondrement d'origine karstique par commune

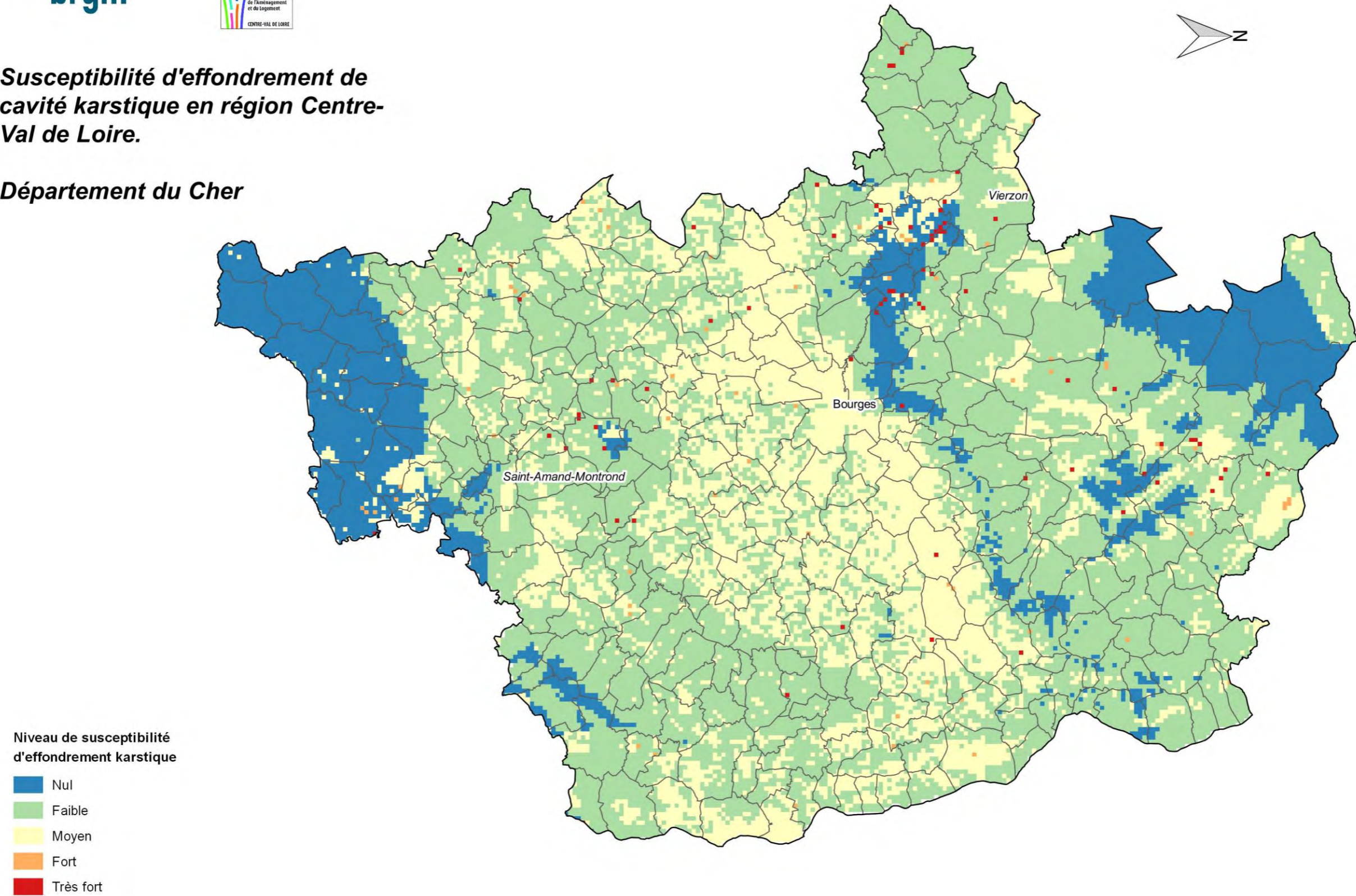
Exposition des communes du département du Cher à la susceptibilité d'effondrement karstique

Cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavités karstiques en région Centre – Val de Loire

Dpt	N° INSEE	Nom	Surface totale	Surface urbanisée	Effondrements recensés	Susceptibilité moyenne	Pourcentage de la commune concernée par une susceptibilité de niveau :					Niveau de susceptibilité max concernant au moins 10% du territoire communal	Niveau de susceptibilité majoritaire sur la commune	Pourcentage de la surface urbanisée concernée par une susceptibilité de niveau :					Niveau de susceptibilité max concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune	Niveau de susceptibilité retenu	Niveau de confiance du diagnostic
							Nul	Faible	Moy.	Fort	Très fort			Nul	Faible	Moy.	Fort	Très fort			
18	18285	Villeneuve-sur-Cher	26.5 km ²	0.0 km ²	0	0.31	0.0 %	13.7 %	85.4 %	0.9 %	0.0 %	2 - Moyen	2 - Moyen	-	-	-	-	-	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
18	18286	Villequiers	30.0 km ²	0.3 km ²	0	0.18	0.0 %	59.0 %	41.1 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	1 - Faible	0.0 %	56.5 %	43.5 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	2 - Moyen	Médiocre
18	18287	Vinon	18.3 km ²	0.0 km ²	0	0.20	2.7 %	56.3 %	41.2 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Moyen	
18	18288	Vorly	18.6 km ²	0.0 km ²	1	0.22	0.0 %	33.1 %	67.0 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	2 - Moyen	Médiocre
18	18289	Vornay	26.7 km ²	0.0 km ²	1	0.33	0.0 %	27.9 %	72.2 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	2 - Moyen	-	-	-	-	-	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
18	18290	Vouzeron	52.8 km ²	0.3 km ²	0	0.16	0.0 %	65.5 %	34.6 %	0.0 %	0.0 %	2 - Moyen	1 - Faible	0.0 %	100.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	1 - Faible	1 - Faible	Certain

Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre- Val de Loire.

