



Évaluation de l'exposition aux risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura zone pilote (phase 1)

Rapport final

BRGM/RP-59386-FR
Janvier 2011



Évaluation de l'exposition aux risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura zone pilote (phase 1)

Rapport final

BRGM/RP-59386-FR
Janvier 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 10RISF20

E. Bayle, A. Nachbaur, E. Vanoudheusden

Vérificateur :

Nom : Mathon C.

Date : 27/06/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : Modaressi H.

Date : 07/07/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Effondrement, Cavité naturelle, Karst, Fontis, Susceptibilité, Aléa, Risque, Jura, Franche-Comté.

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

Bayle E., Nachbaur A., Vanoudheusden E. (2011) - Évaluation de l'exposition aux risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura zone pilote (phase 1). Rapport final. BRGM/RP-59386-FR, 186 p., 57 ill., 16 tab. 14 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le sous-sol du département du Jura se caractérise par l'existence de très nombreuses cavités d'origine naturelle. Certaines d'entre elles sont instables, conduisant à l'existence de nombreux affaissements voire effondrements. À l'heure actuelle, cet aléa géologique et le risque lié à celui-ci ne sont pas cartographiés à l'échelle départementale dans le Jura. Pour répondre à des exigences de planification et de gestion des risques et notamment pour hiérarchiser d'éventuelles prescriptions de Plans de Prévention des Risques liés aux cavités naturelles, les services de l'État souhaitent bénéficier d'un outil d'aide à la décision.

Pour répondre à cet objectif, une convention a été signée entre la Préfecture 39 et le BRGM, le 22 janvier 2010. Dans une première phase d'une durée de 12 mois, une méthodologie est initiée et appliquée sur une zone pilote de 181 communes, puis sera étendue à l'ensemble du département dans une seconde phase.

La méthode consiste à quantifier sur le territoire étudié, l'exposition de la population au risque d'effondrement d'une cavité naturelle, sachant que la loi d'endommagement considérée est binaire : soit la personne est exposée totalement, soit elle ne l'est pas.

La connaissance du phénomène naturel peut s'approcher à partir du concept de « susceptibilité » (abusivement assimilé à un « aléa »), évalué ici de manière quantitative. La susceptibilité qu'un désordre apparaisse en surface, a été définie ici comme le croisement de deux valeurs indépendantes : la Susceptibilité de présence de cavités et la Susceptibilité d'effondrement des terrains au droit de cette cavité jusqu'à engendrer des instabilités en surface. Le niveau de susceptibilité auquel on aboutit, mesure une probabilité spatiale qui n'a qu'une signification relative et non absolue.

Dans la pratique, pour évaluer ces niveaux de susceptibilité, plusieurs étapes se succèdent :

- un inventaire d'événements représentatifs du phénomène naturel étudié a été constitué au préalable, rassemblant les cavités naturelles ainsi que l'ensemble des manifestations qu'elles peuvent provoquer en surface (doline, fontis, résurgence, perte...). En compilant plusieurs sources de données, cette étude a permis de rassembler 2 639 événements géoréférencés, représentatifs du phénomène sur le département du Jura (1 240 sur la zone pilote) ;
- à partir de l'analyse de cet inventaire, une liste de critères explicatifs (facteur de prédisposition) a été identifiée, justifiant d'une part, la répartition spatiale des cavités sur la zone étudiée et d'autre part, celle des désordres. Les recherches bibliographiques et les réflexions menées avec les experts locaux ont permis de lister plusieurs critères théoriques adaptés aux spécificités du sous-sol jurassien ;
- des supports cartographiques associés aux critères sélectionnés ont été constitués. En réalité, le choix des critères est fortement conditionné par la disponibilité de la donnée cartographique sur l'intégralité du secteur étudié ;

- à partir des critères explicatifs identifiés, le niveau de susceptibilité est quantifié grâce à l'utilisation d'outils spécifiques, adaptés à l'échelle départementale, qui limitent les biais généralement associés à l'expertise (subjectivité de la pondération, effet de seuil, « boîte noire », non exhaustivité de l'inventaire...). Le principe est de systématiquement confirmer les interprétations et les choix d'expert en les confrontant aux événements réellement observés.

Le principal facteur retenu comme justifiant la présence d'une cavité est l'existence d'une formation géologique sensible à la dissolution. La classification théorique établit à partir des données cartographiques et des coupes de forage, tient principalement compte de la massivité des formations et de la proportion de carbonates et d'évaporites, minéraux sujets à la dissolution lors de circulation d'eau. Ce travail permet de tenir compte de variations latérales de faciès à l'intérieur d'une même série stratigraphique. Par ailleurs, comme la lithologie affleurante masque les formations sous-jacentes, la carte géologique ne suffit donc pas à localiser les formations sensibles à la dissolution. Un travail de reconstitution stratigraphique a été entrepris à partir des notices des cartes géologiques 1/50 000 du BRGM et de forages disponibles. Ainsi, en tout point du territoire, grâce au log géologique reconstitué, nous disposons de la succession lithologique renseignée (nature, épaisseur et proportion d'éléments carbonatés et évaporitiques) et sommes notamment en mesure d'estimer la profondeur de l'horizon le plus sujet à la dissolution.

Les facteurs d'effondrement sont plus variés et particulièrement dépendants du contexte local. Un des facteurs les plus courants est l'épaisseur du recouvrement : outre les informations données par les logs géologiques, l'évaluation de cette grandeur a nécessité un travail spécifique sur les formations superficielles. Un autre facteur qui s'est avéré discriminant sur le territoire étudié est la capacité d'infiltration des eaux de surface, indication qui nous a été donnée par l'indice IDPR.

Finalement, deux éclairages sont donnés aux décideurs :

- **la connaissance du phénomène naturel** (i.e. la possibilité d'apparition de désordres liés aux cavités naturelles), donnée par :
 - plusieurs cartes de susceptibilité, construites à partir de l'analyse des données existantes et permettant de quantifier le niveau de susceptibilité en tout point du territoire, sans donner plus de poids aux endroits où l'information existe. Ces cartes sont couplées à une valeur de qualité du diagnostic, qui mesure, en chaque endroit, le risque pris par l'expert dans son analyse et permet de rester prudent dans le diagnostic affiché.
 - une base de données de cavité et désordres associés, qui restent la connaissance la plus aboutie du phénomène et auquel il convient de se reporter en parallèle ;
- **l'exposition au risque** qui permet de confronter l'aléa aux enjeux concernés. Cette information est donnée au moyen d'un tableau de synthèse précisant pour chaque commune, la proportion de sa surface et le nombre d'habitants concerné par chaque niveau de susceptibilité. Il reste important de distinguer l'emprise surfacique exposée et le nombre d'habitants, qui sont deux types d'enjeux que la commune peut souhaiter protéger.

En termes de hiérarchisation des priorités à l'échelle du territoire, le couple niveau de susceptibilité du bâti/niveau de susceptibilité de la commune, s'est avéré être l'information la plus pertinente pour caractériser l'exposition d'une commune puisqu'elle distingue deux informations bien différentes : l'exposition des zones bâties où se concentrent les enjeux d'une part et l'exposition surfacique de la commune d'autre part. La valeur représentative est donnée ici par le niveau de susceptibilité occupant le plus de surface, c'est-à-dire « le niveau de susceptibilité le plus fréquent ». En choisissant de ne considérer que des niveaux de susceptibilité, on s'est affranchit de donner plus d'importance aux communes les plus peuplées (ce qui n'est pas le cas avec une quantification du risque). Cependant, pour que cette information apparaisse sans fausser la hiérarchisation, le graphique distingue par un coloris différent les communes selon leur nombre d'habitant.

À l'aide des résultats départementaux ainsi établis, les gestionnaires territoriaux ont les moyens de hiérarchiser les secteurs susceptibles d'être affectés par l'effondrement de cavités naturelles et ainsi décider les risques qu'ils peuvent accepter ou doivent réduire. En effet, le résultat obtenu sous forme de graphique) permet facilement de constituer des groupes de communes homogènes en termes de susceptibilité. Il permet d'identifier notamment des communes qui sont globalement concernées par un niveau de susceptibilité élevé alors que les zones bâties de ces communes sont installées sur les reculées jurassiennes, préservées des effondrements karstiques. Dans le cadre de cette étude, une classification en 4 classes de priorité, a été proposée. Mais à partir de ce graphique synthétisant le risque communal sur le territoire, les décideurs peuvent facilement proposer d'autres critères de classification, tenant compte par exemple, du nombre d'habitants.

L'analyse menée à l'échelle départementale n'a pas la résolution suffisante pour pouvoir être reprise précisément à l'échelle d'une commune (et donc dans un PPR). L'identification des bassins de risques répond à des exigences de planification et de gestion des risques à l'échelle départementale et permet de hiérarchiser le lancement d'étude à l'échelle communale.



Sommaire

1. Introduction.....	15
2. Objectifs visés et principes méthodologiques retenus.....	17
2.1. PROBLÉMATIQUE À TRAITER.....	17
2.1.1. Les cavités naturelles du département du Jura	17
2.1.2. Phénomène naturel redouté.....	17
2.1.3. Objectifs visés.....	18
2.2. MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE	18
2.3. RÉSULTATS OPÉRATIONNELS	22
3. Description géologique de la zone pilote.....	23
3.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE	23
3.1.1. Morphologie de la zone pilote	23
3.1.2. Contexte hydrologique	24
3.1.3. Contexte géologique	25
3.1.4. Contexte hydrogéologique	27
3.1.5. Description par secteurs structuraux	28
3.2. PRÉSENTATION DES 16 SECTEURS STRUCTURAUX	29
3.2.1. Bresse louchannaise (secteur 01).....	29
3.2.2. Faisceau lédonien (secteur 02).....	30
3.2.3. L'Arbois (secteur 03).....	31
3.2.4. Faisceaux salinois et de Quingey (secteur 04).....	32
3.2.5. Plateau de Lons-le-Saunier (secteur 05).....	33
3.2.6. Plateau de Champagnole (secteur 06_A).....	34
3.2.7. Côte de l'Heute (secteur 06_B).....	35
3.2.8. Faisceau de Syam (secteur 07)	36
3.2.9. Plateau central de Nozeroy (secteur 08_A).....	37
3.2.10. Massif du Racht (secteur 08_B).....	38
3.2.11. Massif de la Forêt de Haute-Joux (secteur 08_C).....	39
3.2.12. Plateau de Cornu (secteur 08_D).....	40
3.2.13. Prolongement du faisceau de Syam (secteur 08_E)	41
3.2.14. Avant-faisceau helvétique (secteur 09_A).....	42
3.2.15. Pic de l'Aigle (secteur 09_B).....	43

3.2.16. Haute-Chaîne du nord (secteur 10).....	44
4. Cavités souterraines et désordres associés	47
4.1. CONSTITUTION D'UN INVENTAIRE DES CAVITÉS NATURELLES ET DÉSORDRES ASSOCIÉS.....	47
4.1.1. À partir des bases de données nationales.....	47
4.1.2. Données du Comité Départemental des Spéléologues du Jura.....	48
4.1.3. Données hydrogéologiques (sources, cavités, pertes et traçages).....	48
4.1.4. Consultation des autres organismes	49
4.2. ANALYSE DES DONNÉES RECENSÉES	49
4.2.1. Répartition des données recensées sur la zone pilote.....	49
4.2.2. Interprétation des typologies recensées	51
4.2.3. Constitution d'une base de données de connaissance	52
4.3. PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX DONNÉES D'INVENTAIRE	53
5. Synthèse des connaissances concernant les cavités naturelles dans le sous-sol jurassien.....	56
5.1. FACTEURS DE PRÉSENCE DE CAVITÉS NATURELLES.....	56
5.1.1. La stratigraphie	57
5.1.2. La fracturation des calcaires.....	58
5.1.3. Les terrains de couverture.....	59
5.1.4. L'intercalation de niveaux étanches.....	59
5.1.5. Un bilan sur la susceptibilité de présence de cavités via la connaissance des formations accueillant un aquifère karstique	59
5.1.6. L'acidité des sols.....	60
5.2. FACTEURS D'EFFONDREMENT DES CAVITÉS NATURELLES.....	61
5.2.1. Les caractéristiques mécaniques des terrains du recouvrement (voûte calcaire et terrains sus-jacents).....	61
5.2.2. L'épaisseur du recouvrement	62
5.2.3. L'infiltration des eaux.....	62
5.3. SÉLECTION DES CRITÈRES EXPLICATIFS EXPLOITABLES	62
6. Constitution des supports cartographiques nécessaire à l'évaluation de la susceptibilité	65
6.1. LOGS GÉOLOGIQUES PAR SECTEURS STRUCTURAUX.....	65
6.2. SENSIBILITÉ À LA DISSOLUTION	68
6.3. LES FORMATIONS SUPERFICIELLES	71

6.3.1. Épaisseur des formations superficielles	71
6.3.2. Nature des lithologies sous-jacentes.....	73
6.4. DONNÉES GÉOLOGIQUES STRUCTURALES.....	73
6.5. CAPACITÉ D'INFILTRATION DE EAUX	76
7. Évaluation de la susceptibilité d'apparition de désordre liés aux cavités naturelles.....	79
7.1. DEUX PHÉNOMÈNES INDÉPENDANTS À L'ORIGINE DE L'APPARITION D'UN DÉSORDRÉ EN SURFACE.....	79
7.2. PRINCIPE DE QUANTIFICATION DU NIVEAU DE SUSCEPTIBILITÉ	80
7.3. SUSCEPTIBILITÉ DE PRÉSENCE DE CAVITÉS	81
7.3.1. Susceptibilité liée à la sensibilité à la dissolution des formations (Critère 1).....	82
7.3.2. Susceptibilité liée à la structure.....	86
7.3.3. Résultat : la carte de susceptibilité de présence de cavités.....	87
7.4. SUSCEPTIBILITÉ D'EFFONDREMENT DE CAVITÉS JUSQU'À ENGENDRER DES DÉSORDRÉS EN SURFACE	87
7.4.1. Susceptibilité liée à l'épaisseur des terrains de recouvrement (Critère 2).....	88
7.4.2. Susceptibilité liée à l'infiltration des eaux (Critère 3)	92
7.4.3. Résultat : la carte de susceptibilité d'effondrement	93
7.5. RÉSULTAT EN TERMES DE SUSCEPTIBILITÉ D'APPARITION DE DÉSORDRÉS EN SURFACE	94
7.5.1. La carte de susceptibilité globale	94
7.5.2. L'indice de confiance du diagnostic.....	95
7.5.3. Analyse des résultats et limites	95
8. Enjeux et loi d'exposition au risque	97
8.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE PILOTE EN TERMES D'ENJEUX	97
8.2. ÉVALUATION DES ENJEUX	99
8.2.1. Localisation des enjeux.....	100
8.2.2. Choix de l'enjeu considéré comme représentatif : la population.....	103
8.2.3. Estimation de la valeur des enjeux : dénombrement de la population	104
8.3. VULNERABILITÉ DES ENJEUX : LOI BINAIRE D'EXPOSITION.....	105
9. Résultats en termes des expositions au risque.....	107

9.1. REPRÉSENTATION DE L'EXPOSITION AU RISQUE SUR LA ZONE PILOTE	107
9.1.1. Résultats en termes de susceptibilité globale	107
9.1.2. Synthèse de l'exposition de chaque communes, en termes d'emprise surfacique et de nombre d'habitants	107
9.2. PRINCIPE DE HIÉRARCHISATION DES COMMUNES	109
9.2.1. Choix des deux valeurs représentatives	109
9.2.2. Classes de communes	110
10. Conclusion	113
11. Bibliographie	115

Liste des illustrations

Illustration 1 : Organisation méthodologique et résultat exploitable.....	19
Illustration 2 : Coupe géologique NO-SE illustrant le contexte structural du Jura (synthèse hydrogéologique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse).....	23
Illustration 3 : Localisation de la zone pilote sur la carte géologique harmonisée du Jura.	24
Illustration 4 : Carte et coupes géologiques de la zone pilote (carte géologique harmonisée du Jura et coupes extraites de la synthèse hydrogéologique du bassin RMC).	26
Illustration 5 : Découpage hydrogéologique de la zone pilote, issu de l'atlas hydrogéologique des régions Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes (Lamotte et al., 2009, RP-57091-FR).	27
Illustration 6 : Carte des secteurs structuraux (fond : carte géologique 1/1 000 000 du BRGM).	29
Illustration 7 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de Bresse Louhannaise.....	30
Illustration 8 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du faisceau lédonien.....	31
Illustration 9 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'Arbois.....	32
Illustration 10 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée des faisceaux salinois et de Quingey.....	33
Illustration 11 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Lons-le-Saunier.....	34
Illustration 12 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Champagnole.....	35
Illustration 13 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de la Côte de l'Heute.....	36
Illustration 14 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du faisceau de Syam.....	37
Illustration 15 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Nozeroy.....	38

Illustration 16 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du massif du Rachtet.	39
Illustration 17 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du massif de Haute-Joux.	40
Illustration 18 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Cornu.	41
Illustration 19 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du prolongement du faisceau de Syam.	42
Illustration 20 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'avant-faisceau helvétique.	43
Illustration 21 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'avant-faisceau helvétique.	44
Illustration 22 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de la Haute-Chaîne du nord.	45
Illustration 23 : Carte de localisation des événements liés à une cavités naturelles, recensés sur le site pilote.	50
Illustration 24 : Répartition des événements recensés dans la zone pilote.	52
Illustration 25 : Concentration des événements dans la forêt domaniale des Moidons (communes de Besain et Molain).	54
Illustration 26 : Pente dérivée du MNT (en rouge : forte pente, en bleu : faible pente).	55
Illustration 27 : Répartition selon la nature lithologique.	69
Illustration 28 : Sensibilité à la dissolution des formations affleurantes.	70
Illustration 29 : Cartographie des pendages et des zones plissées.	74
Illustration 30 : Surface (km ²) occupée par chaque catégorie.	75
Illustration 31 : Représentation de l'indice IDPR sur le territoire de la territoire de la zone pilote. Source : BRGM.	76
Illustration 32 : Schéma conceptuelle illustrant la décorrélation des deux phénomènes (Source : C. Mathon).	80
Illustration 33 : Combinaison des facteurs de prédisposition, sélectionnés sur la zone pilote pour évaluer la susceptibilité.	81
Illustration 34 : Proportion surfacique occupée par chaque type de lithologie selon que l'on considère la lithologie affleurante ou la lithologie maximale rencontrée sur 100 m de profondeur.	83
Illustration 35 : Extrait de la carte de susceptibilité (Annexe 5) sur le sud du plateau de Champagnole.	84
Illustration 36 : Extrait de la carte de susceptibilité (Annexe 5) au centre du plateau de Champagnole.	85
Illustration 37 : Distinction de deux types de secteurs structuraux.	86
Illustration 38 : Nombre de désordres en fonction des épaisseurs de recouvrement marneux (en mètres). Source : Rapport BRGM RP-58768-FR.	91
Illustration 39 : Possibilité d'effondrement (degré d'appartenance) en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement et nombre d'évènements recensés.	92
Illustration 40 : Possibilité d'effondrement en fonction de la valeur de l'IDPR.	93
Illustration 41 : Légende des cartes de susceptibilité.	95

Illustration 42 : Légende des cartes de susceptibilité.....	95
Illustration 43 : Description démographique des 181 communes composant la zone pilote.....	98
Illustration 44 : Répartition des communes du département du Jura, selon leur nombre d'habitants. 95 % de ces communes compte moins de 1 400 habitants.....	99
Illustration 45 : Répartition des communes du département du Jura de moins de 1 400 habitants. 75 % de ces communes compte moins de 400 habitants.....	99
Illustration 46 : Étape de descriptions des enjeux.....	100
Illustration 47 : Zone d'occupation des sols de la zone pilote, département du Jura. Source : BD Carto.....	101
Illustration 48 : Exemple de sélection des zones bâties. Source photo aériennes : Google Earth.....	102
Illustration 49 : Exemple de sélection des zones bâties dans la commune de Saint-Lothain. Source photo aériennes : Google Earth.....	102
Illustration 50 : Exemple de sélection des zones bâties dans la commune de Domblans. Source photo aériennes : Google Earth.....	103
Illustration 51 : Exemple de découpage infra-communale dans la commune de Champagnole. Source photo aériennes : Google Earth.....	105
Illustration 52 : Principe d'évaluation de l'exposition au risque.....	106
Illustration 53 : Extrait du tableau de l'Annexe 10, synthétisant l'exposition de chaque commune.....	108
Illustration 54 : Exemple de variation du niveau de susceptibilité à l'intérieur d'une même commune.....	109
Illustration 55 : Classes de priorité proposées.....	110
Illustration 56 : Coupe géologique synthétique des terrains secondaires de la coupure Lons 3 - extrait du rapport BRGM 65-DSGR-A-075, Colin (1965) – figure tronquée au Jurassique inférieur et moyen.....	128
Illustration 57 : Directions des circulations karstiques reconnues - Premier Plateau du Jura - Colin (1973).....	129

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des secteurs structuraux identifiés sur la zone d'étude.....	28
Tableau 2 : Données recensées en cavités souterraines et désordres de surface.....	52
Tableau 3 : Structure de la base de données karsts et désordres de surface.....	53
Tableau 4 : Critères explicatifs utilisables a priori.....	63
Tableau 5 : Log géologique des secteurs 01 à 07.....	66
Tableau 6 : Log géologique des secteurs 07 à 10.....	67
Tableau 7 : Classification de la sensibilité à la dissolution à partir de la lithologie.....	68

Tableau 8 :	Épaisseur des formations superficielles.....	72
Tableau 9 :	Pendages et plis par secteurs.....	75
Tableau 10 :	Signification de l'indice IDPR. Source : Rapport BRGM/RP-55311-FR (Mardhel, 2006).	77
Tableau 11 :	Répartition des phénomènes recensés dans chaque unité.....	83
Tableau 12 :	Répartition des désordres en fonction de la nature des terrains affleurants.....	88
Tableau 13 :	Récapitulatif de l'évaluation de l'épaisseur du recouvrement.....	89
Tableau 14 :	Répartition des désordres en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement.....	89
Tableau 15 :	Répartition des désordres entre 0 et 100 mètres d'épaisseur des terrains de recouvrement.....	90
Tableau 16 :	Répartition des désordres en fonction de la valeur de l'IDPR.....	92

Liste des annexes

Annexe 1 :	Cahier des charges	121
Annexe 2 :	Illustrations extraites de la bibliographie	125
Annexe 3 :	Répartition géologique des phénomènes liés aux cavités souterraines	131
Annexe 4 :	Principes théoriques d'évaluation quantitative d'un niveau de susceptibilité, issus de la Méthodologie Scénario Cavité	135
Annexe 5 :	Carte de susceptibilité de présence	141
Annexe 6 :	Carte de susceptibilité d'effondrement.....	145
Annexe 7 :	Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle	149
Annexe 8 :	Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle sur les zones bâties.....	153
Annexe 9 :	Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle	157
Annexe 10 :	Exposition de chaque commune, en termes d'emprise surfacique et de nombre d'habitants.....	161
Annexe 11 :	Classement des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles	169
Annexe 12 :	Proposition de classement des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles	173
Annexe 13 :	Carte de hiérarchisation des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles	177
Annexe 14 :	Présentation des 181 communes constituant le site pilote	181



1. Introduction

Le sous-sol du département du Jura se caractérise par l'existence de très nombreuses cavités d'origine naturelle. Certaines d'entre elles sont instables, conduisant à l'existence de nombreux affaissements voire effondrements. En effet, les bases de données nationales recensaient en 2010 plus de 500 cavités souterraines abandonnées (hors mines et hors connaissance des spéléologues) et plus de 150 effondrements jusqu'en surface de cavités naturelles dans le Jura.

À l'heure actuelle, cet aléa géologique et le risque lié à celui-ci ne sont pas cartographiés à l'échelle départementale dans le Jura. Pour répondre à des exigences de planification et de gestion des risques et notamment pour hiérarchiser d'éventuelles prescriptions de Plans de Prévention des Risques liés aux cavités naturelles, les services de l'État souhaitent bénéficier d'un outil d'aide à la décision. Il s'agit pour cela d'identifier l'aléa et les risques liés aux cavités naturelles à partir des connaissances actuelles.

Pour répondre à cet objectif, une convention a été signée entre la Préfecture 39 et le BRGM, le 22 janvier 2010. Cette étude est conduite en deux parties. Dans une première phase d'une durée de 12 mois, une méthodologie est initiée et appliquée sur une zone pilote de 181 communes. Elle sera étendue à l'ensemble du département dans une seconde phase. Ce rapport présente la méthodologie et son application sur la zone pilote (phase 1).

La méthode proposée par le BRGM et validée par les Services de l'État consiste à quantifier sur le territoire étudié, l'exposition des enjeux au risque d'effondrement d'une cavité. L'exposition au risque est le croisement de deux types d'informations indépendantes : la connaissance des enjeux présents sur le territoire que le décideur cherche à protéger et la connaissance du phénomène naturel, que l'on cherche à appréhender. Ceci implique une caractérisation quantitative de l'aléa d'une part, et de la valeur et de la vulnérabilité des enjeux d'autre part, à l'échelle du département.

L'étude s'organise comme suit. Dans une première partie, nous décrivons la méthodologie générale et la zone pilote (chapitre 2 et 3). Les chapitres 4, 5, 6 et 7 concernent l'étude du phénomène naturel, tandis que le chapitre 8 s'intéresse aux enjeux. Concernant l'étude du phénomène naturel, la constitution de l'inventaire d'événements représentatifs du phénomène naturel étudié, est décrite au chapitre 4. À partir de l'analyse de cet inventaire, l'identification de critères explicatifs, étayée par les recherches bibliographiques propres au sous-sol jurassien, est décrite au chapitre 5. Le chapitre 6 présente la constitution des supports cartographiques associés aux critères sélectionnés, permettant d'élaborer les cartes de susceptibilité recherchées dans le chapitre 7. Les résultats obtenus en termes d'exposition au risque sont présentés dans le chapitre 9.



2. Objectifs visés et principes méthodologiques retenus

2.1. PROBLÉMATIQUE À TRAITER

2.1.1. Les cavités naturelles du département du Jura

Dans le département du Jura, les deux types de formations soumises à des dissolutions naturelles conduisant à la création de cavités souterraines naturelles sont :

- les **formations évaporitiques** (anhydrite, gypse présents dans les marnes triasiques et liasiques), présentes uniquement en extrémité ouest du massif jurassien ;
- les **formations carbonatées**, soumises à un phénomène de dissolution karstique. Ces formations constituent l'ossature de l'ensemble du massif jurassien.

2.1.2. Phénomène naturel redouté

Les cavités souterraines naturelles sont des objets en constante évolution, liées aux circulations d'eau souterraine responsable de leur creusement. Au cours du temps, le toit (partie supérieure) de la cavité peut céder plus ou moins soudainement, en une ou plusieurs fois. Lorsque ces instabilités se répercutent jusqu'en surface, on parle d'effondrement (rupture soudaine) ou d'affaissement (évolution lente).

Dans le Jura, plusieurs effondrements sont connus, notamment des spéléologues. Ils se produisent principalement sur les plateaux du massif jurassien, essentiellement ruraux. Ces phénomènes sont ponctuels, néanmoins ils peuvent affecter le réseau routier ou le bâti, avec des tailles variant de la dizaine de centimètres à quelques mètres (susceptible de déstabiliser une maison). La profondeur peut atteindre la dizaine de mètres. Le déclenchement soudain qui ne laisse que quelques secondes de réaction, peut également entraîner un risque pour les personnes.

En comparaison, les affaissements, souvent repris sous le nom de dolines, sont plus nombreux sur le département. La taille de ces dépressions est extrêmement variable (du mètre à près de 30 m), avec des profondeurs centimétriques voire métriques. Ils peuvent affecter le réseau routier ou le bâti mais n'ont pas le caractère soudain des effondrements.

Les désordres provoqués par des cavités se distinguent des autres phénomènes naturels pour plusieurs raisons. Dans la grande majorité des cas, les cavités à l'origine (la source du danger) ne sont pas ou que partiellement accessibles : une approche déterministe, telle qu'utilisée pour d'autres phénomènes naturels n'est pas possible. La problématique traitée ici doit se baser sur des données d'entrée ponctuelles et non

exhaustives, rarement étayées de paramètres géométriques et mécaniques. Etant donnée la spécificité du phénomène naturel étudié, les modèles prédictifs que l'on est capable d'établir consiste à exprimer la prédisposition d'apparition d'un désordre en surface appelé « susceptibilité » (souvent abusivement assimilé à un « aléa »).

2.1.3. Objectifs visés

Hierarchiser le risque encouru à l'échelle départementale pour orienter la politique de prévention des risques, et notamment la mise en œuvre des Plans de Prévention du Risque (PPR)

Les cartes d'exposition au risque établies à l'échelle départementale permettront de localiser les bassins de risques et de les hiérarchiser jusqu'à l'échelle communale vis-à-vis du risque d'effondrement. Les résultats obtenus seront des outils d'aide à la décision qui peuvent notamment contribuer à la planification cohérente des PPR à l'échelle départementale et à la priorisation des actions.

Donner des critères de choix aux décideurs

Les cartes et les classements obtenus donneront la possibilité de remonter aux sources des résultats et multiplient ainsi les éclairages donnés aux décideurs en leur laissant la possibilité d'avoir accès aux arguments techniques pour axer leur politique de prévention. Ces informations permettent notamment de pouvoir envisager des préconisations et des travaux adaptés selon les configurations. Ceci facilite également l'appropriation du risque par les services et l'éventuelle mise en œuvre d'une analyse coût / bénéfices permettant de mieux assoir une décision.

Informé sur le risque d'effondrement

Sans nécessairement aboutir à des prescriptions, en délivrant une information étayée et vulgarisée, ces résultats facilitent également l'appropriation du risque liés aux cavités, par les collectivités et la population.

2.2. MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

Pour répondre à ces objectifs, la méthode proposée consiste à quantifier sur le territoire étudié, l'exposition des enjeux au risque de désordres liés à une cavité. Les principes méthodologiques sont inspirés de la méthodologie Scénario Cavité¹, développée par le BRGM dans le cadre d'une convention avec le MEDAD, qu'il a fallu adapter aux spécificités du territoire étudié et notamment à sa complexité géologique et structurale.

¹ Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J. (2008) - Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées. Rapport final. BRGM/RP-56275-FR, 167 p., 63 ill., 7 tabl., 7 ann.

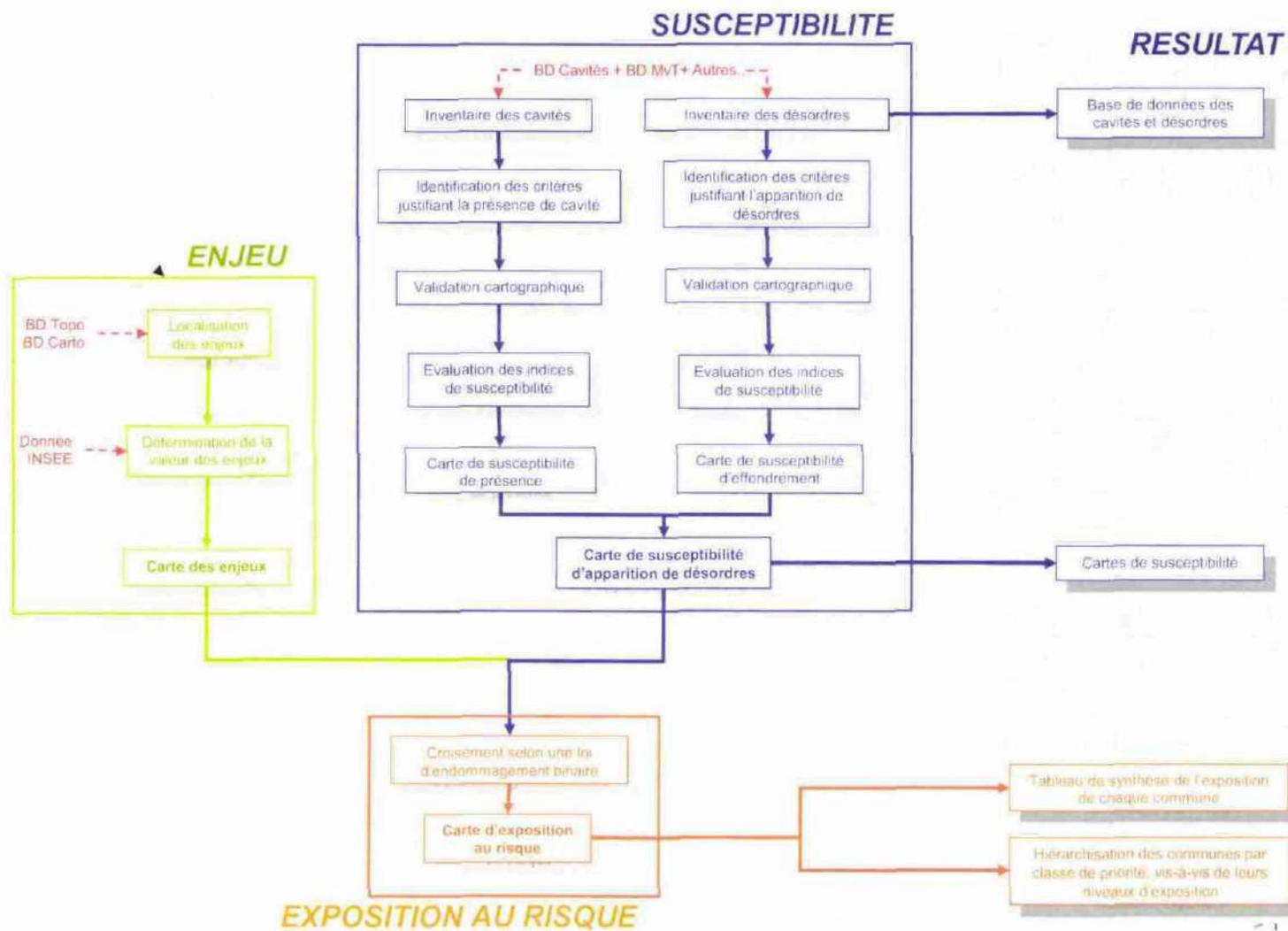
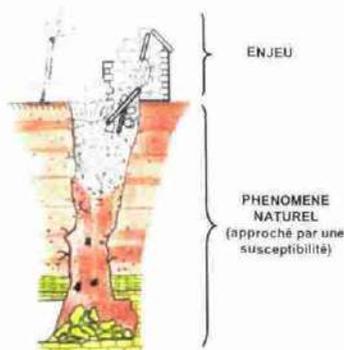


Illustration 1 : Organisation méthodologique et résultat exploitable.

Les principales caractéristiques de la méthode sont :

- l'exposition au risque recherché est le croisement de deux types d'information indépendantes : la connaissance des enjeux présents sur le territoire que le décideur cherche à protéger et la connaissance du phénomène naturel, que l'on cherche à appréhender ;



(C. Mathon)

- étant donnée les spécificités décrites au § 2.1.1. la connaissance du phénomène naturel est approchée par le concept de « susceptibilité à l'apparition d'un désordre en surface » (abusivement assimilé à un « aléa »), évalué par la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables (facteurs de prédisposition) ou défavorables ;
- les résultats se présentent sous forme de cartes départementales (niveau de susceptibilité, incertitude et niveau d'exposition) et de tableaux de classement par commune.

L'illustration 1 synthétise le déroulement méthodologique choisi et présenté dans la suite du rapport. Les chapitres 4, 5, 6 et 7 concernent l'évaluation de la susceptibilité. Le chapitre 8 s'intéresse aux enjeux et à leur exposition au risque. Le chapitre 9 présente les résultats obtenus en termes d'exposition au risque.

Principe d'évaluation de la susceptibilité

La susceptibilité vis-à-vis d'un désordre mesure l'occurrence spatiale de son apparition en surface, sans référence à une fréquence temporelle dont tient compte l'aléa (Galve *et al.*, 2009). Indicateur de décision pour le décideur, ce niveau de susceptibilité sera ici évalué de manière quantitative.

Or, le phénomène « désordre » observé en surface est issu de l'occurrence de deux événements : la présence d'une cavité en profondeur et la rupture des terrains du recouvrement (au droit de la cavité) jusqu'à engendrer des instabilités en surface. La réalisation conjointe de ces deux événements est une condition nécessaire et suffisante : une cavité volumineuse présente sous un banc de grés, massif et résistant ne présentera pas de risque pour la surface. À l'inverse, un recouvrement marneux peu épais n'aura pas tendance à contenir la propagation d'une instabilité, sous réserve qu'une cavité puisse exister à cet endroit.

La susceptibilité qu'un désordre apparaisse en surface, ce que l'on recherche, sera donc définie ici comme le croisement de deux valeurs indépendantes :

- la susceptibilité de présence de cavités en profondeur (illustrée par les cavités recensées) ;

- la susceptibilité d'effondrement des terrains au droit de la cavité jusqu'à engendrer des instabilités en surface (illustrée par les désordres recensés).

Ces valeurs sont évaluées en parallèle comme le schématise l'illustration 1, à partir de facteurs explicatifs indépendants.

Pour évaluer ces niveaux de susceptibilité :

- il convient au préalable de disposer d'un inventaire d'événements représentatifs du phénomène naturel étudié (cavités naturelles, dolines, gouffres...). La constitution de cet inventaire sur le territoire étudié, est décrite au **chapitre 4** ;
- à partir de l'analyse de cet inventaire, il convient ensuite d'identifier une liste de critères explicatifs complémentaires et discriminants. Ici, les critères explicatifs doivent justifier d'une part, la répartition spatiale des cavités sur la zone étudiée et d'autre part, celle des désordres. Les recherches bibliographiques propres au sous-sol jurassien, sont décrites au **chapitre 5** ;
- Le choix des critères est fortement conditionné par la disponibilité de la donnée sur l'intégralité du secteur étudié. Les critères doivent donc être associés à une information géoréférencée à l'échelle départementale. Le **chapitre 6** présente la constitution des supports cartographiques associés aux critères sélectionnés.
- à partir des critères explicatifs identifiés, le niveau de susceptibilité est quantifié grâce à l'utilisation d'outils spécifiques, adaptés à l'échelle départementale, qui permettent d'interpréter les données de l'inventaire tout en limitant les biais généralement associés à l'expertise (subjectivité de la pondération, effet de seuil, « boîte noire », non exhaustivité de l'inventaire...). La carte de susceptibilité finale est obtenue en combinant la carte de susceptibilité de présence avec celle de susceptibilité d'effondrement. Le principe est de systématiquement confirmer les interprétations et les choix d'expert en les confrontant aux événements réellement observés. La description de ces cartes de susceptibilité constitue le **chapitre 7**.

Le point central de la démarche reste l'identification des facteurs explicatifs théoriques. Ici, les critères explicatifs doivent justifier, d'une part la répartition spatiale des cavités sur la zone étudiée et d'autre part celle des désordres, en considérant que les futurs désordres apparaîtront dans des conditions similaires qu'aux désordres passés. 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, résultant de l'inventaire et du contexte géologique, sur la base de son expérience et de sa connaissance régionale (Nachbaur and Rohmer, 2011).

Intégrer les incertitudes participe à améliorer la gestion du risque. Les outils analytiques utilisés mettent en valeur le processus d'expertise tout en intégrant plusieurs formes d'incertitude qui entachent les procédures d'analyses de risque.

Principe d'évaluation des enjeux

L'évaluation des enjeux est détaillée au **chapitre 8**. Retenons que :

- la valeur des enjeux est évaluée par la population ;

- les enjeux sont localisés sur les zones bâties, à l'aide des informations de la BD Carto, validée et précisée par les photos aériennes et la BD Topo ;
- sur ces zones bâties, les données de population sont données par l'INSEE.

2.3. RÉSULTATS OPÉRATIONNELS

Plusieurs types de résultat sont mis à disposition des Services de l'État. Ils sont synthétisés dans l'illustration 1. Il s'agit :

- de la base de données rassemblant dans un SIG, les 1 240 données géolocalisées ;
- des cartes de susceptibilité discrétisées ;
- d'informations quantitatives sur le niveau d'exposition au risque de chaque commune ;
- d'une hiérarchisation des communes en classe de priorité, vis-à-vis de l'exposition au risque lié aux cavités naturelles, à l'échelle de la zone pilote étudiée.

3. Description géologique de la zone pilote

3.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Délimitée par le BRGM en concertation avec les services de l'État², la zone pilote comprend 181 communes sur une superficie de 1 679 km², soit environ le tiers du département. Elle traverse d'ouest en est le massif jurassien, de la plaine bressane à la frontière suisse, ce qui permet de recouper l'ensemble des formations stratigraphiques et structurales du département, excepté le massif granitique de la Serre.

La coupe géologique fournie en Illustration 2 illustre les principales failles et plis présents dans le Jura, tandis que la carte géologique présentée en Illustration 3 présente l'étendue de la zone pilote par rapport aux différentes formations géologiques affleurantes (extrait de la carte géologique harmonisée 1/50 000 du Jura).

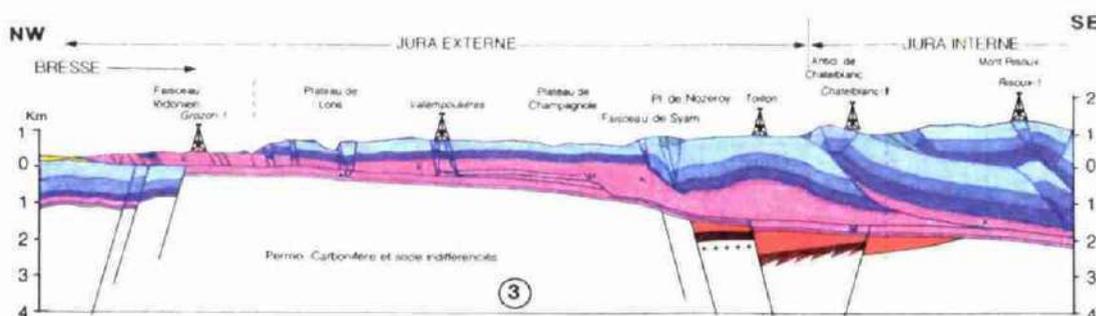


Illustration 2 : Coupe géologique NO-SE illustrant le contexte structural du Jura (synthèse hydrogéologique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse).