Département du Cher





Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

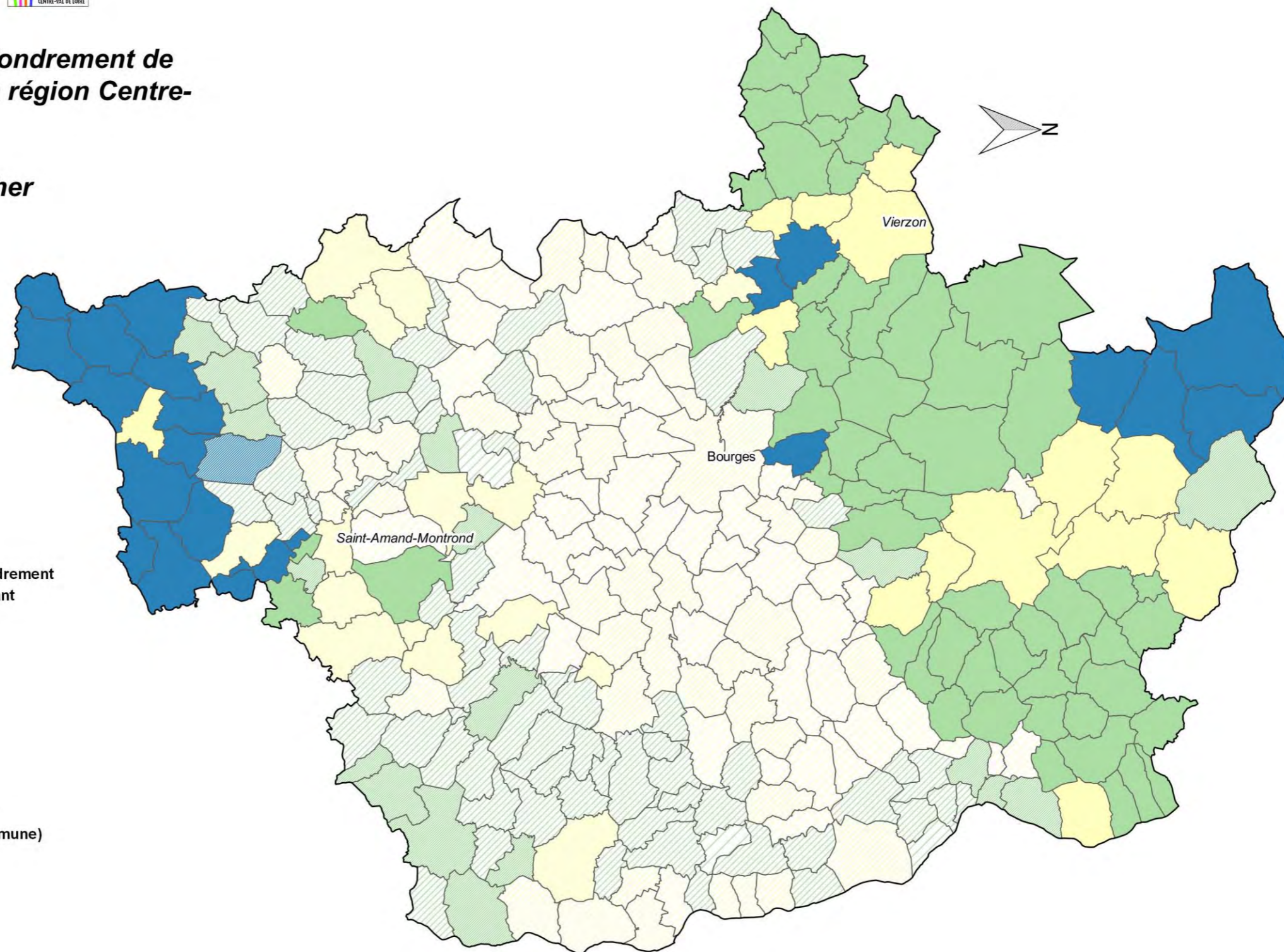
Département du Cher

Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique le plus élevé concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Niveau de confiance associé au diagnostic (moyenne sur la commune)

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain



Exposition des communes du département d'Eure-et-Loir à la susceptibilité d'effondrement karstique