3.1.1. Morphologie de la zone pilote

La zone pilote comprend tous les types de relief du département : plateaux, Haute-Chaîne, reculées, vallée de l'Ain... La chaîne du Jura forme un arc montagneux convexe vers le NW du Territoire de Belfort à la Savoie. Le relief de l'ensemble du massif se distingue par sa dissymétrie : à l'ouest, une succession de plateaux de plus en plus élevés de la plaine de la Bresse jusqu'à la Haute-Chaîne (sommets du Jura à 1 495 m d'altitude au Crêt Pela – sommet de la zone pilote à 1 287 m d'altitude près de Bellefontaine). À l'est, un rebord brut permet de passer de la Haute-Chaîne au bassin molassique suisse.

² Compte rendu de réunion R08-268 du 15/07/2008, Réunion de restitution inventaire MVT et présentation pilote de la carte d'aléa, BRGM, Préfecture Jura, DIREN Franche Comté, DDE 39.

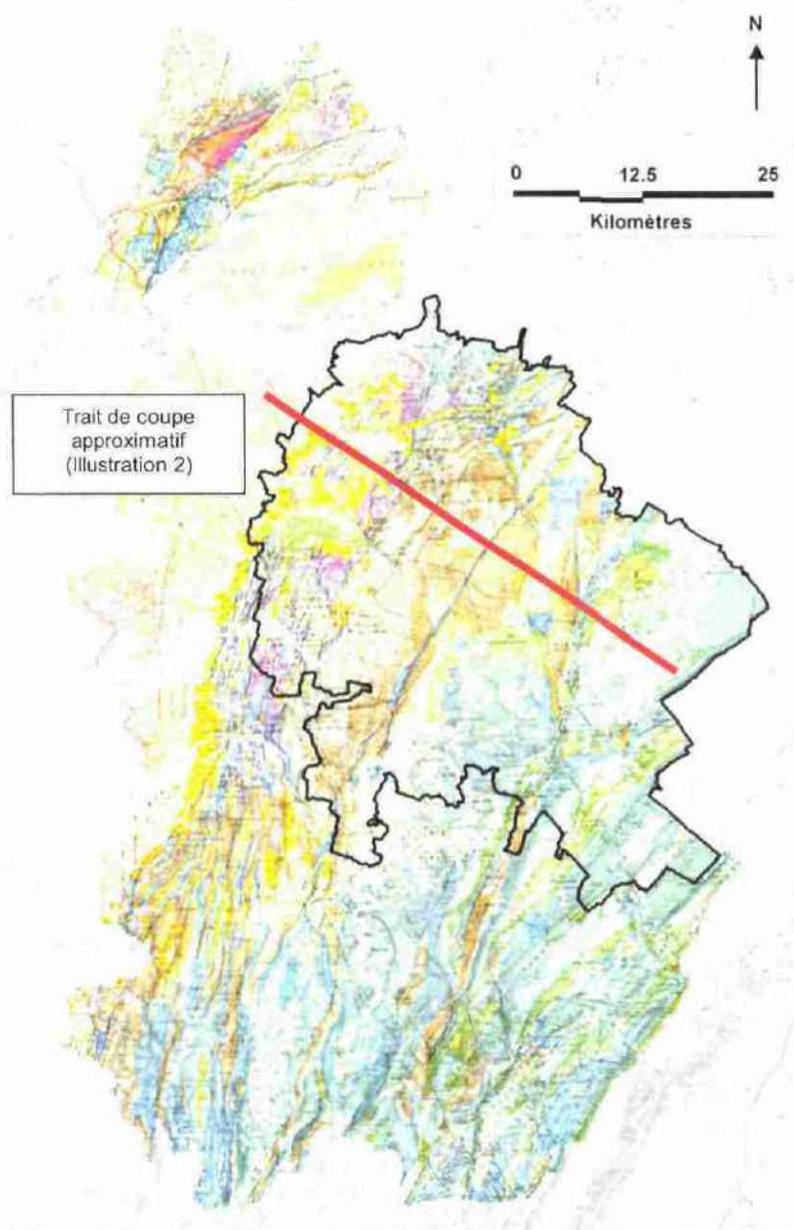


Illustration 3 : Localisation de la zone pilote sur la carte géologique harmonisée du Jura.

3.1.2. Contexte hydrologique

Les vallées du réseau hydrographique dépendent de la structure et des lithologies : les cours d'eau sont généralement parallèles aux plis et les traversent par des cluses. Toutefois, la plus grande partie des précipitations est captée par les karsts jurassiens, avec des résurgences plutôt en partie basse du massif.

3.1.3. Contexte géologique

Etant donné la complexité structurale régionale et en l'état actuel des connaissances, l'impossibilité de constituer un modèle géologique a été montrée lors de l'étude du potentiel géothermique en Franche Comté³, en 2010. Pour comprendre la structure de l'ensemble et identifier ainsi les secteurs structuraux complexes, plusieurs coupes géologiques représentatives ont été réalisées. Une carte géologique simplifiée de la zone pilote est également reproduite en Illustration 6.

Les formations géologiques qui composent le Jura sont toutes d'origine sédimentaire, à dominante essentiellement calcaire et avec quelques niveaux marneux, essentiellement au cours de la période stratigraphique du Secondaire et au cours de l'ère Tertiaire. Ensuite, elles ont subi un épisode d'érosion particulièrement intense dès la fin du Crétacé.

Les formations du socle cristallin ne sont pas présentes sur la zone pilote. Les formations géologiques les plus anciennes sont les séries sédimentaires du Trias, présentes dans la partie occidentale de la zone pilote (en mauve sur l'illustration 4). Les lithologies de chaque formation stratigraphique sont décrites par secteurs géographiques dans des logs géologiques (Tableau 5 page 66 et Tableau 6 page 67), en voici un bref résumé.

Trias

Seul le Trias supérieur affleure, en limite occidentale du massif du Jura. Ce sont des argiles à évaporites, dont le gypse et le sel qui étaient exploités au XIX^e siècle.

Lias

Les formations géologiques du Lias affleurent dans le Jura sur la bordure occidentale du massif et dans les reculées. Ce sont des niveaux essentiellement marneux, peu perméables, avec quelques niveaux calcaires.

Jurassique

Les formations géologiques du Jurassique inférieur au Jurassique supérieur sont essentiellement calcaires, avec des intercalations de marnes plus ou moins importantes (notamment à l'Oxfordien). C'est dans ces unités que ce sont développés de nombreux systèmes karstiques par dissolution au sein des bancs carbonatés. Il existe des variations de faciès pour une même stratigraphie, notamment du nord au sud du département (tendance plus marneuse vers le sud). Pour en tenir compte, il a été nécessaire de diviser chaque formation stratigraphique par secteurs géographiques.

³ Legrand C., Allier D., Nachbaur A. avec la collaboration de S. Belkacim, R. Coueffa, P. Herniot, K. Roussel, B. Tourlière (2010) - Atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région Franche-Comté. Rapport final. BRGM RP-58768-FR, 279 p., 104 ill. 13 ann.

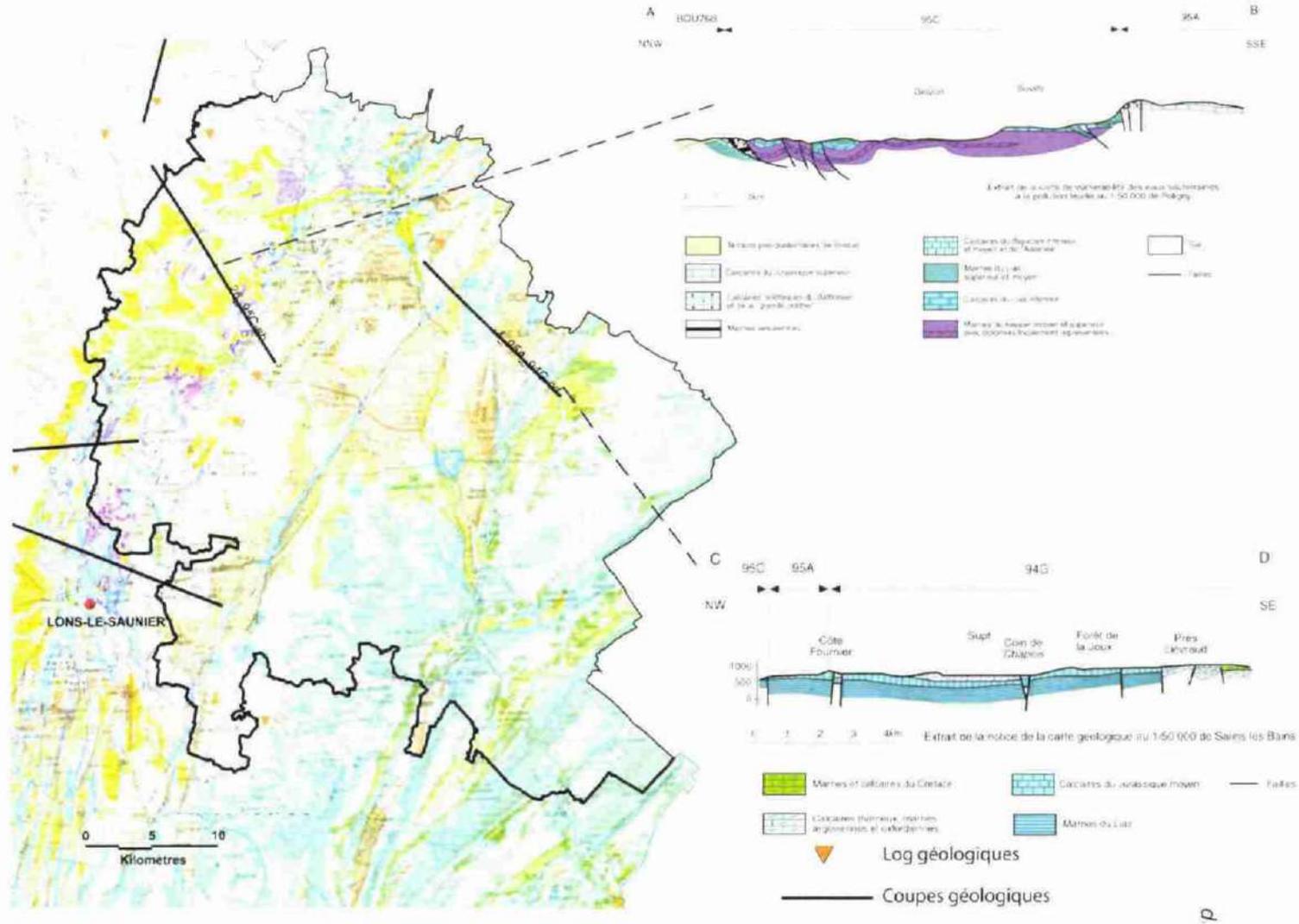


Illustration 4 : Carte et coupes géologiques de la zone pilote (carte géologique harmonisée du Jura et coupes extraites de la synthèse hydrogéologique du bassin RMC).

Crétacé

Les formations appartenant au Crétacé sont le plus souvent marneuses, mais des niveaux calcaires y sont présents.

3.1.4. Contexte hydrogéologique

À une échelle de caractérisation régionale des entités hydrogéologiques, le territoire occupé par la zone pilote recoupe plusieurs systèmes aquifères, majoritairement de type karstique (cf. Illustration 5).

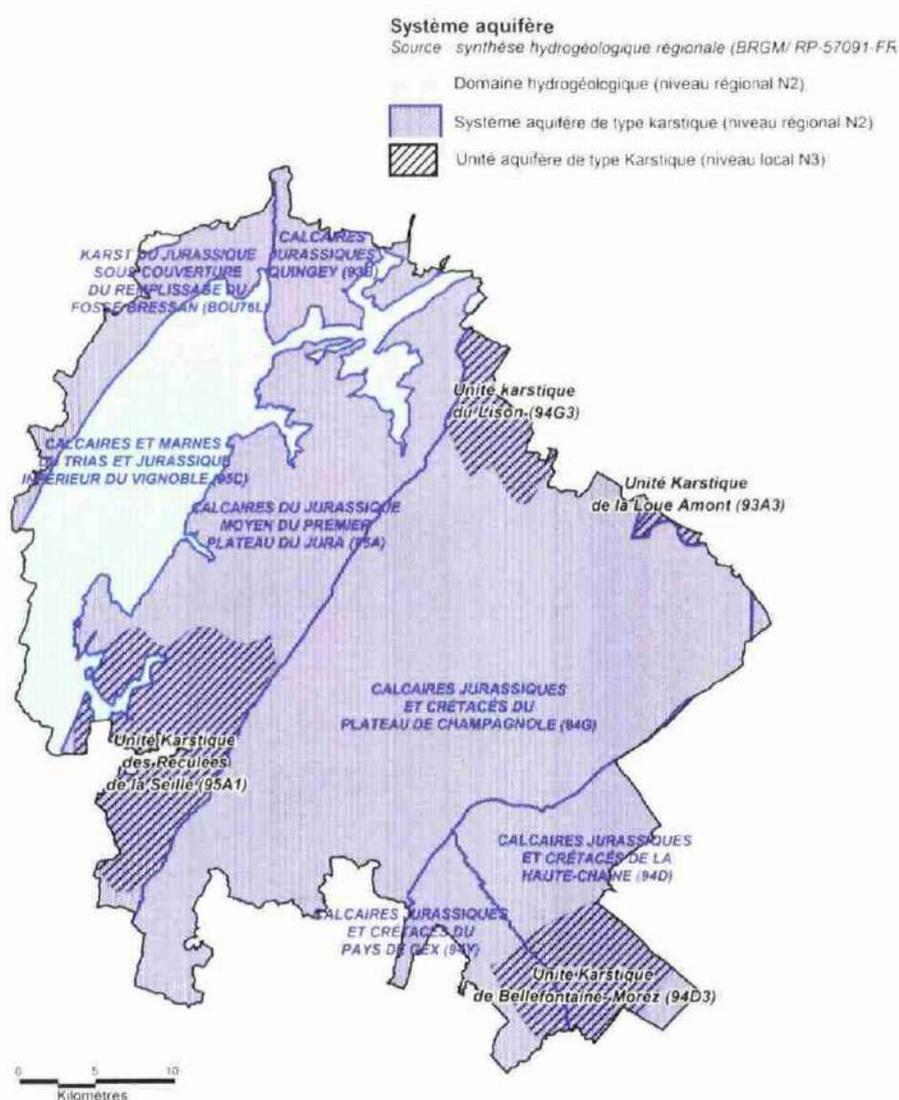


Illustration 5 : Découpage hydrogéologique de la zone pilote, issu de l'atlas hydrogéologique des régions Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes (Lamotte et al., 2009, RP-57091-FR).

Dans ces systèmes, deux niveaux aquifères potentiels principaux se superposent : les calcaires du Jurassique moyen et ceux du Jurassique supérieur, séparés par les marnes oxfordiennes, avec à la base un substratum liasique imperméable. Les calcaires du Jurassique moyen et supérieur sont karstifiés et les interlits de marnes dans le Jurassique supérieur ne sont pas un obstacle aux circulations d'eau.

Le Crétacé est dépourvu de formes karstiques bien développées, il s'agit plutôt essentiellement de pièges dans les structures synclinales. Ces derniers peuvent être en relation entre eux et éventuellement avec les aquifères jurassiques avec la présence d'accidents structuraux transverses. Les aquifères des synclinaux crétacés sont cependant de moindre importance que les aquifères jurassiques karstiques.

Certaines unités aquifères ont été identifiées à une échelle de l'ordre du 1/50 000, mais ces informations ont été transmises par les acteurs connaissant la ressource localement et ne constituent donc pas un inventaire exhaustif de ces entités. L'unité aquifère est définie comme une entité présentant des conditions hydrodynamiques homogènes, suffisamment perméable pour permettre la circulation d'eaux souterraines (perméabilité moyenne supérieure à 10⁻⁶ m/s).

Les aquifères karstiques sont détaillés plus avant, dans le § 5.1.5.

3.1.5. Description par secteurs structuraux

À partir de la carte géologique harmonisée du Jura (harmonisation des cartes géologiques 1/50 000 du BRGM), la zone pilote étudiée a été découpée en 16 secteurs, considérés comme homogènes d'un point de vue lithologique et structural. Ces secteurs sont listés dans le Tableau 1 et présentés sur la carte de l'illustration 6.

Identifiant (ID)	Nom
01	Bresse louchanaise
02	Faisceau lédonien
03	Arbois
04	Faisceaux salinois et de Quingey
05	Plateau de Lons-le-Saunier
06_A	Plateau de Champagnole
06_B	Côte de l'Heute
07	Faisceau de Syam
08_A	Plateau central de Nozeroy
08_B	Massif du Râchet
08_C	Massif de la Forêt de Haute-Joux
08_D	Plateau de Cornu
08_E	Prolongement du faisceau de Syam
09_A	Avant-faisceau helvétique
09_B	Pic de l'Aigle
10	Haute-Châine

Tableau 1 : Liste des secteurs structuraux identifiés sur la zone d'étude.

Dans un premier temps, 10 ensembles principaux ont été identifiés (plateaux, faisceaux et Bresse), numérotés de 1 à 10. Pour trois d'entre eux, un second découpage s'est avéré nécessaire afin de tenir compte de particularités lithologiques ou structurales.

Finalement, les 16 secteurs structuraux homogènes définis dans la zone de l'étude sont listés dans le Tableau 1.

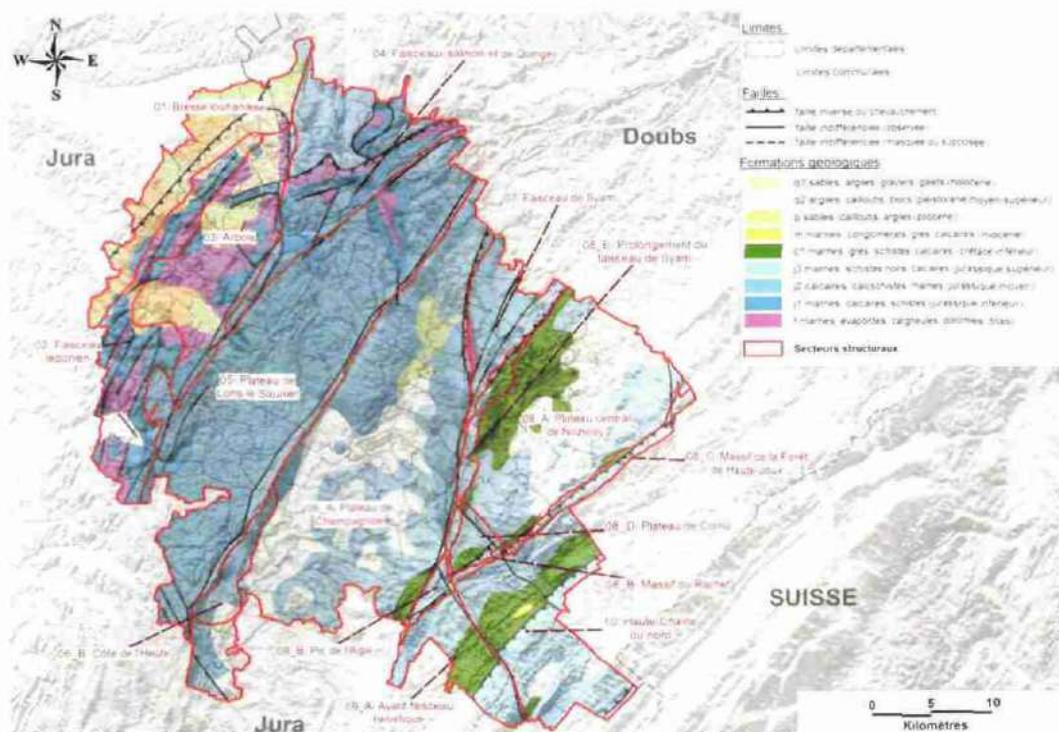


Illustration 6 : Carte des secteurs structuraux (fond : carte géologique 1/1 000 000 du BRGM).

3.2. PRÉSENTATION DES 16 SECTEURS STRUCTURAUX

Dans les paragraphes suivants, chaque secteur est présenté, associé à un extrait de carte pour les localiser, avec en fond la carte géologique 1/50 000 (non légendée).

3.2.1. Bresse louhannaise (secteur 01)

Localisé au nord-ouest de la zone pilote au pied des premiers reliefs du massif jurassien, la bordure orientale du fossé bressan est constituée de formations sub-horizontales (ou faibles pendages). Peu de failles affectent les formations affleurantes.

Les formations géologiques sont d'âge tertiaire (Miocène à Pliocène) et à prédominance marneuse ou sablo-marneuse. L'épaisseur diminue progressivement vers l'est de la Bresse louhannaise. En extrémité est, des formations triasiques

(marnes avec la présence d'évaporites) voire jurassiques (marnes, quelques niveaux calcaires) peuvent affleurer localement.

Les formations superficielles sont essentiellement constituées d'alluvions dans les vallées de la Cuisance et de la Loue sur la moitié nord du secteur. Ces alluvions recouvrent des formations marneuses tertiaires. Des argiles d'âge quaternaire (de décalcification ou résiduelles) et des limons sont également cartographiés sur les formations pliocènes.

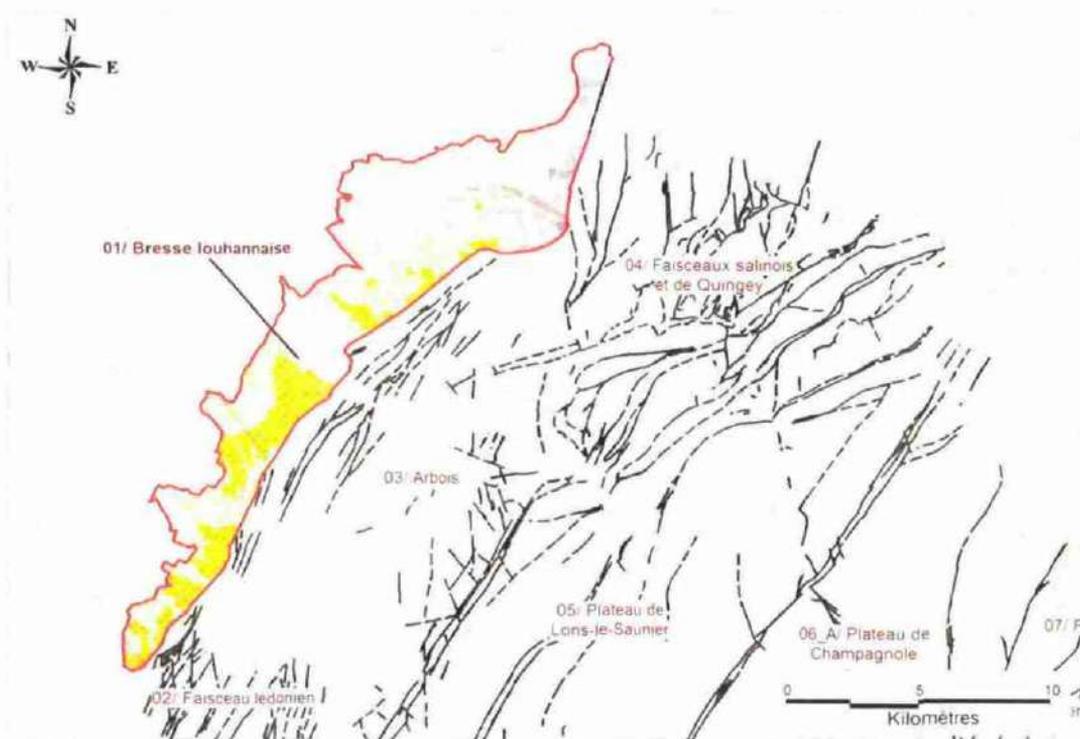


Illustration 7 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de Bresse Louhannaise.

3.2.2. Faisceau lédonien (secteur 02)

Constituant le chevauchement du Jura en bordure de la Bresse, ce secteur se distingue par de nombreuses failles orientées NE-SO sur la partie nord du secteur et se redressant NNE-SSO sur la partie sud. Les pendages peuvent varier rapidement en raison des nombreuses failles.

Les formations géologiques sont essentiellement les marnes dolomitiques du Trias (parfois gypsifères) et du Jurassique inférieur (avec plusieurs niveaux de calcaires marneux). Plus localement, le jeu des failles peut être responsable de l'affleurement de calcaires du Jurassique moyen (peu marneux) voire du Jurassique supérieur (avec des marnes oxfordiennes à la base).

Les formations superficielles sont peu présentes, excepté les alluvions de la Seille (près de Voiteur) et de la Cuisance et des argiles de surface dont l'origine reste floue (résidu, décalcification, datation imprécise...). Très localement, sur la moitié sud du secteur, des moraines peu développées sont cartographiées.

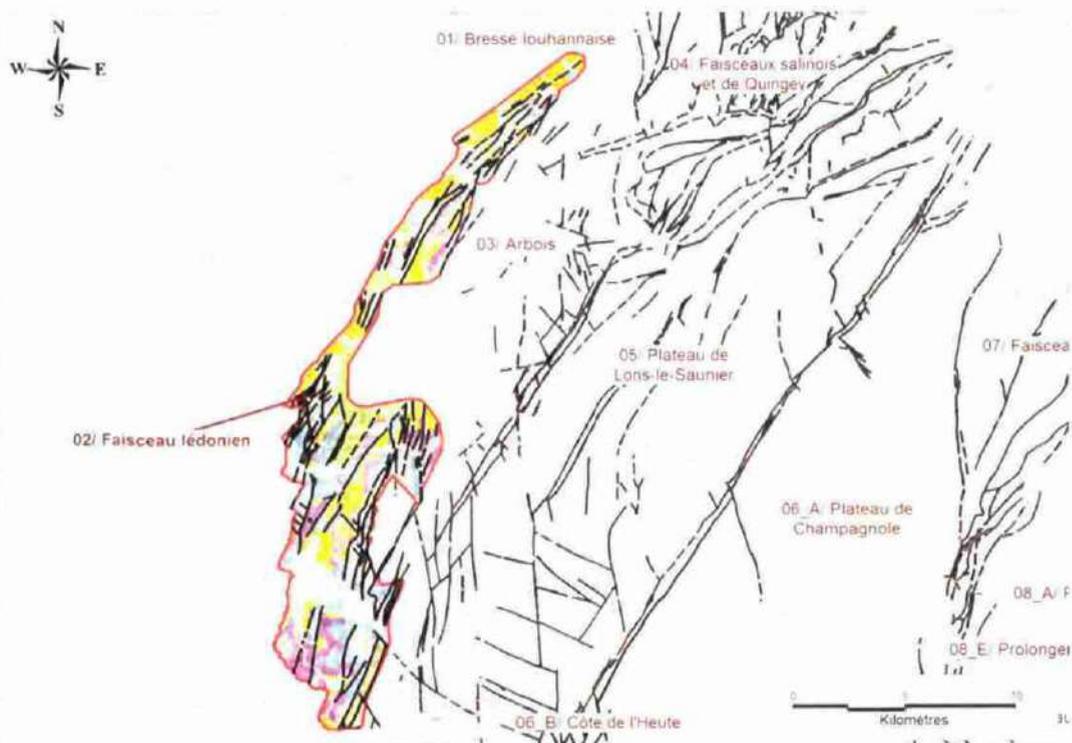


Illustration 8 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du faisceau lédonien.

3.2.3. L'Arbois (secteur 03)

Localisé entre le faisceau lédonien et le premier plateau du Jura (celui de Lons-le-Saunier), ce secteur comprend plusieurs failles parallèles au faisceau lédonien parfois recouvertes par des formations superficielles. Les pendages sont d'orientations très variables dans ce secteur.

Comme dans le faisceau lédonien, les formations affleurantes sont essentiellement les marnes du Trias (dolomitiques et gypsifères) et les marnes du Jurassique inférieur (avec quelques niveaux de calcaires marneux). Plus localement, le jeu des failles est responsable de l'affleurement de calcaires du Jurassique moyen (avec quelques niveaux marneux), mais les calcaires du Jurassique supérieur n'affleurent pas.

Les formations superficielles sont présentes sur près de 50 % de la superficie du secteur, recouvrant les formations marneuses triasiques ou du Jurassique inférieur :

- matériaux fluvioglaciers au sud (près de Poligny) ;

- nombreuses argiles (origine indéterminée : décalcification...) sur la moitié nord du secteur ;
- alluvions de la Cuisance.



Illustration 9 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'Arbois.

3.2.4. Faisceaux salinois et de Quingey (secteur 04)

Secteur complexe, il correspond au croisement des faisceaux de Salin et de Quingey (qui se prolongent au nord dans le Doubs). À ce niveau, il est difficile de les individualiser. Les failles sont très nombreuses, d'orientations NE-SO pour le faisceau de Quingey et d'orientation NNE-SSO pour le faisceau salinois. Les pentes sont variables et souvent faibles.

Les formations géologiques sont très variables :

- les marnes triasiques et jurassiques (inférieur, avec des niveaux calcaire à la base) dans la reculée de Salins-les-Bains, des formations triasiques et jurassiques inférieures constituent la partie basse des versants ;
- les calcaires du Jurassique moyen (avec très peu d'intercalations marneuses) constituent la partie haute des versants et sont essentiellement présents sur le faisceau de Quingey (partie est du secteur) ;

- les calcaires en alternance avec des calcaires marneux du Jurassique supérieur sont présents en majorité sur le faisceau salinois, du côté ouest du secteur, sur les marnes oxfordiennes.

Les formations superficielles sont rares sur ce secteur, excepté quelques alluvions.

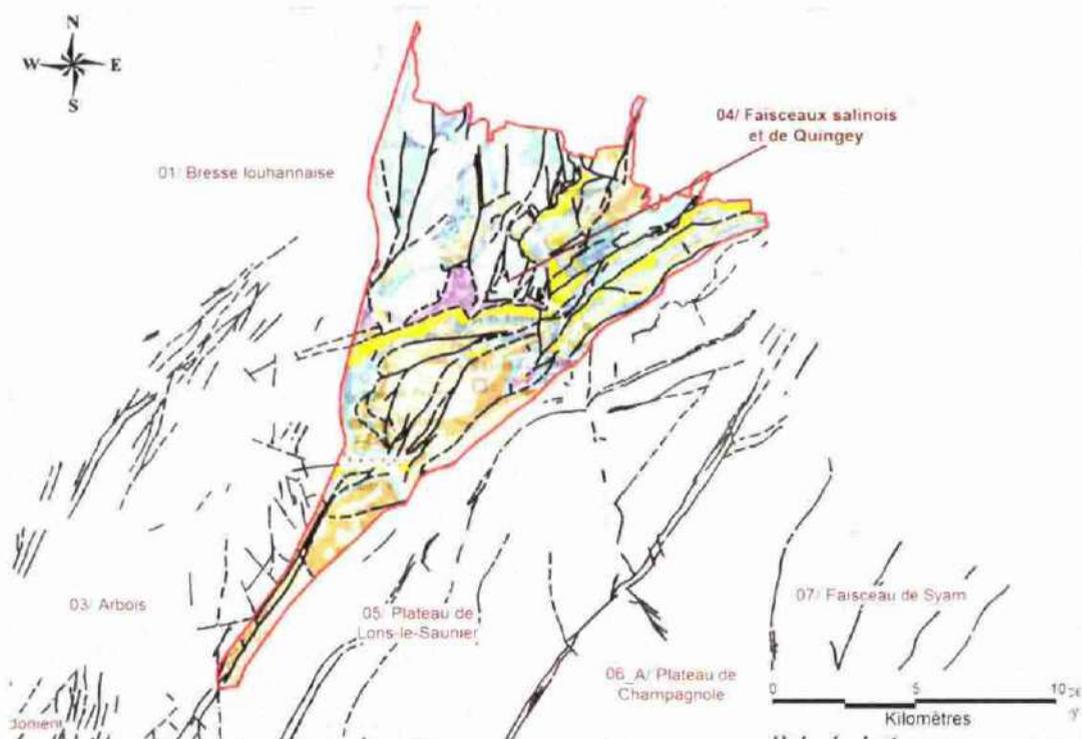


Illustration 10 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée des faisceaux salinois et de Quingey.

3.2.5. Plateau de Lons-le-Saunier (secteur 05)

Ce plateau (nommé également « Premier plateau du Jura ») est limité à l'est par le faisceau lédonien et à l'ouest par la faille de l'Heute (orientation NE/SO), qui traverse l'ensemble du département. Les formations sont tabulaires, quasi sub-horizontales (absence de plissements) sur l'ensemble du plateau. Des failles traversent le plateau selon trois directions principales (NE-SO, E-O, N-S).

Ce plateau est constitué de niveaux calcaires du Jurassique moyen (calcaires marneux à la base et au sommet). À la faveur des reculées (de Salins, des Planches et de Ladoye), les niveaux marneux du Trias ou du Jurassique inférieur affleurent en pied de versant sur des superficies limitées. En limite est du plateau, la faille de l'Heute forme avec les calcaires du jurassique moyen (voire supérieur) les premiers reliefs avant le Second plateau du Jura.

Les formations superficielles sont très peu développées sur ce secteur.

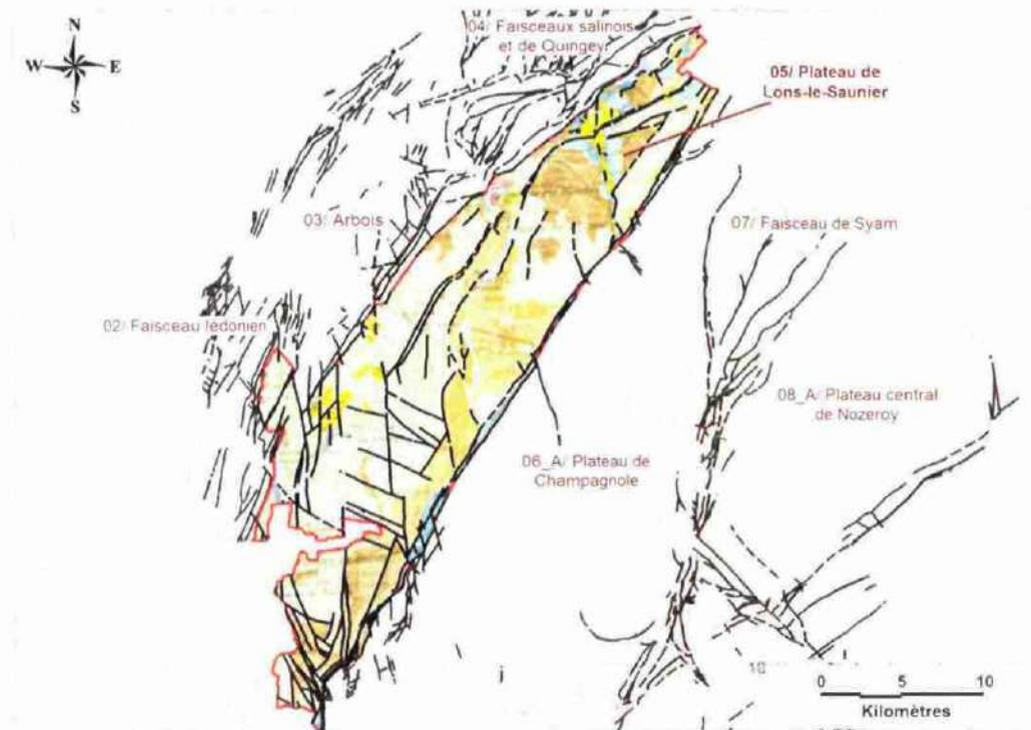


Illustration 11 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Lons-le-Saunier.

3.2.6. Plateau de Champagnole (secteur 06_A)

Nommé également Second plateau du Jura, le plateau de Champagnole est limité à l'ouest par la faille de l'Heute et à l'est par le faisceau de Syam et son prolongement jusqu'à l'avant-faisceau helvétique au sud. Les failles sont peu nombreuses et les formations sont tabulaires. Les faibles pendages sont répartis selon deux directions (ONO et ESE) étant donné la présence d'un très léger pli antiforme au centre du secteur. En extrémité SE un pli synforme s'amorce.

Le secteur se constitue en partie ouest de calcaires très peu marneux du Jurassique moyen (avec des marno-calcaires à sa base). Au centre, des butes topographiques et un léger pli antiforme permet aux formations marneuses de l'Oxfordien et aux calcaires parfois marneux du Jurassique supérieur d'affleurer. En bordure sud-est, l'amorce d'un pli synforme laisse affleurer des formations crétacées constituées de calcaires marneux avec des passages marneux ou dolomitiques.

Les formations superficielles sont constituées essentiellement de moraines et de matériaux fluvioglaciers, notamment dans la vallée de l'Ain sur des formations jurassiques et crétacées.

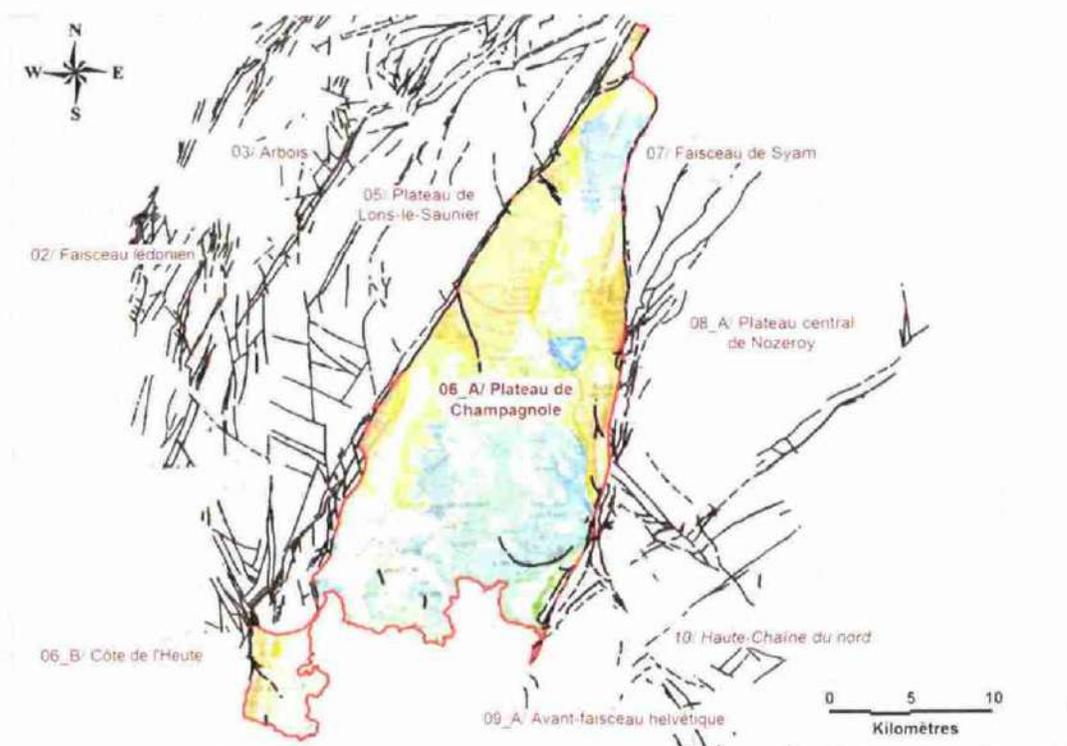


Illustration 12 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Champagne.

3.2.7. Côte de l'Heute (secteur 06_B)

La faille de l'Heute (orientation NNE-SSO, qui traverse tout le massif jurassien) sépare les plateaux de Lons-le-Saunier et de Champagne. Sur ce secteur restreint, près de Doucier, elle croise plusieurs failles d'orientation NO-SE longues de quelques kilomètres sous le plateau de Champagne, différenciant des compartiments de superficie réduite. Les pendages sont très hétérogènes d'un compartiment à l'autre (de 10 à 40°), dans des directions parfois opposées.

Les formations géologiques affleurantes sont identiques à celles du plateau de Champagne : formations calcaires peu marneux du Jurassique moyen et calcaires souvent marneux du Jurassique supérieur (qui reposent sur les marnes oxfordiennes). Les épaisses formations calcaires séquanienues et kimméridgiennes n'affleurent pas.

Des formations argileuses glacio-lacustre de la vallée de l'Ain recouvrent essentiellement des formations du Jurassique supérieur (calcaires ou marnes oxfordiennes) dans la partie sud.

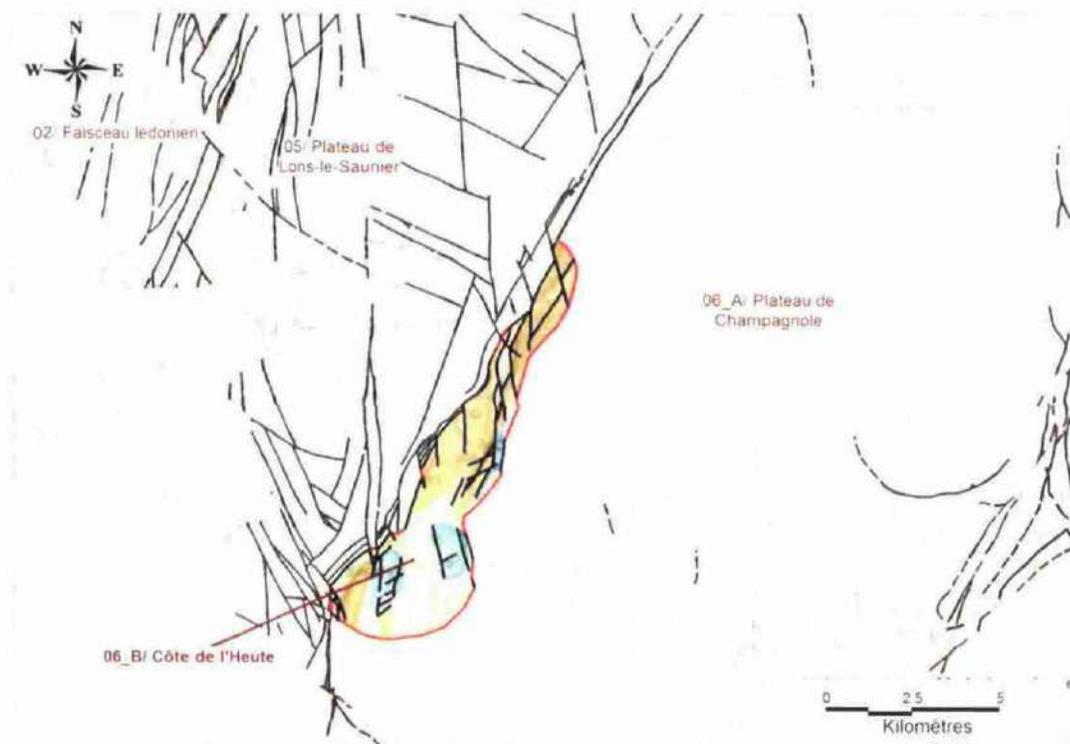


Illustration 13 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de la Côte de l'Heute.