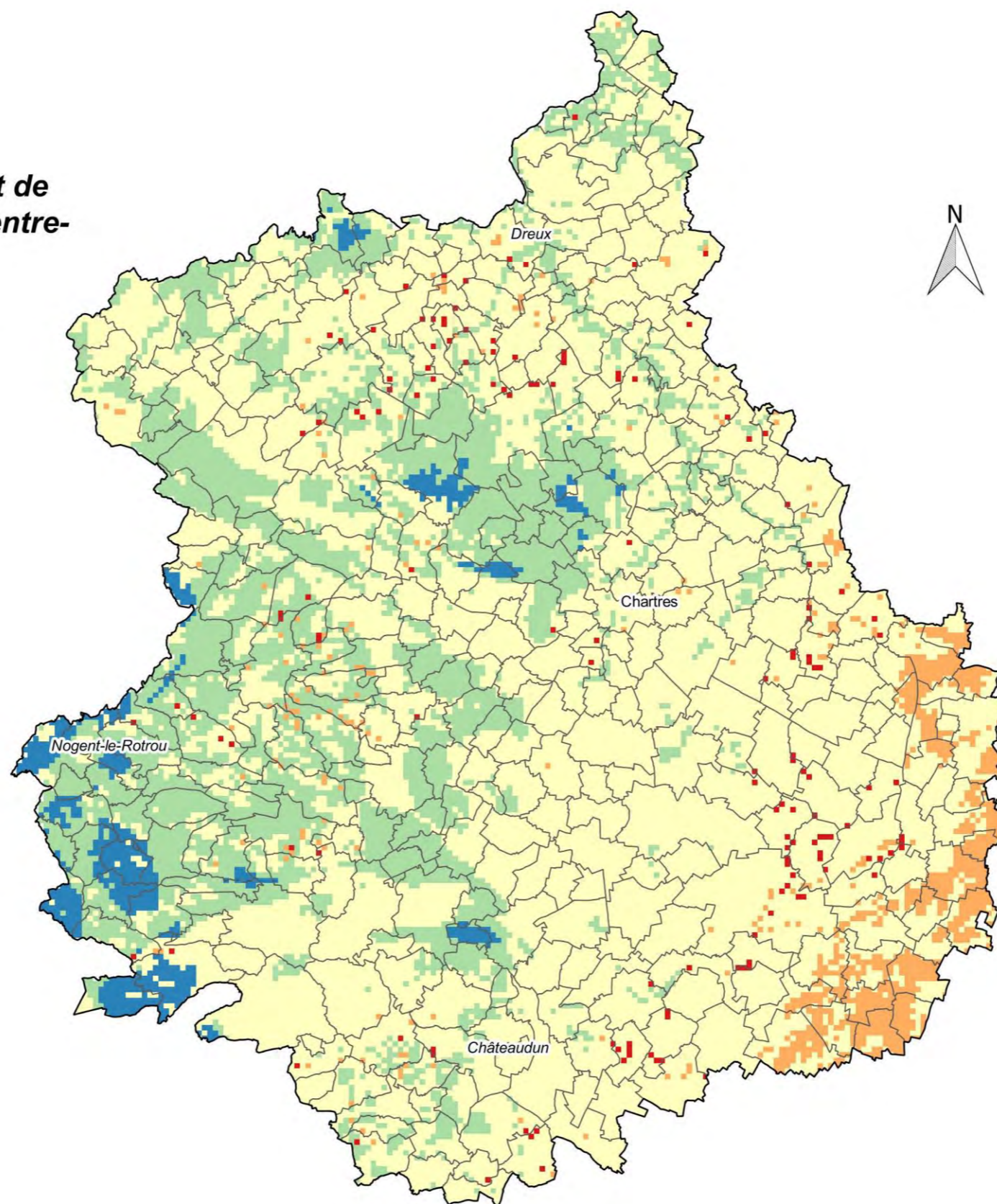


Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

Département d'Eure-et-Loir

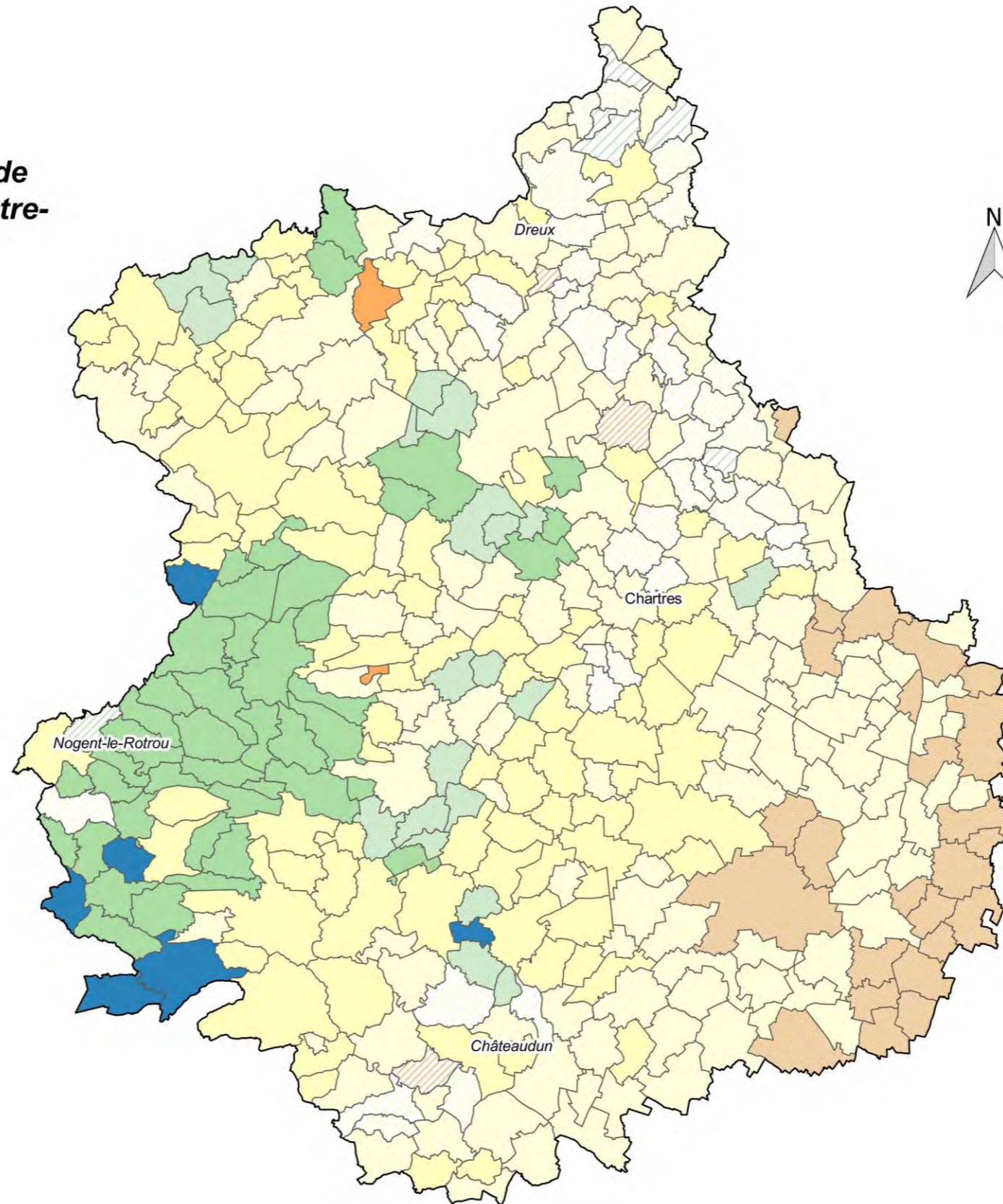
Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique

-  Nul
-  Faible
-  Moyen
-  Fort
-  Très fort



**Susceptibilité d'effondrement de
 cavité karstique en région Centre-
 Val de Loire.**

Département d'Eure-et-Loir



Niveau de susceptibilité d'effondrement
 karstique le plus élevé concernant
 au moins 10% de la surface
 urbanisée de la commune

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Niveau de confiance associé au
 diagnostic (moyenne sur la commune)

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

Exposition des communes du département de l'Indre à la susceptibilité d'effondrement karstique

Dpt.	N° INSEE	Nom	Surface totale	Surface urbanisée	Effondrements recensés	Susceptibilité moyenne	Pourcentage de la commune concernée par une susceptibilité de niveau :					Niveau de susceptibilité max concernant au moins 10% du territoire communal	Niveau de susceptibilité majoritaire sur la commune	Pourcentage de la surface urbanisée concernée par une susceptibilité de niveau :					Niveau de susceptibilité max concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune	Niveau de susceptibilité retenu	Niveau de confiance du diagnostic
							Nul	Faible	Moy.	Fort	Très fort			Nul	Faible	Moy.	Fort	Très fort			
36	36218	Sougé	13.1 km²	0.0 km²	4	0.19	0.0%	55.4%	44.7%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Médiocre
36	36219	Tendu	42.1 km²	0.3 km²	42	0.33	0.0%	44.7%	54.7%	0.6%	1.3%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Bon
36	36220	Thenay	34.4 km²	0.8 km²	22	0.25	0.0%	67.9%	31.5%	0.0%	0.7%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	80.5%	19.7%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36221	Thevet-Saint-Julien	31.2 km²	0.3 km²	0	0.17	0.0%	95.3%	4.4%	0.4%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36222	Thizay	16.8 km²	0.0 km²	0	0.33	0.0%	23.0%	77.1%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	-	-	-	-	-	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36223	Tilly	14.8 km²	0.0 km²	0	0.17	32.0%	50.9%	13.8%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Bon
36	36224	Tournon-Saint-Martin	25.8 km²	1.7 km²	2	0.21	0.0%	54.1%	46.0%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	76.3%	23.8%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Bon
36	36225	Le Tranger	22.3 km²	0.0 km²	0	0.16	0.0%	78.8%	20.9%	0.0%	0.4%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Médiocre
36	36226	Tranzault	18.1 km²	0.0 km²	0	0.17	0.0%	74.0%	26.1%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36227	Urciers	19.0 km²	0.4 km²	0	0.01	96.9%	0.0%	3.2%	0.0%	0.0%	0 - Nul	0 - Nul	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 - Nul	0 - Nul	Certain