3.2.8. Faisceau de Syam (secteur 07)

Le faisceau de Syam correspond à une zone complexe fortement plissée et faillée (orientation NNE-SSO) qui se divise lui-même en deux grands ensembles selon une faille NE-SO. Les plis s'accroissent vers le sud-est, en se rapprochant du faisceau helvétique.

De part et d'autre de la faille NE-SO se retrouvent les lithologies des plateaux voisins :

- à l'est (voisin de Champagnole), ce sont des formations calcaires du Jurassique moyen, avec des niveaux plus marneux à la base et au sommet de la série ;
- à l'ouest (voisin de Nozeroy), ce sont d'épaisses formations calcaires entrecoupées par des niveaux de marnes (Oxfordien) ou de calcaires marneux.

Les formations superficielles sont très peu présentes sur ce secteur.

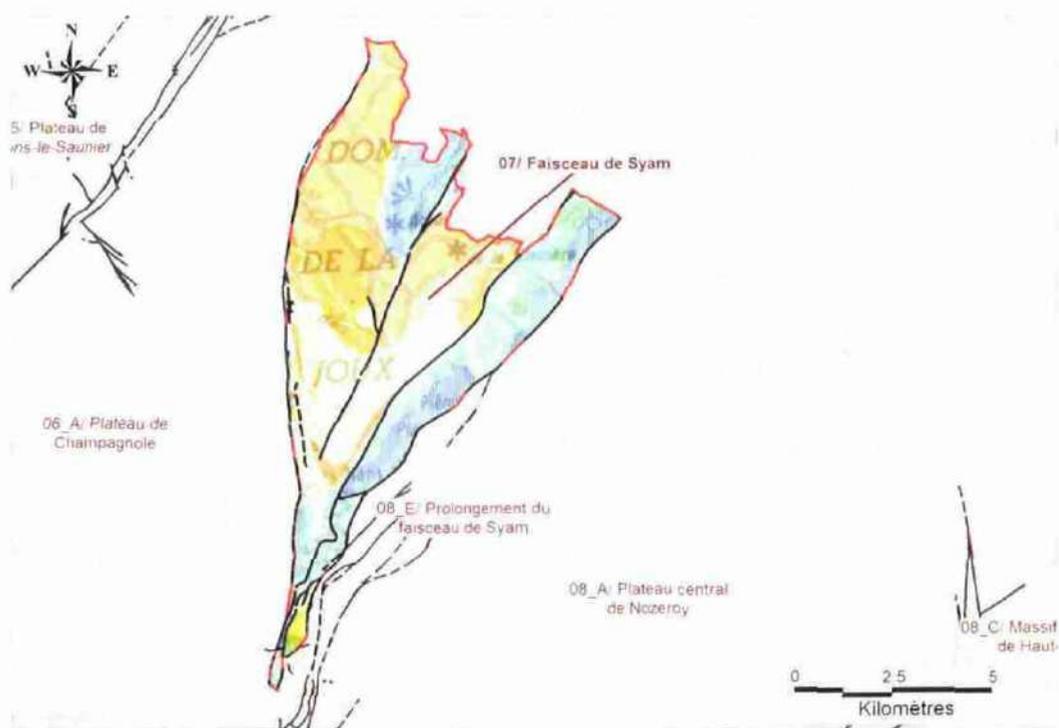


Illustration 14 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du faisceau de Syam.

3.2.9. Plateau central de Nozeroy (secteur 08_A)

Le plateau de Nozeroy correspond à un vaste pli antiforme en son centre, d'axe NE-SO. Quelques failles affectent le plateau. Il est bordé à l'est par le massif plissé de la Haute-Chaîne jurassienne (dont il est séparé par une zone de chevauchement) et à l'ouest par le faisceau de Syam et son prolongement méridional. Sur les bordures faillées sud-est et surtout nord-est s'amorcent des plis synformes.

Les épaisses formations calcaires (avec intercalations de calcaires marneux) du Jurassique supérieur constituent l'essentiel des formations affleurantes, dans l'axe du pli antiforme. Sur les flancs du pli, en bordure du plateau, les formations géologiques sont des alternances de marnes et calcaires du Crétacé.

Les moraines sont particulièrement présentes sur le plateau de Nozeroy : elles recouvrent en grande partie les formations calcaires jurassiques, mais également le contact avec les formations crétacées. Les alluvions sont peu présentes.

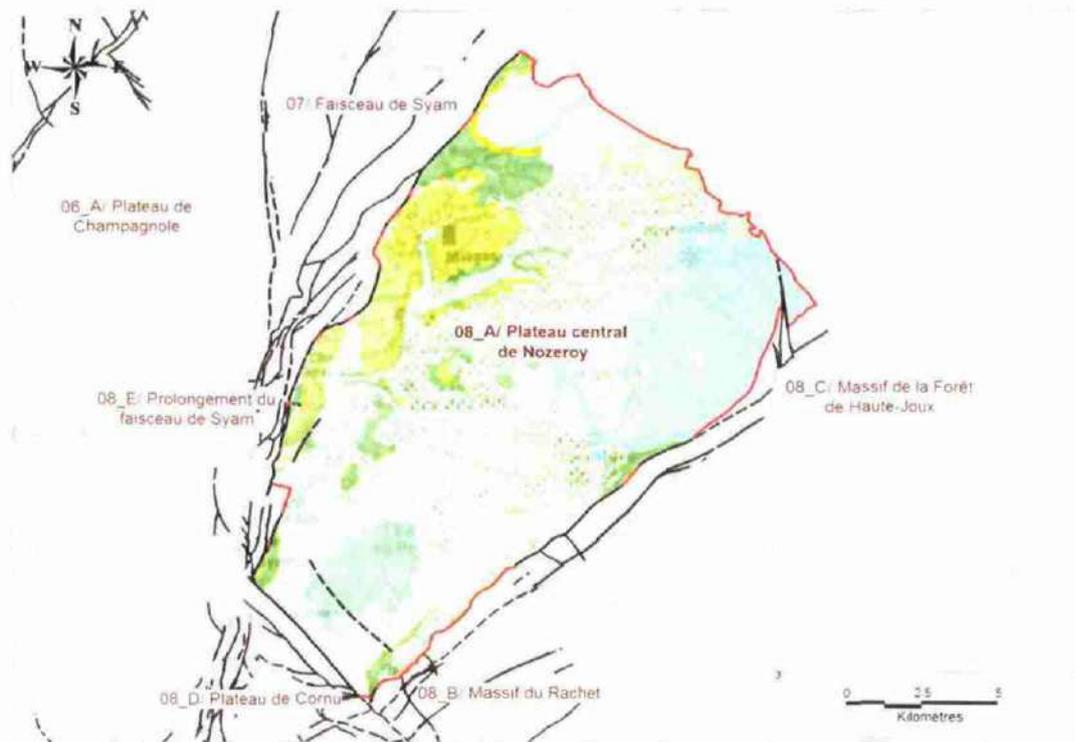


Illustration 15 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Nozeroy.

3.2.10. Massif du Rachet (secteur 08_B)

Ce massif aux fortes pentes correspond à un axe de chevauchement N-NE / S-SO du Jura plissé de la Haute-Chaîne sur le plateau de Nozeroy. Les pendages des formations sont uniformes et très fortement inclinés vers le SE (70 à 90°), lié à la position sur le flanc est d'un pli anticlinal renversé. Ce massif est séparé du massif de la Haute-Joux par une faille NO-SE (perpendiculaire au massif), dont les pendages sont inclinés dans la direction opposée.

Les formations qui constituent ce bloc en chevauchement sont d'épaisses formations calcaires avec quelques calcaires marneux du Jurassique supérieur. En bordure sud-est du secteur, les formations sont plus marneuses (oxfordiennes).

Les formations superficielles sont rares, excepté quelques dépôts morainiques peu étendus.

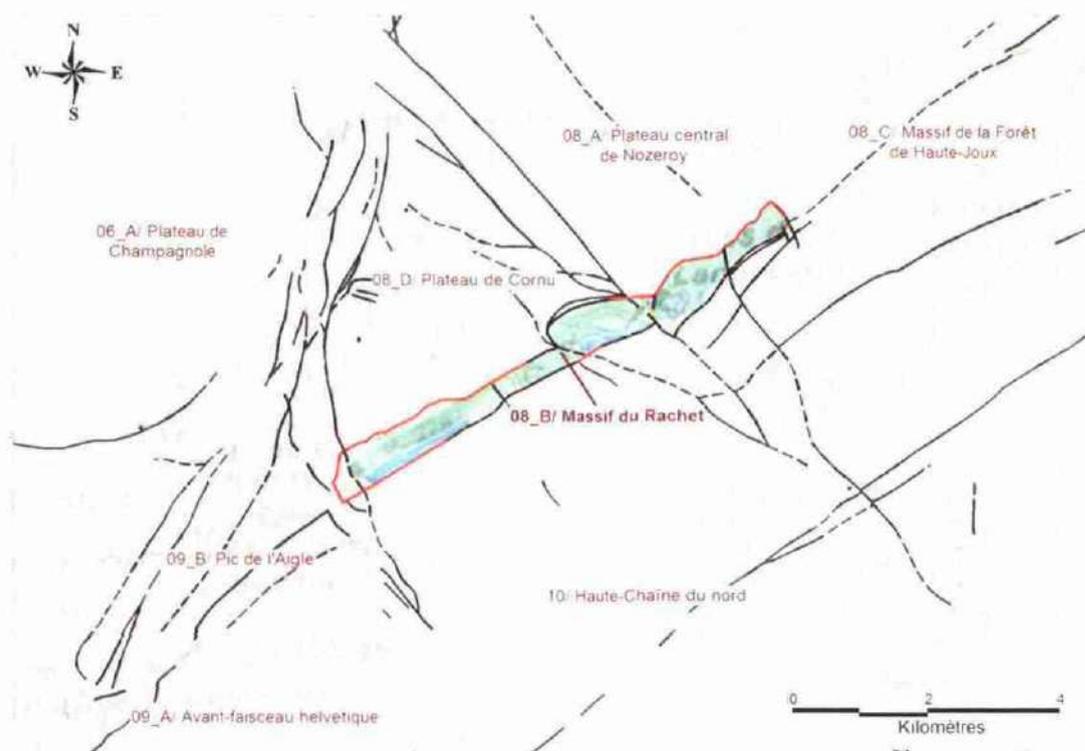


Illustration 16 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du massif du Rachtet.

3.2.11. Massif de la Forêt de Haute-Joux (secteur 08_C)

Ce massif est le prolongement nord du massif du Rachtet, dont il est séparé par une faille perpendiculaire au massif. Comme celui-ci, c'est un compartiment d'un pli anticlinal non-renversé situé sur une zone de chevauchement du Jura plissé sur le plateau de Nozeroy. Il se distingue du massif du Rachtet par le pendage des formations : l'orientation est opposée (vers le NO) et l'inclinaison est variable. D'après la carte géologique, l'inclinaison des valeurs de pendages diminue du sud (75°) vers le nord (10 à 20°) du massif.

Les formations affleurantes sont essentiellement les formations jurassiques, en grande partie calcaire. Le jeu de certaines failles en bordure est (limite Jura-Doubs) permet aux marnes crétacées d'affleurer.

Les formations superficielles sont rares sur ce secteur.



Illustration 17 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du massif de Haute-Joux.

3.2.12. Plateau de Cornu (secteur 08_D)

Le plateau de Cornu correspond à l'extrémité méridionale du plateau de Nozeroy, limité par la rencontre entre le prolongement du faisceau de Syam et le Jura plissé. Ce secteur se distingue par la présence de plusieurs failles NNO-SSE et d'un pli synforme très évasé (axe NNE-SSO).

Les formations constituant le secteur sont essentiellement les calcaires (avec peu de calcaires marneux) des derniers étages du Jurassique supérieur et les marnes à alternances calcaires du Crétacé. Ces terrains affleurent essentiellement dans l'axe du pli synforme et dans le coin nord-ouest.

Des moraines recouvrent les formations marneuses et calcaires du Crétacé. Les formations carbonatées du Jurassique supérieur sont peu concernées par ces recouvrements.



Illustration 18 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du plateau de Cornu.

3.2.13. Prolongement du faisceau de Syam (secteur 08_E)

Le faisceau de Syam se prolonge sur plusieurs kilomètres vers le sud, jusqu'au chevauchement du Jura plissé sur les plateaux, dans une zone étroite et très faillée. Ces failles séparent le plateau de Nozeroy du plateau de Champagnole. Les compartiments individualisés par ces failles peuvent être plissés, avec des variations de pentages.

La complexité structurale de ce secteur est responsable de fortes variations des formations affleurantes. Les formations peuvent être d'âge Crétacé (calcaires marneux) ou Jurassique supérieur (calcaires avec quelques intercalations marneuses ou marnes de l'Oxfordien). Le Jurassique moyen, constitué de niveaux calcaires, est peu présent à l'affleurement.

Ce secteur comprend très peu de formations superficielles en raison de la topographie des lieux.



Illustration 19 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée du prolongement du faisceau de Syam.

3.2.14. Avant-faisceau helvétique (secteur 09_A)

Ce secteur appartient au Jura plissé. Il est séparé des plateaux par une zone de chevauchement à l'origine du relief du Pic de l'Aigle, au nord-ouest. Il est séparé de la Haute-Chaîne au nord, également plissée, par la faille de la Lemme (N145°). Les extrémités nord et sud du secteur sont concernées par des plis antiformes tandis qu'un pli synforme traverse le centre du secteur. L'axe des plis est NO-SE. La fracturation est relativement importante, notamment vers le pli synforme.

Les formations géologiques du secteur sont constituées des calcaires avec alternances de calcaires marneux du Jurassique supérieur dans les plis antiformes et des alternances de marnes et calcaires du Crétacé dans les plis synformes. À noter qu'en extrémité ouest, les calcaires du Jurassique moyen affleurent.

Quelques moraines recouvrent essentiellement les formations de marnes et calcaires du Crétacé, mais également les marnes oxfordiennes et les calcaires du Callovien en extrémité nord-ouest du secteur.

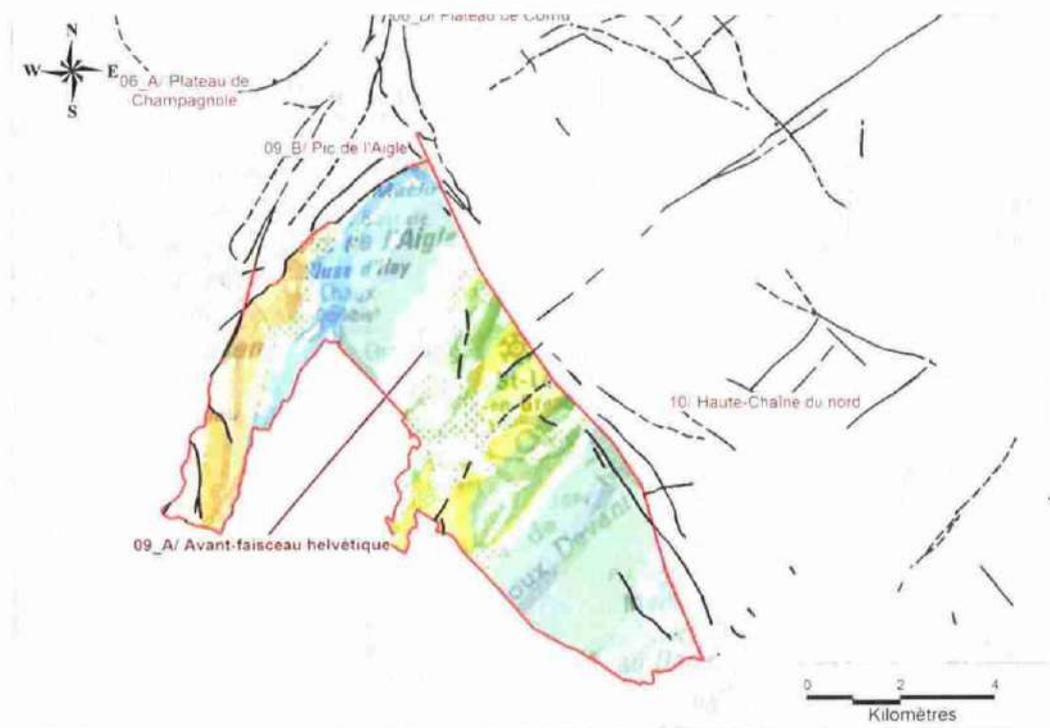


Illustration 20 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'avant-faisceau helvétique.

3.2.15. Pic de l'Aigle (secteur 09_B)

Prolongement méridional du massif du Rachet au-delà de la faille de Lemme (orientée N145°), le secteur est une zone de chevauchement SO-NE du Jura plissé sur les plateaux. Comme les massifs en bordure du plateau de Nozeroy, les formations géologiques sont très redressées ($> 40^\circ$), il s'agit vraisemblablement du flanc N-O d'un pli coffré. Les fractures et diaclases sont nombreuses, dont certaines peuvent contenir des argiles rouges de décalcification.

Les formations géologiques sont variées, entre les calcaires à alternances de calcaires marneux du Jurassique supérieur (formations prédominantes) et les marnes à alternances calcaires du crétacé (ponctuelles à l'affleurement).

Les formations superficielles sont constituées essentiellement d'éboulis au pied des nombreuses falaises et de quelques moraines.



Illustration 21 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de l'avant-faisceau helvétique.

3.2.16. Haute-Chaîne du nord (secteur 10)

Ce secteur appartient à la partie nord de la Haute-Chaîne dans le département du Jura. Il se caractérise par une succession de plis peu serrés, à tendance coffrée. Les accumulations de contraintes sont également à l'origine de plusieurs failles parallèles aux zones de chevauchement (situées au nord) ou parallèles aux grands décrochements NNO-SSE.

Les formations géologiques constituant le secteur dépendent de la géologie structurale : des calcaires du Jurassique moyen et des calcaires à intercalations de calcaires marneux du Jurassique supérieur sont présents en extrémité nord du secteur. Au centre, l'axe d'un pli synforme laisse affleurer des alternances de calcaires et marnes du Crétacé. Enfin, le sud du secteur est constitué essentiellement de formations calcaires à intercalations de calcaires marneux du Jurassique supérieur et des niveaux marneux de l'Oxfordien.

Les formations morainiques recouvrent certaines parties du secteur, le plus souvent dans les creux topographiques liés aux plis synformes.

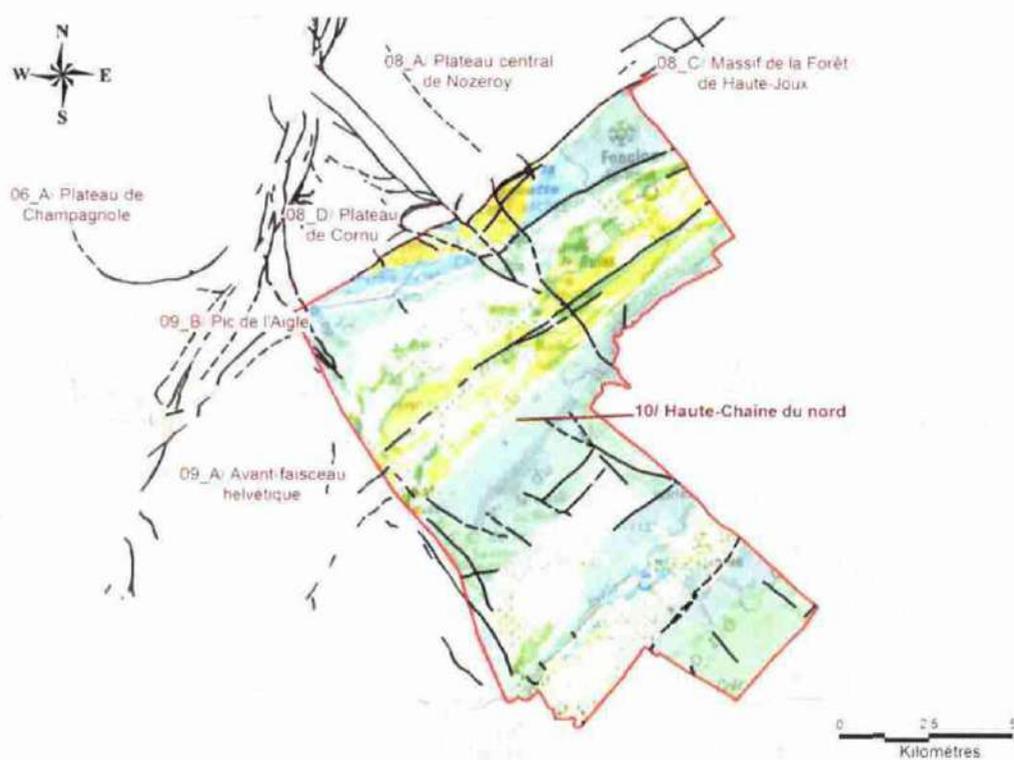


Illustration 22 : Carte géologique 1/50 000 harmonisée de la Haute-Chaine du nord.