36	36228	Valençay	41.7 km²	2.0 km²	1	0.52	0.0%	25.8%	71.5%	3.4%	0.6%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	57.4%	42.6%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36229	Val-Fouzon	47.0 km²	0.4 km²	0	0.29	0.0%	59.2%	39.5%	0.0%	1.3%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Certain
36	36230	Vatan	29.9 km²	1.9 km²	0	0.13	19.4%	66.5%	14.3%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	59.4%	40.7%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Bon
36	36231	Velles	64.0 km²	0.6 km²	4	0.47	0.0%	43.8%	52.2%	0.6%	3.5%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	51.6%	48.5%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Bon
36	36232	Vend'uvres	98.8 km²	0.5 km²	0	0.57	0.3%	67.1%	23.7%	5.7%	3.8%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Très incertain
36	36233	La Vernelle	17.2 km²	0.5 km²	0	0.22	0.0%	65.5%	32.9%	1.7%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	68.3%	31.9%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Certain
36	36234	Verneuil-sur-Igneraie	9.9 km²	0.5 km²	0	0.20	0.0%	97.1%	0.0%	3.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	0.0%	100.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36235	Veuil	18.8 km²	0.0 km²	0	0.21	0.0%	61.7%	37.1%	1.2%	0.1%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Certain
36	36236	Vicq-Exempt	38.9 km²	0.0 km²	0	0.18	0.0%	77.0%	23.1%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36237	Vicq-sur-Nahon	49.1 km²	0.5 km²	0	0.40	0.0%	54.8%	45.3%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Certain
36	36238	Vigoulant	9.8 km²	0.0 km²	0	0.03	91.4%	6.5%	2.0%	0.0%	0.0%	0 - Nul	0 - Nul	-	-	-	-	-	0 - Nul	0 - Nul	Certain
36	36239	Vigoux	38.0 km²	0.3 km²	0	0.18	7.3%	69.1%	23.1%	0.7%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	100.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36240	Vijon	21.3 km²	0.0 km²	0	0.01	95.6%	2.4%	1.4%	0.0%	0.0%	0 - Nul	0 - Nul	-	-	-	-	-	0 - Nul	0 - Nul	Certain
36	36241	Villedieu-sur-Indre	58.4 km²	3.2 km²	1	0.20	0.0%	56.1%	44.9%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	0.0%	65.7%	34.4%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36242	Villegongis	18.2 km²	0.0 km²	4	0.25	0.0%	15.3%	84.8%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	-	-	-	-	-	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36243	Villegouin	24.3 km²	0.0 km²	0	0.02	3.1%	95.0%	2.1%	0.0%	0.0%	1 - Faible	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36244	Villentrois	32.5 km²	0.3 km²	1	0.51	0.0%	25.2%	74.9%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	33.2%	66.8%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36246	Villiers	24.9 km²	0.0 km²	0	0.10	0.0%	86.8%	13.3%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	1 - Faible	-	-	-	-	-	1 - Faible	1 - Faible	Moyen
36	36247	Vineuil	44.5 km²	0.7 km²	11	0.25	0.0%	17.9%	82.2%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	27.9%	72.3%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Moyen
36	36248	Vouillon	15.1 km²	0.3 km²	0	0.36	0.0%	37.9%	62.2%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	0.0%	24.9%	75.1%	0.0%	0.0%	2 - Moyen	2 - Moyen	Médiocre