4. Cavités souterraines et désordres associés

Dans le département du Jura, les cavités souterraines naturelles sont liées à des phénomènes de dissolution de deux lithologies spécifiques :

- dissolution des formations évaporitiques (anhydrite, gypse présents dans les marnes triasiques et liasiques) ;
- dissolution des formations carbonatées (essentiellement Jurassique moyen et supérieur), dits karstiques.

L'étude ne concerne que les cavités naturelles et n'aborde pas les cavités anthropiques qui peuvent exister sur le territoire et qui ont des caractéristiques spécifiques. Ainsi, les cavités souterraines liées aux travaux d'extraction des salines du Jura au XIX^e siècle ne sont pas prises en compte.

4.1. CONSTITUTION D'UN INVENTAIRE DES CAVITÉS NATURELLES ET DÉSORDRES ASSOCIÉS

Afin de pouvoir évaluer correctement les niveaux de susceptibilité, les inventaires doivent être suffisamment fournis pour être représentatifs de l'état du phénomène redouté : « l'apparition d'un désordre en surface lié à la présence d'une cavité naturelle en profondeur », que l'on cherche à approcher. Rassembler ces données ponctuelles est indispensable pour comprendre le phénomène dans son ensemble. Rappelons que ces informations constituent la seule connaissance certaine du phénomène.

Ainsi, nous collecterons les informations sur les cavités naturelles ainsi que l'ensemble des manifestations qu'elles peuvent provoquer en surface (doline, fontis, résurgence, perte...).

4.1.1. À partir des bases de données nationales

Dans le département du Jura, le BRGM a réalisé en 2003 pour le MEEDDM un inventaire des cavités souterraines (hors mines) dont les résultats ont été incorporés à la base nationale des cavités souterraines BD-Cavités (interrogeable sur www.bdcavite.net ou sur le portail Infoterre). Le rapport BRGM/RP-52586-FR (2003) rappelle les principales étapes de ce recensement. Les données enregistrées proviennent essentiellement des mairies de toutes des communes du Jura (par le biais d'enquête) et de la SNCF, mais pas encore des connaissances des spéléologues.

À partir de la banque de données du sous-sol (BSS, interrogeable sur le portail Infoterre et gérée par le BRGM), ce sont 208 phénomènes liés à des cavités naturelles (essentiellement des conduits souterrains) qui sont recensés sur la zone pilote étudiée (sur un total de 616 dans le département du Jura).

Enfin, le BRGM a réalisé en 2008, pour le MEEDDM, un inventaire des mouvements de terrain en surface dont les résultats ont été incorporés à la base nationale des mouvements de terrain BD-MVT (interrogeable sur www.bdmvt.net ou sur le portail Infoterre). Le rapport BRGM/RP-55976-FR (2008) rappelle les principales étapes de ce recensement. Parmi les mouvements de terrain recensés, 93 sont des phénomènes d'affaissement/effondrement vraisemblablement (observations de surface) liés à des cavités souterraines sur la zone pilote (sur un total de 158 dans le département du Jura).

4.1.2. Données du Comité Départemental des Spéléologues du Jura

En 2009, la Fédération Française de Spéléologie (FFS) et le BRGM ont signé une convention nationale pour la mise à disposition de données relatives aux cavités détenues par la FFS, ses CDS (Comités Départementaux de Spéléologie) et clubs affiliés. L'usage de cette convention a été sollicité dans le cadre de cette étude, afin d'augmenter la représentativité de l'inventaire national disponible. Ainsi, une convention d'application a été signée localement sur le département du Jura, avec le Comité départemental spéléologique du Jura (CDS 39) en automne 2010.

Fin octobre 2010, le CDS 39 a ainsi fourni au BRGM un tableur informatique regroupant 2 124 nouvelles données, regroupant des cavités ou désordres, avec leurs coordonnées X-Y et une brève description.

Parmi ces données :

- 164 points ont dû être retirés car leurs coordonnées les situent hors du département (le CDS travaille actuellement à la précision de ses données, mais pour respecter le délai de l'étude le BRGM a demandé au CDS 39 de fournir le fichier en l'état) ;
- 4 points concernent des cavités souterraines artificielles (mines...) ;
- 7 points n'ont pas été exploités en l'absence d'une description claire ;
- 197 points ont été retirés du fichier car identifiés comme doublon avec les données BD-Cavités et/ou BSS. Les conditions de délai et de budget du projet ne permettent pas de les éliminer avec une vérification manuelle, mais un tri automatique a été fait sur les coordonnées X & Y. Il peut donc exister d'autres doublons ;
- au total, il reste donc 1 754 données exploitables dans le fichier du CDS 39, dont 899 sur la zone pilote.

À l'avenir, ces données seront ajoutées à la base nationale BD-Cavités.

4.1.3. Données hydrogéologiques (sources, cavités, pertes et traçages)

Les informations hydrogéologiques disponibles sur la région Franche-Comté ont été compilées lors de la réalisation de la synthèse hydrogéologique, à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée. Les sources et pertes karstiques recensées à cette occasion, ont ainsi été intégrées à la BSS.

Par ailleurs, cette étude a également rassemblé les traçages effectués, issus essentiellement de la base de données de la DREAL Franche-Comté. Bien que ces données n'aient pas été vérifiées lors de leur saisie, elles sont globalement représentatives et constituent une information précieuse améliorant la connaissance sur la localisation des réseaux karstiques, qui vient compléter la connaissance ponctuelle disponible par ailleurs (cavité, perte, sources...). La configuration du réseau entre le point d'entrée et le point de sortie n'est donnée qu'à titre indicatif. Notons cependant que la localisation des traçages et notamment la densité de traçages par endroit, est dépendante des enjeux locaux en termes de pollution principalement. Au total, 374 traçages sont recensés sur la zone pilote (cf. Illustration 23).

4.1.4. Consultation des autres organismes

Outre la Fédération Française de Spéléologie (FFS), il s'est avéré important de s'assurer si d'autres sources de données complémentaires, faciles d'accès et suffisamment fournies, étaient disponibles.

Dans le cadre de la première réunion du comité de pilotage du 05/05/2010, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de Franche-Comté et la Direction Départementale des Territoires (DDT) du Jura ont indiqué ne pas posséder de recensement des cavités autres que BD-Cavités. D'après les participants, aucun arrêté CatNat relatif à des cavités n'aurait été pris dans le Jura.

Le Conseil Général du Jura (Direction des équipements départementaux), en charge notamment d'intervenir sur les dommages sur le réseau routier, a été contacté en mai 2010, mais celui-ci ne dispose pas d'inventaire (seules quelques données ponctuelles seraient disponibles auprès des subdivisions). Les désordres existent et sont fréquents sur le territoire, mais ne sont pas recensés de manière formelle.

La détection de dolines sur les cartes IGN et la BD Topo n'est pas compatible avec l'échelle de l'étude, mais reste un moyen adapté pour améliorer la connaissance des désordres affectant le territoire. À plus long terme, un traitement informatique automatique pourrait donc être envisagé sur un modèle numérique de terrain (MNT) plus précis que le 25 m actuellement mis à disposition par l'IGN.

4.2. ANALYSE DES DONNÉES RECENSÉES

4.2.1. Répartition des données recensées sur la zone pilote

Au total 1 240 phénomènes ont été recensés et localisés sur la zone d'étude (sur un total de 2 639 pour l'ensemble du département). La très grande majorité d'entre eux se situe sur le Plateau de Lons-le-Saunier (secteur 05), comme le montre l'Illustration 23.

La localisation des données varie pour chaque source. Leur précision est suffisante pour l'échelle de travail de l'étude (exemple : cartes géologiques au 1/50 000, soit une

précision de ± 50 m), mais ne pourrait pas être utilisée en l'état à l'échelle parcellaire par exemple.

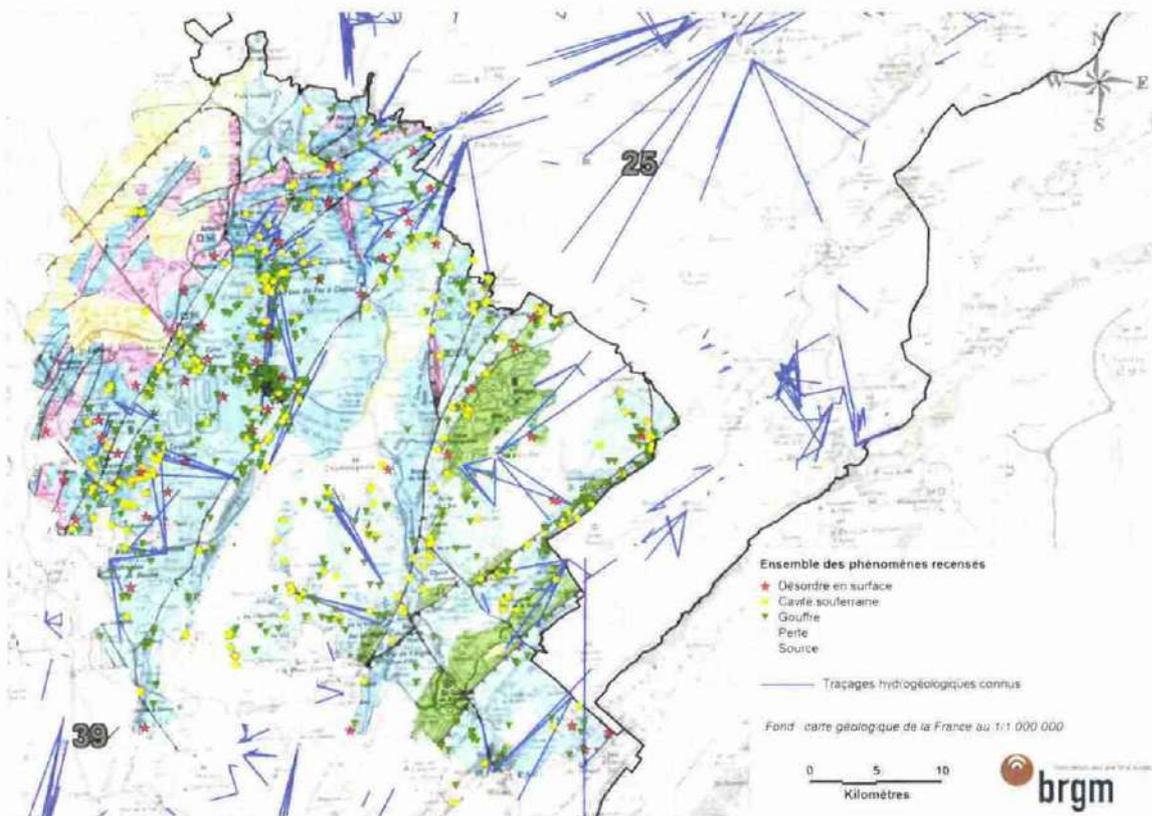


Illustration 23 : Carte de localisation des événements liés à une cavités naturelles, recensés sur le site pilote.

Les données des spéléologues ont des coordonnées avec une précision assez homogène (de ± 10 à 25 m en fonction du support : relevé gps ou carte topographique). Leurs coordonnées sont celles des points d'entrée des cavités souterraines : les falaises des reculées du Jura (bordure occidentale du massif), dans lesquelles débouchent plusieurs grottes, sont ainsi soulignées sur la carte suivante. Au contraire, sur les plateaux (Premier plateau notamment), ce seront surtout des gouffres. La position de l'ensemble de la cavité (plan de galerie) n'est pas cartographiée dans cette étude à l'échelle départementale.

Les données issues des bases de données nationales (bd-mvt et bd-cavités) sont plus hétérogènes : elles peuvent provenir d'inventaires à l'échelle parcellaire (lors d'une étude de sol par exemple) ou au contraire de témoignages anciens et non recoupés, auquel cas la précision est inférieure à la centaine de mètres. Dans certains cas, la donnée a même pu être positionnée sur le centroïde de la commune.

La précision variable des coordonnées des phénomènes recensés incite à travailler de manière statistique et non analytique.

La plupart des doublons entre les données des spéléologues et celles connues dans les bases de données nationales ont été éliminées par comparaison des coordonnées et/ou du nom du site. Mais les imprécisions de localisation indiquées précédemment font qu'il reste probablement quelques doublons entre les bases (nombre négligeable en comparaison du nombre total de phénomènes).

4.2.2. Interprétation des typologies recensées

L'application de la méthode nécessite de distinguer dans l'inventaire, les cavités *stricto-sensu*, des désordres de surface. Rappelons qu'un désordre est seulement la manifestation en surface de l'évolution d'une cavité existante en profondeur. Si tout désordre révèle systématiquement la présence d'une cavité, toute cavité n'est pas nécessairement associée à un événement en surface.

Une classification de ces événements a été réalisée, à partir de la typologie employée. Rappelons cependant, que ces distinctions reposent sur une interprétation des descriptifs et des terminologies renseignées dans les bases de données, et qui sont potentiellement subjectifs.

La catégorie « désordre » regroupe donc les événements observables en surface, (ex de typologie employée : effondrement, doline, aven, entonnoir...) qui ont été différenciés des cavités souterraines *stricto sensu* (cavité, boyau, grotte, rivière souterraine...). D'autres catégories ont été distinguées, notamment les « puits », « source » et « perte », car elles sont moins explicitement exploitables en termes de susceptibilité.

Les données ont ainsi été dissociées en 6 types en fonction de la nature du phénomène :

- les cavités : conduits souterrains ou boyaux (horizontaux ou verticaux, inondés ou non) grottes ;
- les gouffres, qui correspondent à une remontée de la cavité souvent jusqu'en surface ;
- les puits, qu'il est difficile de regrouper avec un autre type de cavité (gouffres de taille étroite) ;
- les sources, regroupant les exurgences et les résurgences ;
- les pertes d'eau connues ;
- les désordres en surface liés à des cavités : dolines, avens, affaissements, effondrements.

Le tableau suivant illustre pour chaque source le nombre et le type de données disponibles sur la zone pilote vs l'ensemble du département du Jura. La répartition des événements sur la zone pilote est illustrée en Illustration 24. 84 % des événements correspondent à des cavités (souterraines ou sub-affleurantes (gouffres).

Type de données	Nombre de données/source sur la zone pilote				
	BD-Cavités	BSS	BD-MVT	CDS 39	Total
Cavités	20	133	0	263	416
Gouffres	9	65	0	572	646
Puits	10	0	0	0	10
Sources	0	4	0	18	22
Pertes	0	0	0	22	22
Désordres	0	93	6	25	124
Totaux	39	295	6	900	1240

Type de données	Nombre de données/source sur le Jura				
	BD-Cavités	BSS	BD-MVT	CDS 39	Total
Cavités	62	409	0	732	1204
Gouffres	21	171	0	844	1037
Puits	22	1	0	0	23
Sources	2	26	0	89	117
Pertes	3	0	0	51	54
Désordres	2	158	7	37	204
Totaux	112	766	7	1754	2639

Tableau 2 : Données recensées en cavités souterraines et désordres de surface.

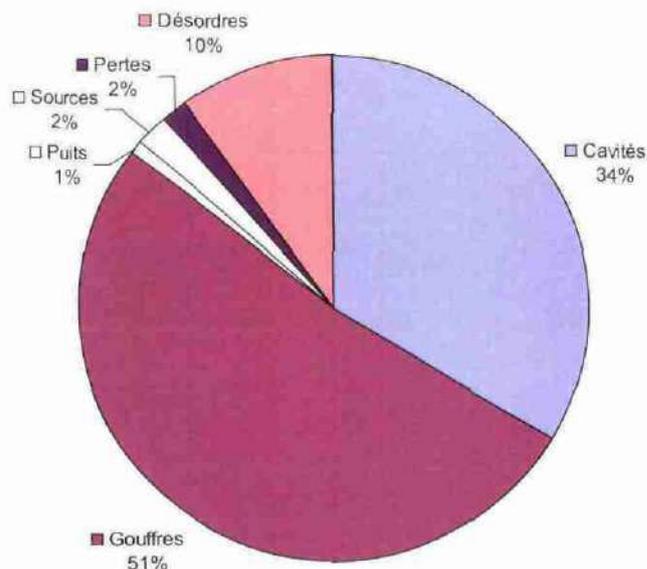


Illustration 24 : Répartition des événements recensés dans la zone pilote.

4.2.3. Constitution d'une base de données de connaissance

En compilant plusieurs sources de données, cette étude a permis de rassembler **2 639 événements géoréférencés, représentatifs du phénomène de cavités naturelles pour le département du Jura** (1 240 sur la zone pilote).

Cette base de données reste la connaissance la plus aboutie actuellement concernant le phénomène naturel étudié, auquel il convient de se reporter en parallèle de la carte de susceptibilité qui ne consiste qu'en une interprétation de ces données ponctuelles.

Ces données géolocalisées rassemblées au sein de la même base de données (table MapInfo ©), sont mises à disposition des Services de l'État, dont la structure est présentée dans le Tableau 3.

ID	Type	Desc	Nom_usuel	X_LZE	Y_LZE	Z	Origine	Not	Commune	Secteu	Strati_a1	Depr
cds_1903	cavité	Grotte sub horizontale	CANAL-DE-ST-JOSEPH A (sub)Gr	867 070	2 222 770	280	CD539	GR	SALINS-LES-BAINS	4	JF	39
cds_1904	cavité	Grotte sub horizontale	CANAL-DE-ST-JOSEPH B (sub)Gr	867 070	2 222 770	280	CD539	GR	SALINS-LES-BAINS	4	JF	39
cds_10	gouffre	gouffre	GOUDOT (Gr)	864 830	2 222 790	255	CD539	GF	MOLEPERRE	4	JF	39
cds_1918	perle	perle	RISOUSE (Perle de la)	867 430	2 224 150	250	CD539	PE	SALINS-LES-BAINS	4	JF	39
cds_1906	source	source	CHAUMERE (Emergence de la)	867 580	2 222 510	256	CD539	EM	SALINS-LES-BAINS	4	JF	39
cds_974	cavité	Grotte sub horizontale	LA CHAPELLE B	867 420	2 227 280	275	CD539	GR	CHAPELLE-SUR-FUREUS	4	JFb	39
cds_1925	cavité	boisau vertical	CHAUDREUX (Daclose de l')	872 570	2 225 450	588	CD539	DIA	SALINS-LES-BAINS	4	JFb	39
bdMvt_019	désordre	Effondrement	Combe Rouge	868 942	2 220 328	0	bd-mvt		BRACON	4	0	39
cds_59	cavité	Grotte sub horizontale	SAUNE QUI PEUT (Gr)	862 360	2 216 570	250	CD539	GR	ARBOIS	4	M-J	39
cds_1406	cavité	Grotte sub horizontale	MOITIGNY (Gr de l')	862 840	2 216 350	460	CD539	GR	MOITIGNY-LES-ARSAURE	4	M-J	39
cds_489	cavité	Grotte sub horizontale	CHASSAGNE A (Gr de l')	867 440	2 216 740	580	CD539	GR	BRACON	4	M-J	39
DESEZAD002	gouffre	gouffre		869 860	2 221 400	500	SSS	TROU		4	M-J	39
cds_1902	cavité	Grotte sub horizontale	BAUMETTES B (Gr des-)	868 490	2 222 900	258	CD539	GR	SALINS-LES-BAINS	4	m	39
cds_1917	cavité	Grotte sub horizontale	MONTELLIER (Gr de-)	868 580	2 222 210	256	CD539	GR	SALINS-LES-BAINS	4	m	39
cds_1901	cavité	Grotte sub horizontale	BAUMETTES A (Gr des-)	868 460	2 222 900	258	CD539	GR	SALINS-LES-BAINS	4	m	39
cds_1909	gouffre	gouffre	ARELLE (Gr de-)	869 010	2 223 480	400	CD539	GF	SALINS-LES-BAINS	4	m	39
cds_1923	perle	perle	VILLA-DES-ROSES (Perle de la)	868 180	2 222 860	255	CD539	PE	SALINS-LES-BAINS	4	m	39
bdMvt_130	désordre	Effondrement	Margolis - Ancienne gare	869 136	2 222 258	0	bd-mvt		SALINS-LES-BAINS	4	NS-7	39
bdMvt_131	désordre	Effondrement	Les St-Pérol	869 136	2 222 258	0	bd-mvt		SALINS-LES-BAINS	4	NS-7	39

Tableau 3 : Structure de la base de données karsts et désordres de surface.

4.3. PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX DONNÉES D'INVENTAIRE

Les caractéristiques intrinsèques des inventaires de données comme celui-ci mettent en évidence les limites suivantes :

- l'inventaire n'est pas exhaustif ; le caractère souterrain des cavités en limite la connaissance. D'où l'importance de spatialiser une information disponible ponctuellement ;
- les données recensées sont localisées mais leurs caractéristiques sont rarement détaillées (profondeur, taille, formation géologique concernée...). La précision est donc largement insuffisante pour envisager une expertise détaillée ;
- un biais anthropique, difficilement quantifiable, est introduit dans la répartition des données sur le territoire.

Cependant, avec **1 240 phénomènes recensés sur la zone pilote de 1 679 km², l'inventaire est considéré comme représentatif de l'existant**. La méthode proposée permet de propager l'information disponible ponctuellement, tout en s'affranchissant de l'hétérogénéité de sa répartition.

À ce sujet, voici l'exemple de deux types de biais dans la répartition des données de l'inventaire :

1. La concentration des informations est attendue meilleure en milieu urbain qu'en milieu rural ou meilleure dans certaines zones du département selon leur

fréquentation. Ainsi, la forêt domaniale des Moidons concentrent les informations disponibles sur la zone pilote (environ 250 événements soit 1/5 de la totalité) sans que nous sachions si cette concentration s'explique par une configuration particulièrement favorable aux développements de cavités ou si l'accessibilité du site favorise la fréquentation des spéléologues.