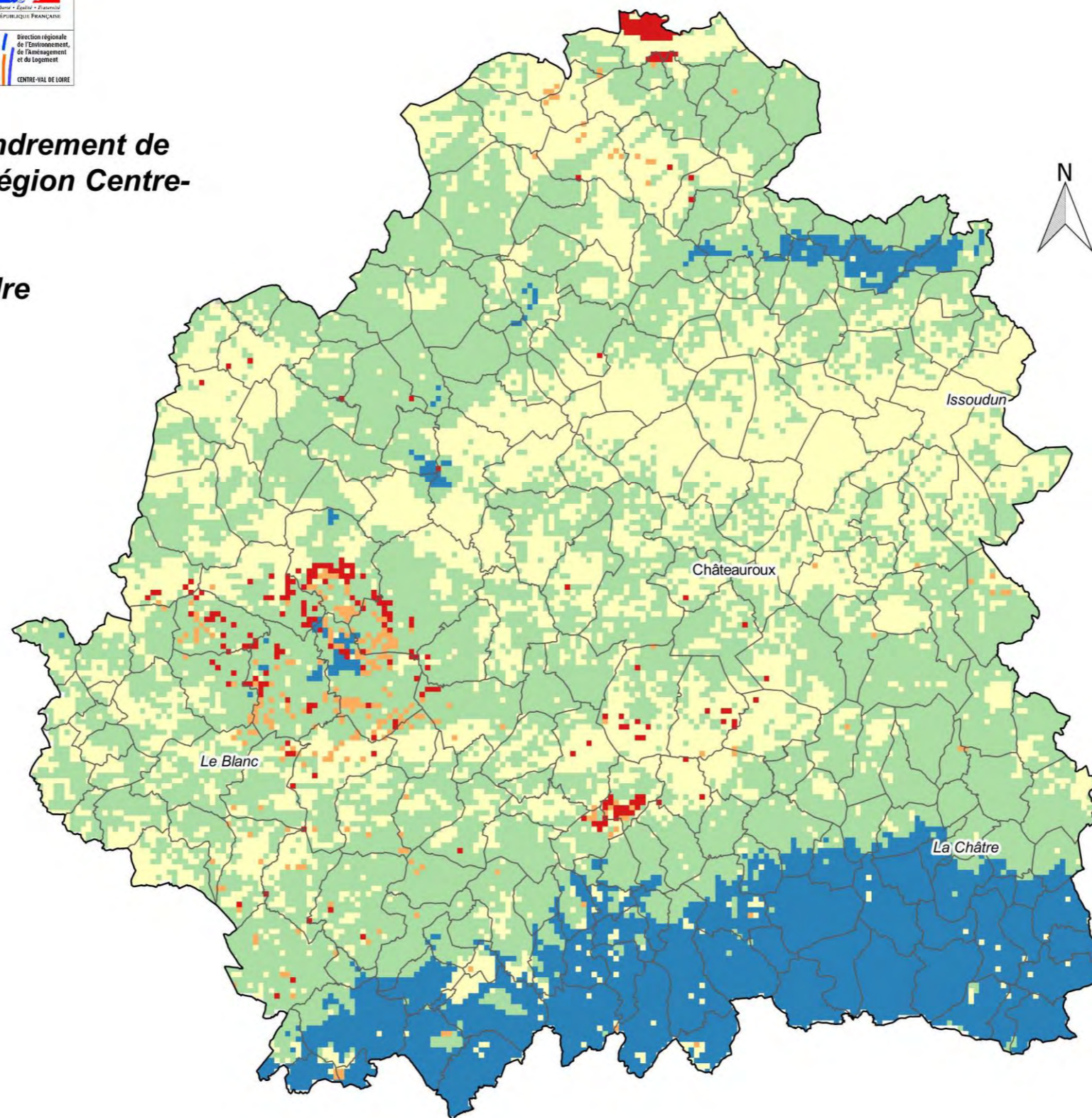


Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

Département de l'Indre

Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique

-  Nul
-  Faible
-  Moyen
-  Fort
-  Très fort



Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

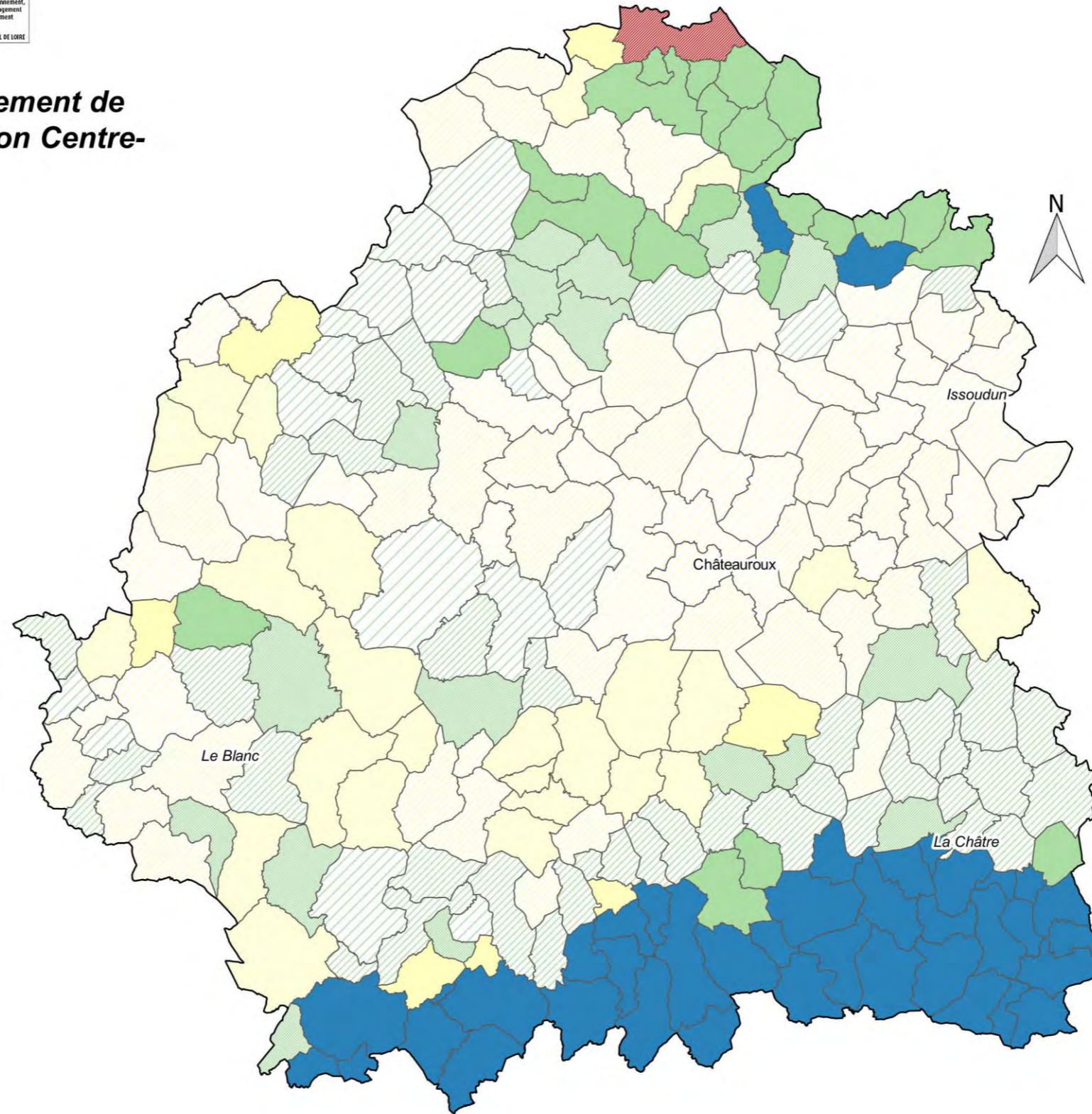
Département de l'Indre

Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique le plus élevé concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Niveau de confiance associé au diagnostic (moyenne sur la commune)

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

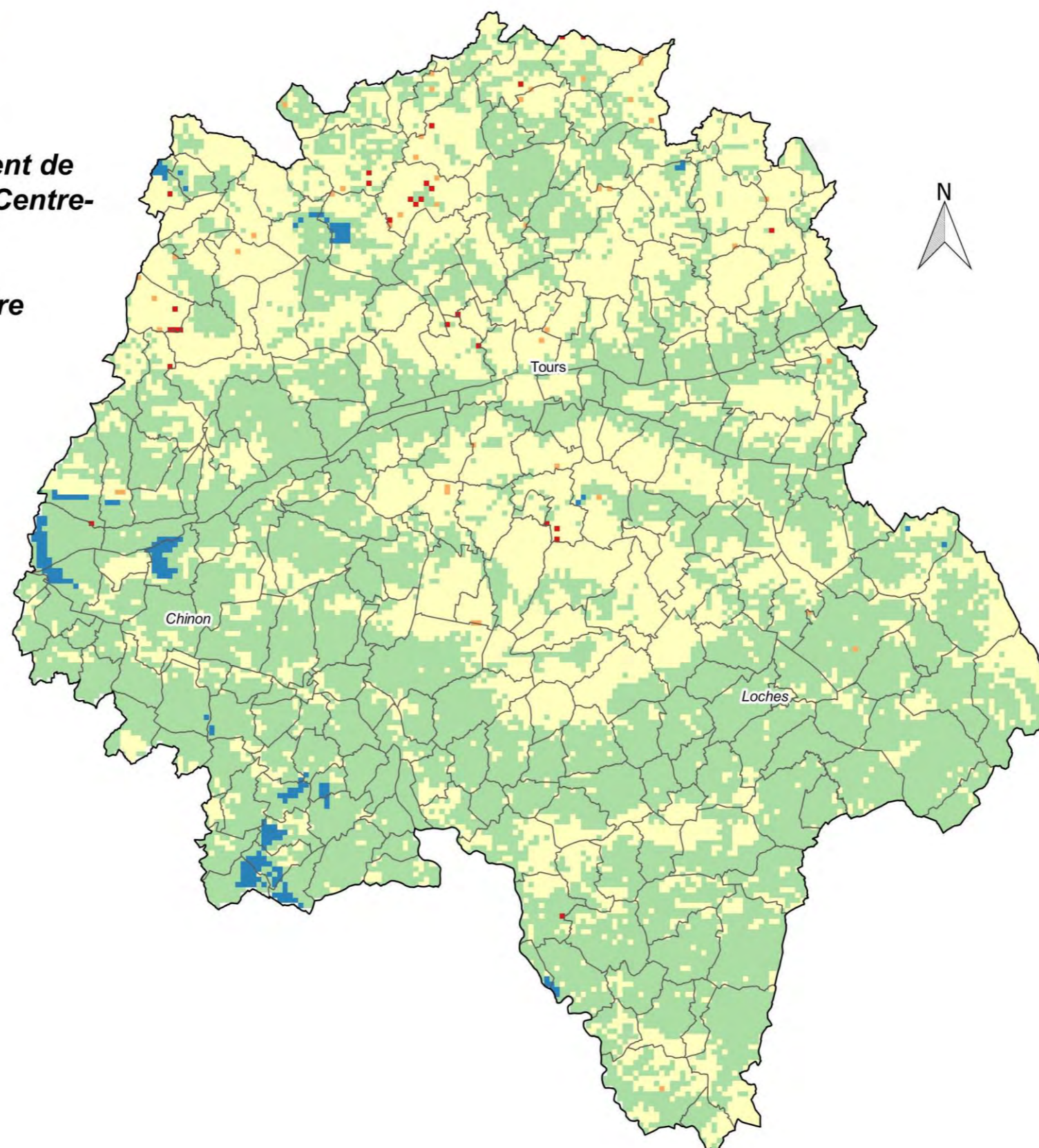


Exposition des communes du département d'Indre-et-Loire à la susceptibilité d'effondrement karstique



Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

Département d'Indre-et-Loire

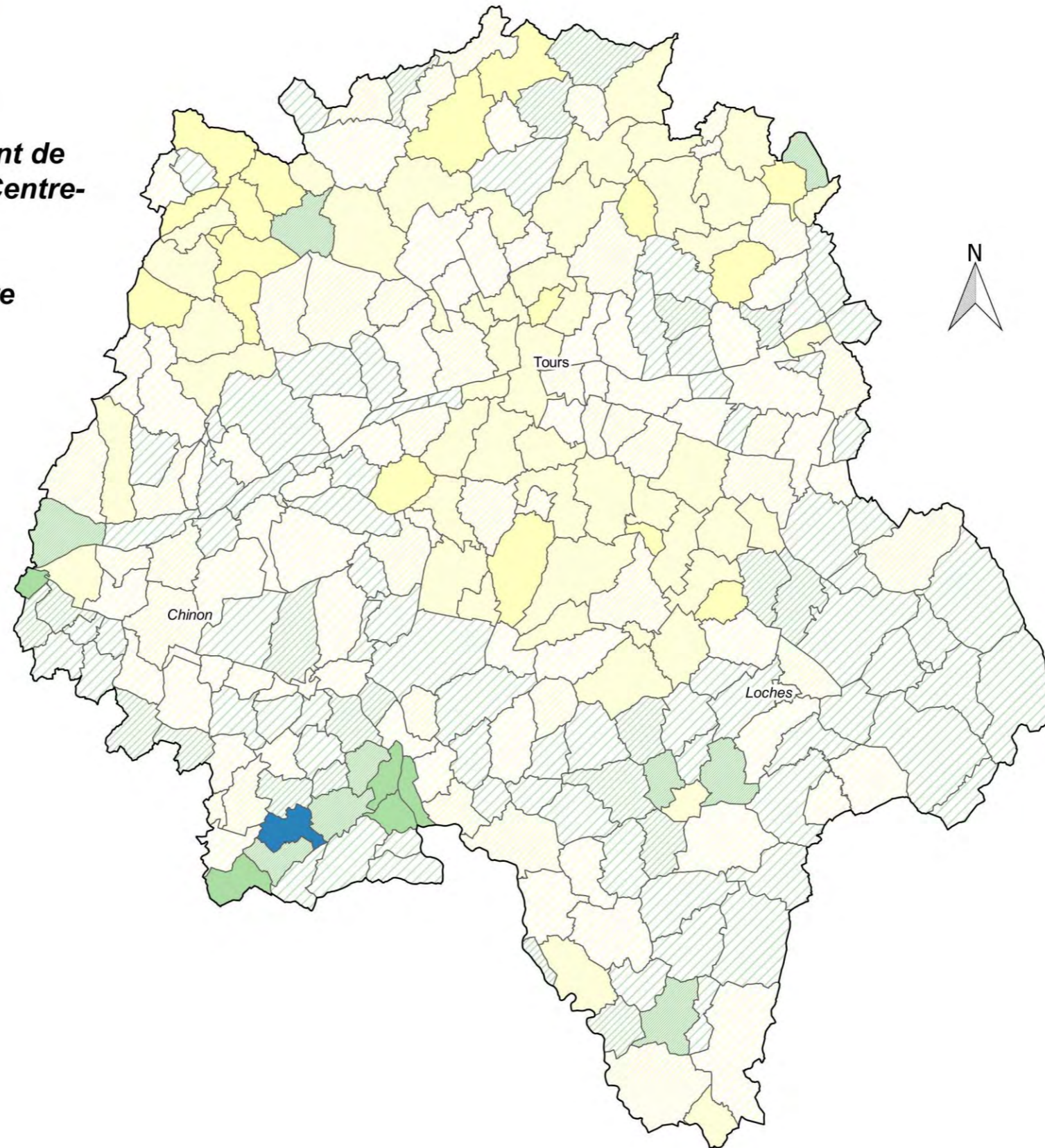


Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

Département d'Indre-et-Loire



Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique le plus élevé concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

Niveau de confiance associé au diagnostic (moyenne sur la commune)

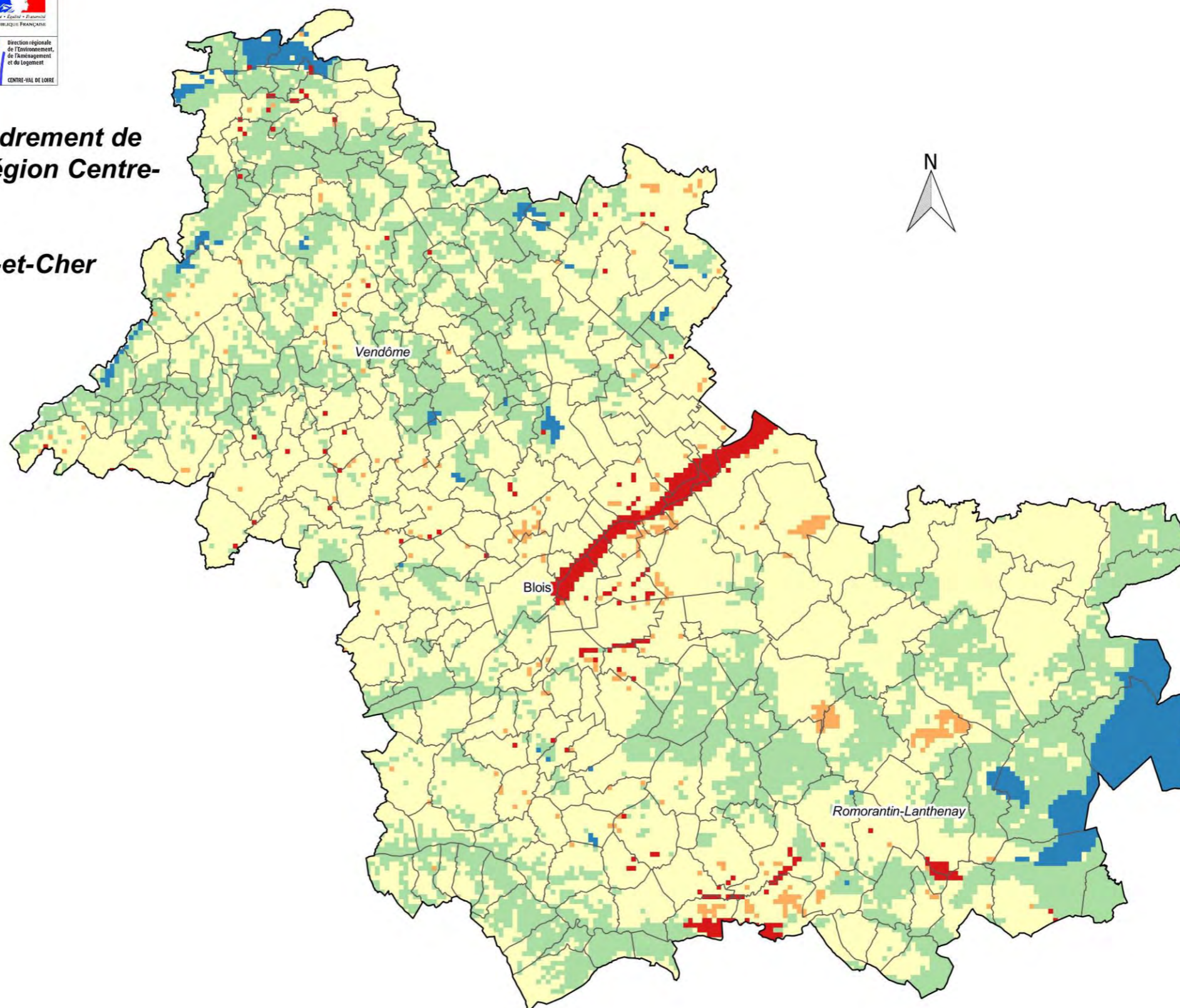
- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