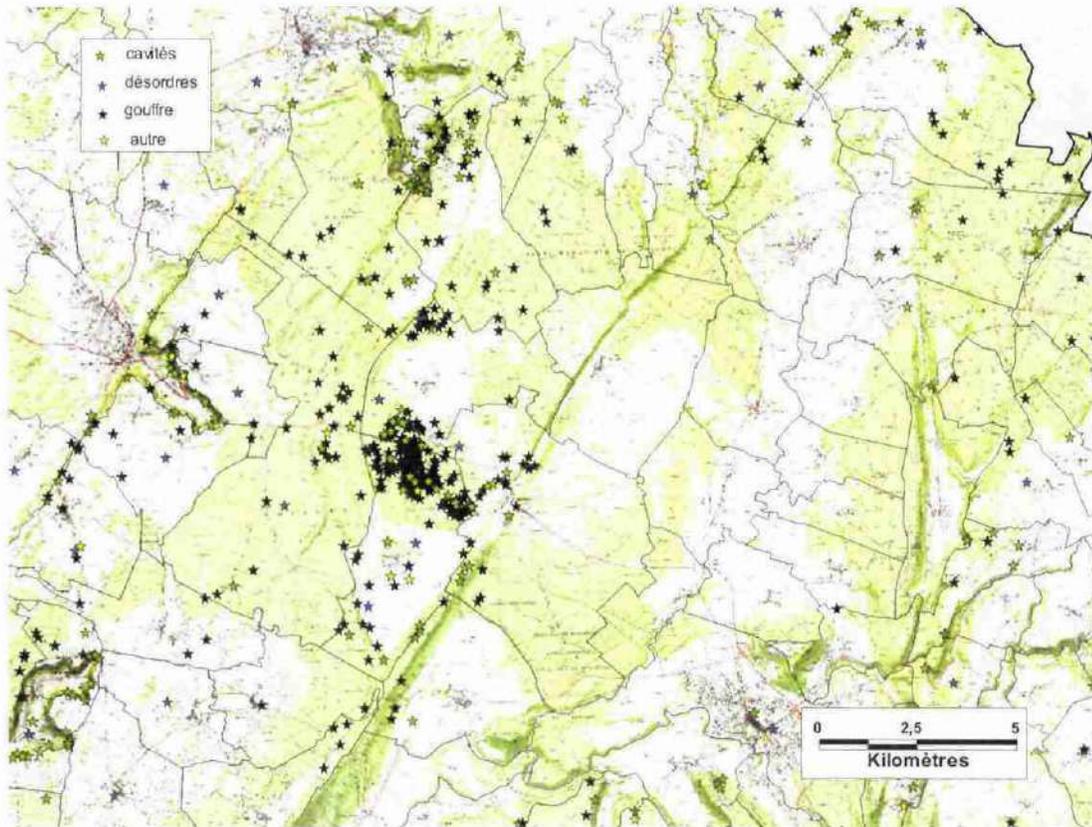


Illustration 25 : Concentration des événements dans la forêt domaniale des Moidons (communes de Besain et Molain).

2. Un autre biais est lié à la topographie. L'illustration 26 met en évidence l'alignement des cavités connues le long des vallées, à flanc des plateaux : les zones rouges sont marquées par un fort dénivelé et représente notamment les falaises. L'érosion a entaillé les plateaux calcaires à ces endroits, donnant accès aux niveaux karstiques à flanc de coteau ou sur les falaises (mais non repérables sur les plateaux).

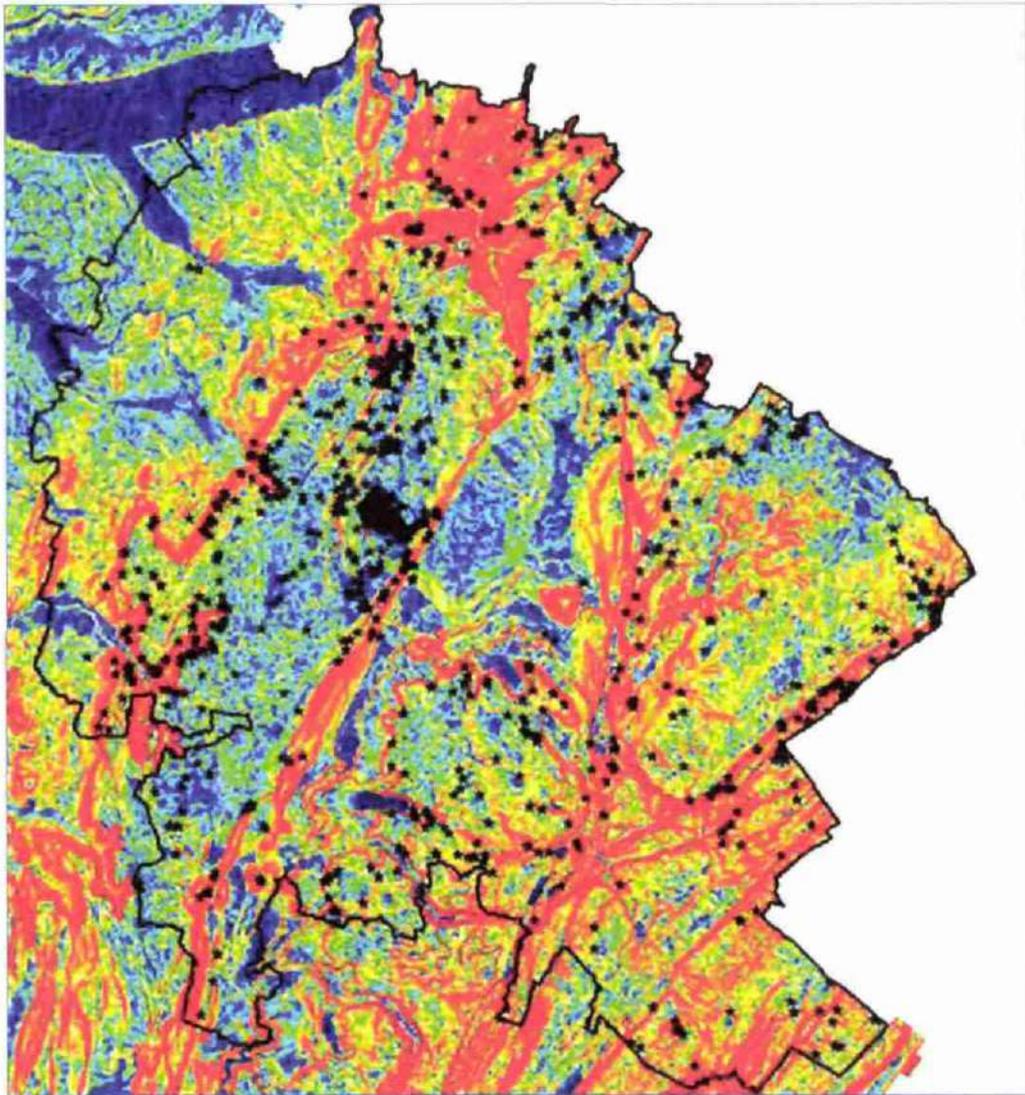


Illustration 26 : Pente dérivée du MNT (en rouge : forte pente, en bleu : faible pente).

5. Synthèse des connaissances concernant les cavités naturelles dans le sous-sol jurassien

Dans l'objectif d'établir une liste de critères explicatifs de la présence de cavités naturelles dans le sous-sol jurassien et de leur possibilité d'effondrement, une étude bibliographique a été réalisée en amont du projet.

Le but de cette recherche bibliographique était de rassembler les informations déjà publiées concernant les cavités naturelles ; la zone d'étude ne s'est pas limitée au département du Jura, mais aux formations litho-stratigraphiques qui composent le sous-sol jurassien. Au final, peu d'informations concernent directement des sites localisés au sein notre zone d'étude. D'autres part, aucune information n'aborde spécifiquement les cavités évaporitiques, elles concernent essentiellement les vides karstiques.

Ces recherches ont été menées dans diverses sources, à savoir, la base des rapports publics du BRGM (sur internet : <http://www.brgm.fr/publication/rapportpublic.jsp>), le moteur de recherche des publications électroniques du BRGM (broogle.brgm.fr, site intranet), et la base de données bibliographiques GEOREF.

5.1. FACTEURS DE PRÉSENCE DE CAVITÉS NATURELLES

Le résultat de la recherche bibliographique a été relativement riche en ce qui concerne l'identification de facteurs de présence de cavités karstiques. Le principal critère qui ressort de l'étude est le critère stratigraphique ; viennent ensuite les critères liés à l'état de fracturation de la roche, à la nature des terrains de couverture ou à la présence de niveaux étanches.

Dans le cas général, la dissolution des roches carbonatées est d'autant plus importante qu'elles présentent :

- une forte proportion de carbonate (calcite et/ou dolomite) ;
- une structure massive et homogène permettant le creusement de conduits sans comblement par les débris dus au délitement de la roche ;
- une forte fracturation.

On se reportera à l'étude Donsimoni *et al.* (2008) (rapport BRGM/RP-55711-FR) pour des généralités sur les facteurs physiques et chimiques de karstification.

5.1.1. La stratigraphie

De nombreuses études disponibles en bibliographie apportent des informations sur le niveau de karstification des différentes formations calcaires composant le sous-sol jurassien.

Dans un rapport de 1965, Colin s'intéresse à la géologie du Jura lédonien, lequel s'étend sur une partie du Vignoble, et sur une partie du 1^{er} plateau (cf. les secteurs structuraux chapitre 6). Il propose un log géologique sur la zone des terrains secondaires avec annotation des zones karstiques (Illustration 56 en Annexe 2 – figure tronquée au Jurassique inférieur et moyen). Deux formations sont mises en évidence pour leur altération karstique généralisée ou quasi généralisée, à savoir les calcaires du Bathonien, et les calcaires du Bajocien.

De manière générale, les différents auteurs sont assez unanimes pour citer les calcaires du Bathonien et du Bajocien comme siège d'un important réseau karstique. Certains (Daessle, 1991) précisent néanmoins que ce système doit être plus développé dans le Bathonien.

Sur le Premier Plateau, Colin (1973) propose une carte des principales directions de cheminement, mises en évidence par des essais de coloration à la fluorescéine, ainsi que les temps de parcours (Illustration 57). Ces essais ont aussi permis de montrer que le système de karstification est constitué de drains principaux « à grande vitesse », associés à un réseau plus diffus.

D'autres formations calcaires sont parfois citées comme susceptibles d'accueillir, dans une moindre mesure, un système karstique :

- dans le Jura lédonien, Colin (1965) précise que, bien que le Lias (Jurassique inférieur) soit essentiellement marneux, il « est néanmoins coupé par deux bancs calcaires d'une vingtaine de mètres d'épaisseur chacun (...) ; la base de chacun de ces niveaux est soulignée par des sources » ; cet indice laisse à penser que cette formation présente un système karstique, et donc, par voie de conséquence, la possibilité de renfermer des cavités ;
- autour de la ville de Saint-Claude, Javey (1980) s'intéresse au système karstique dans les séries marno-calcaires du Crétacé inférieur ; il y indique que les cheminements d'eaux souterraines sont plus complexes en raison de l'alternance de niveaux calcaires perméables karstiques et de niveaux marneux imperméables. Même si les exutoires se rencontrent fréquemment au contact des faciès marneux, ils sont généralement de faible importance ;
- les calcaires du Jurassique supérieur (calcaires de l'Oxfordien supérieur, encore appelé Rauracien) présentent un potentiel de karstification nettement moins important ; les exutoires y sont moins bien individualisés (rapport BRGM RR-39761-FR).

En dehors de notre zone d'étude, mais dans un contexte néanmoins similaire, Aste *et al.* (1977) apporte des informations sur le système karstique des calcaires du Kimméridgien inférieur et du Séquanien, affleurant ou sub-affleurant, dans la zone de

Montbéliard. Ces calcaires ont, dans cette zone, une puissance de 50 à 80 mètres ; fissurés et fracturés, ils présentent à leur base un niveau de marnes. Dans la région, ces formations constituent un aquifère de première importance.

Enfin, parmi les terrains « épargnés » par la présence de grands systèmes karstiques, Daessle (1991) cite le Vignoble, territoire situé à l'extrémité sud du département du Jura (principalement dans le département de l'Ain), hors de la zone pilote.

5.1.2. La fracturation des calcaires

La présence de fractures est reconnue comme un critère contribuant à l'infiltration des eaux drainées sur une certaine surface. Cette infiltration ponctuelle favorise le développement d'un réseau karstique et donc la formation de cavités.

Dans un rapport de 1997 (RR-39761-FR), il est précisé que les structures tectoniques majeures, associées à des zones d'effondrement, témoignant d'un **rejeu** en distension favorisent le développement de fractures ouvertes susceptibles de constituer des drains préférentiels pour les eaux souterraines.

Dans son rapport, Chalumeau (1982) classe les séries du Jurassique supérieur et du Crétacé, dans la zone de Morez – Saint-Claude (soit en dehors de notre zone d'étude), en fonction de leur degré de fracturation en formations vulnérables à très vulnérables à la pollution. Du fait de cette définition, la vulnérabilité à la pollution peut être associée à une vulnérabilité à la présence de cavités.

- formations miocènes : peu vulnérables ;
- calcaires du Barrémien (Crétacé inférieur) : très vulnérables ;
- calcaires du Valanginien et de l'Hauterivien (Crétacé inférieur) : vulnérables ;
- calcaires du Jurassique supérieur : très vulnérables ;
- calcaires de l'Oxfordien supérieur à faciès séquanien, du Kimméridgien et du Portlandien : très vulnérables ;
- marnes et marno-calcaires de l'Oxfordien à faciès argovo-oxfordien et rauracien : peu vulnérables à vulnérables ;
- calcaires du Jurassique moyen : vulnérables.

La fracturation des calcaires est pour Chalumeau un élément déterminant dans la karstification, mais elle est peu détaillée dans les documents géologiques consultés (cartes géologiques, forages BSS...). Son estimation nécessiterait un travail sur le terrain (observations d'affleurement) afin de créer des classes de vulnérabilité.

Enfin, Colin (1965) précise qu'on observe parfois un alignement des phénomènes d'affaissement / effondrement, à rapprocher sans doute des accidents tectoniques.

5.1.3. Les terrains de couverture

Les terrains de couverture jouent un rôle dans le développement d'un système karstique en ce sens qu'ils peuvent limiter, de manière plus ou moins importante, l'infiltration des eaux, en fonction de leur lithologie (Aste *et al.*, 1977).

Néanmoins, l'état et l'épaisseur des formations superficielles actuelles n'est pas nécessairement représentative des conditions dans lesquelles le système karstique s'est développé. Il ne faut pas oublier l'importance des conditions passées de ces mêmes terrains. Pour exemple, Javey (1984) explique le faible nombre de désordres d'origine karstique dans les formations calcaires crétacées (zone de Montperreux, dans le Doubs) par la faible épaisseur de ces calcaires, par de fréquentes intercalations de calcaires argileux ou de marnes, et par l'existence, dans le passé, d'une couverture uniforme de dépôts glaciaires beaucoup plus épaisse qu'elle ne l'est actuellement.

5.1.4. L'intercalation de niveaux étanches

Au sein des formations calcaires on rencontre, selon leur stratigraphie, plus ou moins de niveaux intercalaires marneux, plus ou moins étanches.

Colin (1965) explique l'importance de ces niveaux marneux : la circulation des eaux d'infiltration se fait verticalement le long des fissures, puis, au niveau de la base des calcaires, au contact calcaire - marne s'installe un réseau horizontal de circulation favorisant la création de cavités volumineuses. Il indique la mise en place de ce genre de système au contact Bajocien – Lias, relayé par la présence de sources et résurgences importantes.

Comme indiqué par différents auteurs (Colin, 1965 ; Chalumeau, 1982 ; Dörfliiger, 2004), ces niveaux marneux présentent parfois une fissuration telle que les réseaux karstiques supérieur et inférieur sont en relation. Dans ce cas, le phénomène décrit ci-dessus sera probablement moins développé géographiquement.

Le débit des sources est un indicateur souvent évoqué par différents auteurs. Ainsi, Gudefin (1969) écrit que « le faible débit de ces points d'émissions (...) laisse présager l'absence d'une mise en charge notable et éloigne l'éventualité d'un important volume d'accumulation qui supposerait l'existence de réservoirs ou cavités d'une certaine envergure ». Dans le même ordre d'idée, le même auteur indique que « le caractère pérenne de ces sources s'accorde avec l'hypothèse d'un écoulement freiné et régularisé par l'exiguïté des conduits ».

5.1.5. Un bilan sur la susceptibilité de présence de cavités via la connaissance des formations accueillant un aquifère karstique

Un important travail de synthèse et d'analyse a abouti à la création d'un atlas hydrogéologique des régions Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes (Lamotte *et al.*, 2009, RP-57091-FR). Entre autre, cet atlas recense les différents aquifères

karstiques, en précisant le contexte géographique, géomorphologique, géologique et hydrogéologique de chacun de ceux-ci. L'entité hydrogéologique est aussi décrite en termes de nature des réservoirs, nature du substratum, profondeur de l'eau, épaisseur mouillée...

Cette étude des aquifères karstiques actuels constitue un bilan très intéressant vis-à-vis de notre problématique, sans pour autant, bien sûr, constituer une liste exhaustive des formations susceptibles de contenir des cavités.

Suivant les différents contextes géologiques de notre zone d'étude, les aquifères karstiques suivants sont relevés (seuls les aquifères susceptibles d'intéresser notre étude sont ici mentionnés) :

- au sein des calcaires du Jurassique moyen (Callovien, Bathonien, Bajocien). Une érosion karstique intense est mentionnée, ainsi que de nombreux indices en surface (gouffres et dolines). Le seul niveau marneux dans ces formations se trouve 50m au-dessus de la base du Bajocien, et ne fait que 10 m d'épaisseur. Toutes les eaux de ruissellement s'infiltrent ;
- au niveau du massif du Racht et de la Haute Chaîne, cet aquifère est de moindre importance du fait d'une épaisseur plus faible et d'une alimentation faible car son affleurement est limité aux cœurs des anticlinaux ;
- au sein des calcaires du Jurassique supérieur, séparés du Jurassique moyen par les marnes oxfordiennes. La vitesse de circulation karstique est évaluée entre 50 et 400 m/h. On n'observe pratiquement pas d'écoulement en surface, malgré des précipitations assez élevées, particulièrement dans le massif du Racht et la Haute Chaîne ;
- les calcaires du Jurassique moyen et supérieur sont karstifiés et les interlits de marnes dans le Jurassique supérieur ne font pas d'obstacle aux circulations d'eaux ;
- au sein des calcaires du Crétacé, on observe en surface peu de formes karstiques développées ; de petits aquifères disjoints existent au cœur de synclinaux quand la série affleure. Ces calcaires sont peu karstifiés du fait de l'existence d'un recouvrement par les formations superficielles. Pour exemple, un forage dans les calcaires valanginiens a mesuré un débit d'environ 1 m³/h, soit un débit très faible. Quand toute la série Crétacé existe, différents niveaux marneux (Berriasien supérieur, environ 20 m d'épaisseur, Hauterivien inférieur, environ 25 m) s'intercalent dans le système karstique ;
- au sein des synclinaux, les écoulements souterrains semblent guidés par les directions principales d'allongement des plis.

5.1.6. L'acidité des sols

Dans la littérature, il est évoqué l'augmentation des phénomènes d'effondrement des cavités dans les sous-bois, qui serait lié à l'acidité des eaux s'infiltrant, acidité accélérant la dissolution de la roche calcaire.

Il est intéressant de remarquer qu'effectivement, sur les 1 240 événements recensés sur le territoire, 81 % se trouvent sur un couvert forestier alors que 16 % concerne des prairies, pour une répartition surfacique prairie / forêt similaire (données BD Carto). Ceci recoupe l'observation que la forêt domaniale des Moidons concentre un certains nombres de données de l'inventaire (cf. biais 1 § 4.3).

Ceci pourrait rejoindre l'hypothèse de l'acidité des sols et donc des eaux d'infiltration acides, connue pour être favorable au phénomène de dissolution. Cependant, il nous faut rester prudent avec l'échelle de temps de formation des cavités naturelles, devant la présence de ces couverts forestiers.

Il est plus probable que cette constatation corresponde à la propension des arbres à se développer sur certaines lithologies calcaires qui correspondraient à des lithologies karstiques.

5.2. FACTEURS D'EFFONDREMENT DES CAVITÉS NATURELLES

Contrairement à la bibliographie sur les critères de présence de cavités naturelles, la recherche concernant les critères d'effondrement de ces cavités a été bien moins productive.

Nous parlons ici de critères d'effondrement, néanmoins, nous avons traité le cas des différents phénomènes liés à la présence de cavités, à savoir le tassement, l'affaissement ou l'effondrement. Colin (1965) précise ainsi que des phénomènes d'affaissement / effondrement (entonnoirs et dolines) sont encore observables à l'heure actuelle, « il s'en ouvre encore fréquemment, parfois même sous la charrue des agriculteurs ».

Différents critères sont avancés par les auteurs, sans qu'aucun ne semble réellement prédominant.