Exposition des communes du département du Loir-et-Cher à la susceptibilité d'effondrement karstique



Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

Département du Loir-et-Cher

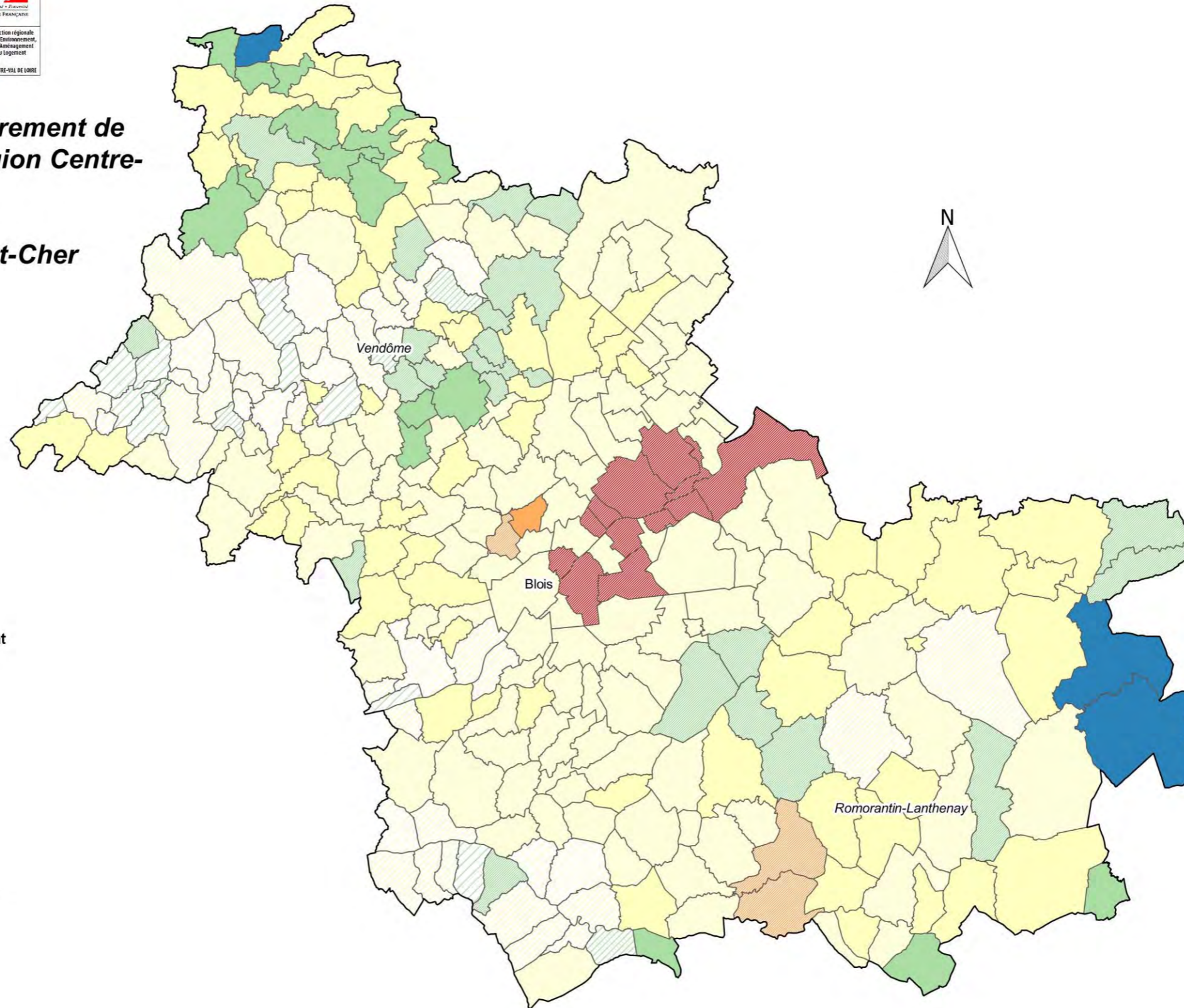


Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

**Susceptibilité d'effondrement de
cavité karstique en région Centre-
Val de Loire.**

Département du Loir-et-Cher



Niveau de susceptibilité d'effondrement
karstique le plus élevé concernant
au moins 10% de la surface
urbanisée de la commune

- Nul
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort

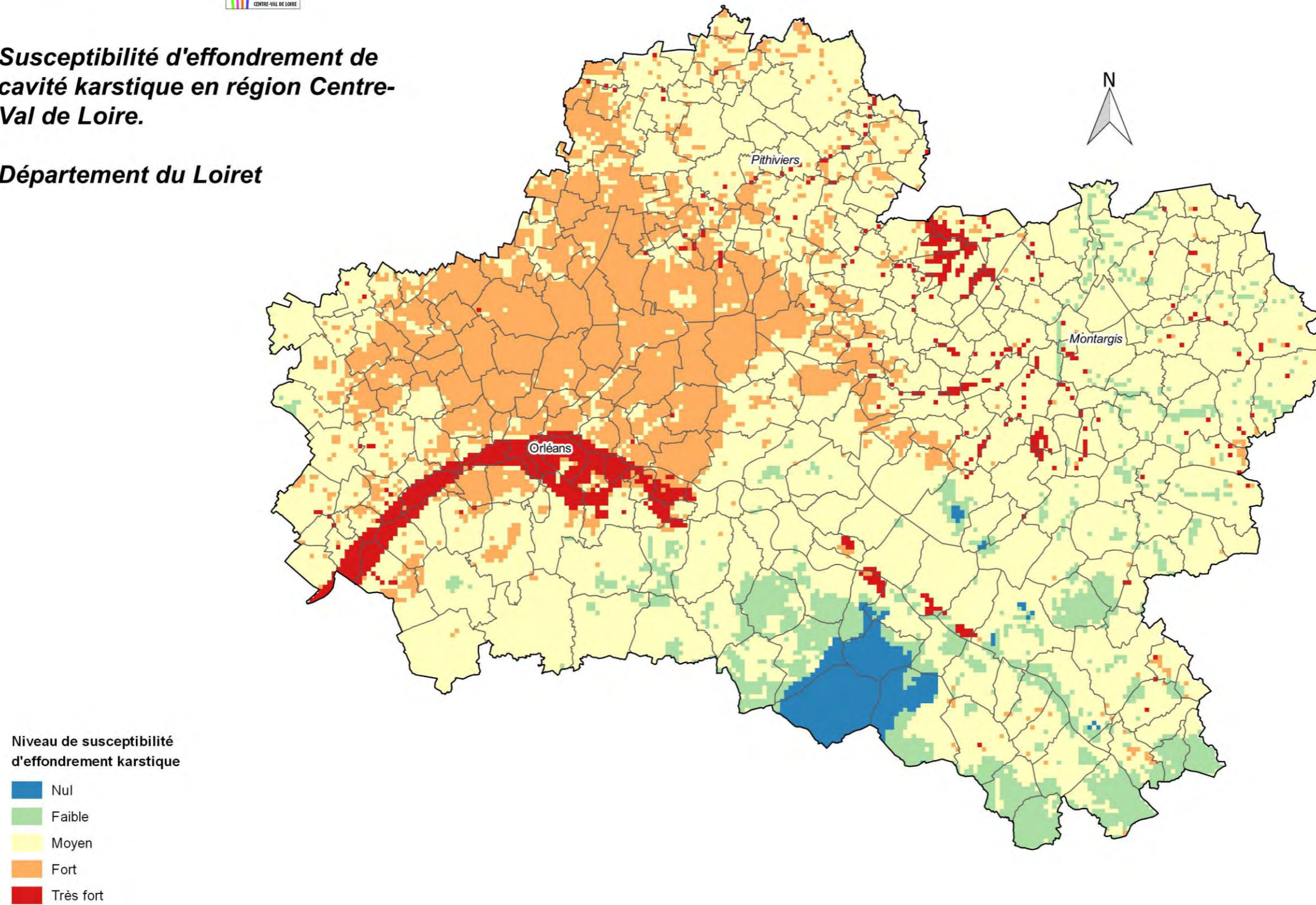
Niveau de confiance associé au
diagnostic (moyenne sur la commune)

- Très incertain
- Médiocre
- Moyen
- Bon
- Certain

Exposition des communes du département du Loiret à la susceptibilité d'effondrement karstique

Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre- Val de Loire.

Département du Loiret






Susceptibilité d'effondrement de cavité karstique en région Centre-Val de Loire.

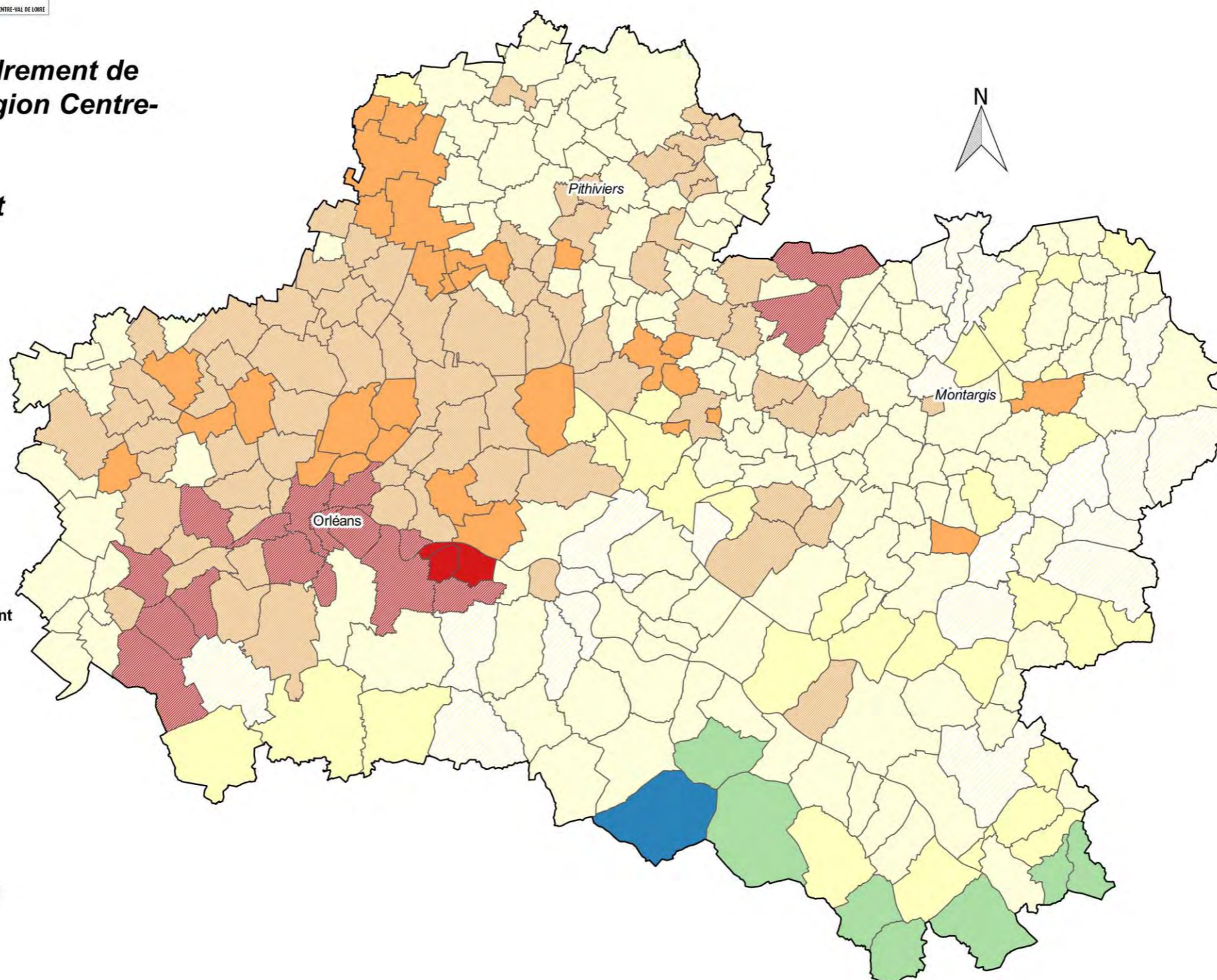
Département du Loiret

Niveau de susceptibilité d'effondrement karstique le plus élevé concernant au moins 10% de la surface urbanisée de la commune

-  Nul
-  Faible
-  Moyen
-  Fort
-  Très fort

Niveau de confiance associé au diagnostic (moyenne sur la commune)

-  Très incertain
-  Médiocre
-  Moyen
-  Bon
-  Certain





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Centre-Val de Loire

3, avenue Claude Guillemin
BP36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 31 92