5.2.1. Les caractéristiques mécaniques des terrains du recouvrement (voûte calcaire et terrains sus-jacents)

D'une manière générale, et comme nous pouvions nous y attendre, les différents auteurs précisent les très bonnes qualités mécaniques des calcaires jurassiens.

Néanmoins, toutes les formations calcaires ne présentent pas les mêmes caractéristiques mécaniques. Dans un rapport de 1998 (RR-39189-FR) s'intéressant aux terrains dans la région des Territoires de Belfort, les calcaires du Bathonien – Bajocien sont qualifiés de matériaux durs à moyennement durs, alors que les calcaires du Rauracien et du Séquanien sont qualifiés de moyennement durs à tendres.

Javey (1990) précise que, même si « ces calcaires du Bathonien sont compacts, massifs, très durs et comptent parmi les roches calcaires les plus résistantes que l'on rencontre dans le Jura (...) », les calcaires rencontrés dans les zones d'altération

présentent une résistance affaiblie du fait de la fracturation et de la présence de formations argileuses dans ces fractures.

Dans le même ordre d'idée, Odent (2006) indique dans l'inventaire départemental des mouvements de terrain du Territoire de Belfort, que les effondrements sont principalement positionnés sur les plateaux calcaires karstifiés faisant l'objet d'une intense érosion ; en particulier, quand le degré d'érosion devient relativement fort, les dolines se transforment en avens par l'effondrement de la voute de la cavité karstique sous-jacente.

5.2.2. L'épaisseur du recouvrement

Outre leur nature, l'épaisseur des formations géologiques recouvrant les cavités naturelles intervient dans la prédisposition qu'une instabilité de cavité ait des répercussions en surface. En effet, une cavité souterraine suffisamment profonde n'engendrera pas d'instabilité en surface (phénomène d'auto-comblement de la cavité, présence de couches plus compétentes dans le recouvrement...).

Pour des cavités de dimensions métriques, les retours d'expérience permettent de fixer la limite d'apparition de désordres en surface autour de 30 à 40 m de profondeur. En revanche, des cavités de plus grandes dimensions, pourraient être à l'origine de désordre en surface même si elles sont situées à plus grande profondeur.

Cependant, une circulation d'eau dans le réseau karstique aura tendance également à évacuer les produits éboulés fins et à limiter l'effet de l'auto-comblement.

5.2.3. L'infiltration des eaux

L'eau, sous diverses formes, joue un rôle important dans le développement d'un phénomène d'effondrement d'une cavité.

La quantité d'eau infiltrée est proposée comme un des facteurs de déstabilisation d'une cavité : dans une analyse géologique d'un site au Mont Rivel (Champagnole), Gudefin (1969) remarque que dans cette zone, les calcaires affleurant (ou sub-affleurant) du Rauracien et du Séquanien ne présentent pas « les formes caractéristiques, ni les dimensions de dolines ou entonnoirs de dissolution, qui constituent habituellement, sur les plateaux calcaires, les manifestations tangibles de l'existence d'un réseau karstique développé et des phénomènes de dissolution aptes à déterminer la formation de grandes cavités souterraines ». L'auteur explique cette situation par le fait que ce plateau est circonscrit géographiquement, ce qui limite les apports de versants et les ruissellements superficiels (« la surface topographique ne recueillant comme apports pluviaux que les eaux météoriques tombées sur sa propre surface d'impluvium »).

5.3. SÉLECTION DES CRITÈRES EXPLICATIFS EXPLOITABLES

À partir de l'analyse de l'inventaire établi au chapitre précédent, il convient d'identifier une liste de critères explicatifs complémentaires et discriminants, qui doivent justifier

d'une part, la répartition spatiale des cavités sur la zone étudiée et d'autre part, celle des effondrements.

Les recherches bibliographiques et les réflexions menées avec les experts locaux ont permis de lister plusieurs critères théoriques adaptés aux spécificités locales. Le choix est ensuite fortement conditionné par la disponibilité de la donnée sur l'intégralité du secteur étudié. Le Tableau 4 rappelle donc les critères envisagés et conclut quant à leur utilisation pratique dans le cadre de la présente étude. C'est donc principalement la disponibilité des données à l'échelle départementale qui a contraint la sélection des 4 critères finalement sélectionnés. Le chapitre suivant présente la constitution des supports cartographiques associés aux critères sélectionnés.

	CRITERES EXPLICATIFS ENVISAGEABLES	INFORMATION DISPONIBLE	CONCLUSION
SUSCEPTIBILITE DE PRESENCE DE CAVITES EN PROFONDEUR	Nature lithologique (= sensibilité à la dissolution)	Carte géologique, sondages	✓ Classification selon la proportion de carbonate et d'évaporites (cf. § 0)
	Intensité de la fracturation	Carte géologique	✓ Tracé des failles (cf. § 6.1)
		Données bibliographiques	
	Acidité des eaux s'infiltrant	Occupation des sols	X Echelle de temps non compatible avec les informations disponibles
Intercalation de niveaux étanches	Présence et débit des sources	X Données non disponibles systématiquement	
SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT DU RECOUVREMENT	Infiltration des eaux (facteur déclenchant)	Perméabilité des sols	✓ Classe d'IDPR (Indice de persistance et de développement des réseaux) (cf. § 6.5)
	Caractéristiques mécaniques du recouvrement	Propriété géomécanique	X Données non disponibles systématiquement
	Epaisseur du recouvrement (facteur permanent)	Carte géologique, sondages	✓ Logs géologiques par secteurs structuraux (cf. § 6.1)
✓ Travail spécifique sur les formations superficielles (cf. § 6.3)			

Tableau 4 : Critères explicatifs utilisables a priori.

6. Constitution des supports cartographiques nécessaire à l'évaluation de la susceptibilité

Les critères sélectionnés au chapitre précédent, doivent être exploitables cartographiquement à l'échelle départementale et doivent donc être associés à une information géoréférencée sur l'intégralité du secteur étudié. Ceci a d'ailleurs constitué un critère de choix dans la sélection de ces critères.

Cette information a nécessité un travail de reconstitution stratigraphique sur chaque secteur structural, décrit dans le § 6.1, permettant d'avoir une connaissance de la colonne de sol sous-jacente (nature et épaisseur) en tout point du territoire.

Le principal facteur de prédisposition à la présence d'une cavité est l'existence d'une formation géologique capable de laisser se développer des cavités naturelles. Si plusieurs conditions doivent être réunies pour cela, la présence de minéraux (carbonate, gypse..) qui peuvent être soumis à cette dissolution est un des critères les plus importants : cette connaissance est abordée dans le § 0. (CRITERE 1).

Les facteurs d'effondrement sont plus variés et particulièrement dépendants du contexte local. Un des facteurs les plus courants est l'épaisseur du recouvrement (CRITERE 2) : outre les informations données par les logs géologiques, l'évaluation de cette grandeur a nécessité un travail spécifique sur les formations superficielles, décrits dans le § 6.3. Un autre facteur qui semble discriminant sur le territoire étudié est la capacité d'infiltration des eaux de surface (CRITERE 3) dont la représentation cartographique est abordée au § 6.5.

6.1. LOGS GÉOLOGIQUES PAR SECTEURS STRUCTURAUX

Pour chaque secteur homogène, un log géologique a été réalisé à partir des notices des cartes géologiques 1/50 000 du BRGM et de forages représentatifs disponibles en BSS (Banque de données du Sous-Sol, disponible sur <http://infoterre.brgm.fr>). Il s'agit le plus souvent de forages d'exploration pétrolière, de coupes de tunnels ou de descriptions d'affleurements.

Les logs géologiques ainsi reconstitués, sont détaillés dans le Tableau 5 et le Tableau 6, pour chacun des 16 secteurs. Pour chaque âge stratigraphique, les lithologies recoupées sont décrites et leur épaisseur moyenne est renseignée ainsi que les valeurs minimales et maximales, estimées grâce aux documents consultés. Cette plage de variation permet de conserver la dispersion de l'information consultée sur chaque secteur. Si une plage étendue peut autant illustrer un manque de fiabilité des sources documentaires qu'une réelle variabilité lithologique, une plage de variation limitée confirme une certaine fiabilité de l'information.

Département du Jura Zone pilote		Secteurs structuraux																												
		Secteur 01 Bresse louchannaise			Secteur 02 Faisceau ledorien			Secteur 03 Arbois			Secteur 04 Faisceau salin/Quingey			Secteur 05 Plateau de Lons-le-Saunier			Secteur 06.A Plateau de Champagnole			Secteur 06.B Côte de l'Heute			Secteur 07 Faisceau de Syam							
Stratigraphie (ancienn. nomenclature notations)		Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →	Liblogiq Ep → Ep → Ep →			
CENZOZOÏQUE	Phocène	F																												
	Miocène indifférencié	m																												
	Burdigalien	m2																												
	Aquitanien	m1																												
	Oligocène	g																												
PALEOZOÏQUE	Eocène	e4-7																												
	Paléocène	e1-3																												
CRETACE	Autres stages du Crétacé supérieur		c2-c8																											
	Cénomanien		c1																											
	Albien		a6																											
	Aptien		a5																											
	Barremien		a4																											
	Hauteriviens		a3																											
	Valanginiens		a2																											
	Bemasiens		a1																											
	Titulien		t																											
	Kimmeridgien sup.		kb																											
	Kimmeridgien inf.		ka																											
	Oxfordien sup.		ob																											
Oxfordien moyen		obm																												
Oxfordien inf.		oba																												
JURASSIQUE	Callovien		cl																											
	Bathonien		b																											
	Bajocien		ba																											
	Aalenien		a																											
	Toarcien		t																											
	Domézien		d																											
	Pliensbachien		pl																											
	Carriacien		ca																											
	Lotharingien sup.		ls																											
	Lotharingien inf.		li																											
	Sinemurien		sm																											
	Hettangien		h																											
TRIAS	Rhenan		r																											
	Trias supérieur																													
	Keuper sup.		ks																											
	Keuper moy.		km																											
	Keuper inf.		ki																											
Trias moyen																														
Trias inférieur																														

Legende	nc non déterminé dans les documents consultés	C calcaire	D dolomite
	Formation non-décrite dans les documents	Cm calcaire marneux	S sable
	Formations géologiques en allemand	Cor calcaire crayeux	gal galets
	sur référence	Mc margocalcaire	g gypse
	MAJUSCULE prédominance de la formation en épaisseur	M marne	A anhydrite
	minuscule prédominance de la formation en épaisseur	Gr grès	cl sel

Tableau 5 : Log géologique des secteurs 01 à 07.

Département du Jura		Secteurs structuraux																															
Zone pilote		Secteur 08_A Plateau central de Nozeroy				Secteur 08_B Massif du Râchet				Secteur 08_C Massif de la Haute-Joux				Secteur 08_D Plateau de Cornu				Secteur 08_E Pré. du faisceau de Syam				Secteur 09_A Avant-faisceau helvétique				Secteur 09_B Pic de l'Aigle				Secteur 10 Haute-Chaine			
Stratigraphie (ancienn. nomenclat. notation)		Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →				Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →				Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →				Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →				Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →				Lithologie Ep → Ep → Ep → Ep →											
GÉOZOÏQUE	Pliocène																																
	Miocène indifférencié																																
	Burdigalien																																
	Aquitanien																																
	Oligocène																																
Eocène	e4-7																																
	e1-3																																
Paléocène	e2-6																																
	Autres étages du Crétacé supérieur																																
CRÉTACÉ	Campanien																																
	Albien																																
	Aptien																																
	Barremien																																
	Hauteriviens																																
	Valanginiens																																
	Berriasien																																
	JURASSIQUE	Titlhovien																															
		Kimmeridgien sup.																															
		Kimmeridgien inf.																															
		Oxfordien sup.																															
		Oxfordien moyen																															
		Oxfordien inf.																															
		Callovien																															
		Bathonien																															
Bajocien																																	
Aalenien																																	
Toarcien																																	
Pliensbachien																																	
Sinemurien																																	
Hettangien																																	
TRIAS		Rhaetien																															
	Keuper sup.																																
	Keuper moy.																																
	Keuper inf.																																
	Musch sup. (Lefrançois M)																																

lg	non déterminé dans les documents consultés	C	calcaire	D	dolomite
	formation non-décrite dans les documents	Cm	calcaire marneux	S	sable
	formations géologiques en attente	Cr	calcaire trailloux	gal	galest
	"au" (avertissement) : M : calcaire sur des marnes	Mc	marnocalcaire	gr	grès
MAJUSCULE	prédominance de la formation (en épaisseur)	M	marnes	an	anhydrite
minuscule	sous-dominance de la formation (en épaisseur)	Gr	grès	sl	sel

Tableau 6 : Log géologique des secteurs 07 à 10.

Ce travail a permis de synthétiser l'ensemble des informations disponibles et de les présenter de manière homogène sur l'ensemble de la zone pilote, alors que la diversité des sources et l'hétérogénéité spatiale des renseignements complexifiaient la tâche initialement. Vu la complexité structurale régionale, ces logs permettent de rendre compte et de mesurer les éventuelles variations de faciès à l'échelle départementale, entre secteurs homogènes. Le travail est représentatif de l'échelle de l'étude, mais évidemment, pas au-delà des secteurs délimités.

6.2. SENSIBILITÉ À LA DISSOLUTION

La formation des cavités est due à la dissolution des carbonates par des circulations d'eau dans les calcaires et les formations évaporitiques.

Le premier travail a consisté à analyser les lithologies abrégées des formations des logs géologiques (Tableau 5 et Tableau 6, résumant les descriptions des cartes géologiques et les forages disponibles en BSS), afin de faire ressortir les formations potentiellement gypsifères ou carbonatées. Le travail a été réalisé pour chaque secteur structural en estimant la sensibilité des lithologies à la dissolution, entre F, sensibilité très faible à la dissolution et A, très forte (cf. Tableau 7).

Classification des formations selon leur sensibilité à la dissolution	
F	Formation ne contenant à priori ni évaporites, ni carbonates
E	Formation susceptible de contenir de rares évaporites ou carbonates
D	Formation avec une faible (< 25 %) proportion d'évaporites ou de carbonates
C	Formation avec entre 25 et 50 % d'évaporites ou de carbonates
B	Formation à dominante évaporitique ou carbonatée
A	Formation quasi-exclusivement évaporitique ou carbonatée

Tableau 7 : Classification de la sensibilité à la dissolution à partir de la lithologie.

Le passage de la lithologie abrégée à une qualification du degré de sensibilité à la dissolution n'est pas aisée : il nécessite d'estimer, dans chaque formation stratigraphique et pour chaque secteur structural la proportion maximale d'évaporites ou de carbonates. Cette indication a été conservée dans les logs géologiques issus de données de forages et de cartes géologiques (majuscules vs minuscule afin de distinguer les épaisseurs fortes vs faibles).

Cette classification permet de regrouper des unités lithologiques selon leur sensibilité à la dissolution. Ce travail précieux, permet de tenir compte de variations latérales de faciès (notamment en termes de proportions de carbonates) à l'intérieur d'une même série stratigraphique. Ces variations de faciès peuvent être illustrées par les horizons du Bajocien qui sont exclusivement calcaires près de la Haute-Chaîne ou sur le Premier plateau du Jura, mais qui contiennent des passages marneux près de Champagnole.

L'illustration 28 permet de se rendre compte du type de formation qui a été regroupé par niveau de sensibilité. Ces regroupements dépendent des conditions locales, d'où

certaines lithologies qui peuvent être qualifiée de « pas sensible » à « sensible » selon le secteur structural.

CLASSE DE SENSIBILITE						
	F	E	D	C	B	A
Arg						
C						
C/C/M						
C/C-Cm						
C/Cm						
C/C-m						
C/Cm/C						
C/Cm/M						
C/Cm/M/C						
C/cm-M/C						
C/cm-mc						
c/M						
C/M/D						
C/M/S						
c/MC						
C/M-c						
C/Mc/C						
C/Mc-c						
C-Cm						
C-Cm/C						
C-Cm-Cd						
C-Cm-M						
C-Cm-mc						
Ccr						
Cm						
C-M						
Cm/c						
Cm/C/Gy						
Cm/D						
Cm/M						
Cm/M/C						
Cm/M/Mc						
C-MC						
Cm-C						
Cm-Cr						
Cm-cr-c						
Cm-M						
Cm-Mc-m						
Col						
D/Gy						
D-A-Gy						
E						

CLASSE DE SENSIBILITE						
	F	E	D	C	B	A
Fz						
G						
G/D/M						
Gal-c						
Gal-M						
Gal-s-m						
G-L						
L						
Lim						
M						
M/c						
M/C/M						
M/C/M/C						
M/C-cm						
M/Cm						
M/cm/Mgy						
M/Cm-Gy						
M/cm-M						
M/M/C						
M/Mgy						
M/Mgy-						
M/Mgy-D						
M/S						
M-C						
M-c/M						
Mc-c						
M-c-gy						
M-Cm						
M-Cm-c						
M-cm-gy						
Mgy						
MgyD						
Mgy-D-M						
M-Gy-Sel						
M-Mc						
M-s						
M-s-gal						
S						
T						
Tufs						
X						

Illustration 27 : Répartition selon la nature lithologique.

Pour rappel, les sigles (présentés dans les logs géologiques – Tableau 5 et Tableau 6) sont les suivants. Les termes en majuscules sont prédominants.

- formations superficielles : A ou Arg : argile ; Fz : alluvions ; E : éboulis ; X : remblais ; T : tourbe ; L : alluvions lacustres ; G : moraines ; Lim : limons ; col : colluvions.

- formations géologiques : C : calcaire ; Cr : calcaire crayeux ; Cm : calcaire marneux ; MC : marno-calcaire ; M : marne ; S : sable ; D : dolomie ; Gy : gypse ; Gal : galets.

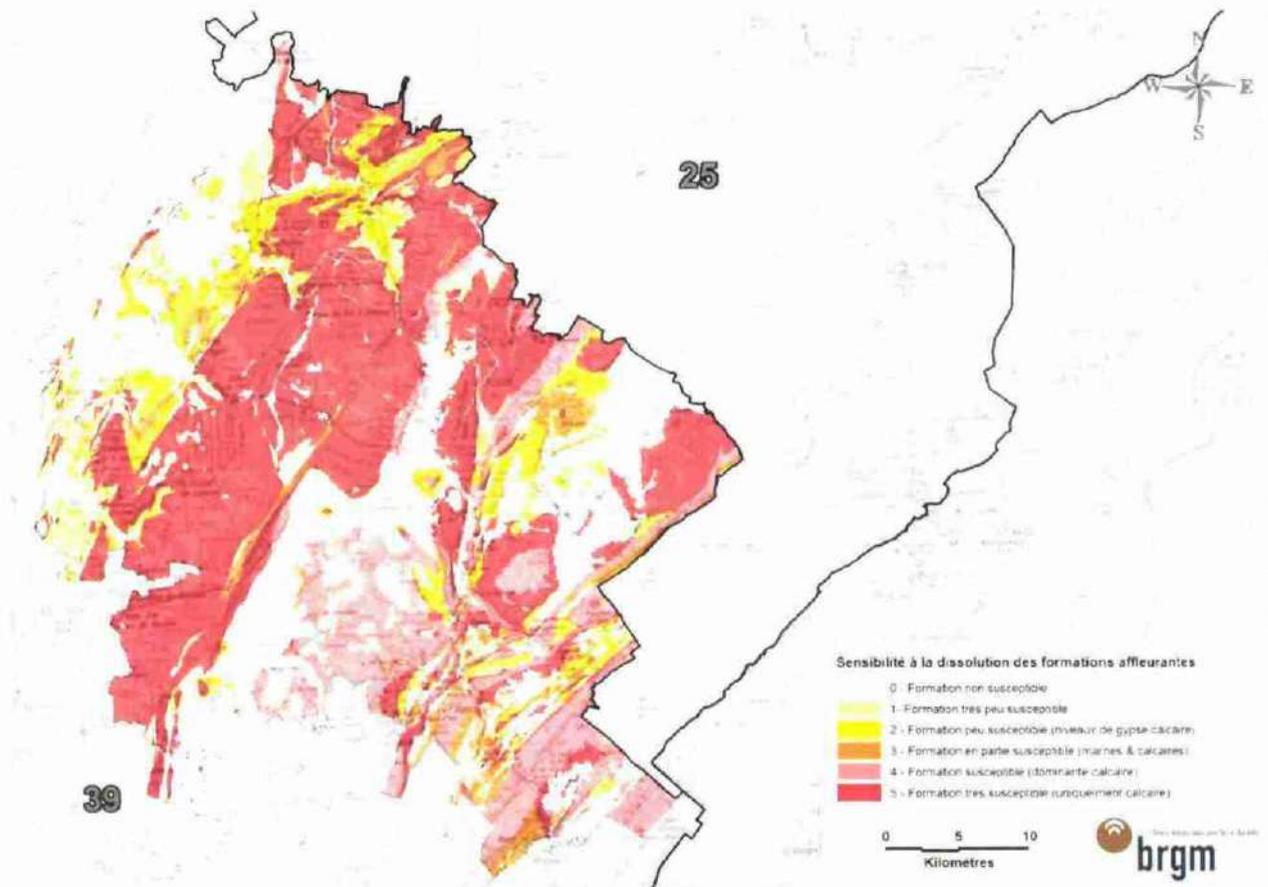


Illustration 28 : Sensibilité à la dissolution des formations affleurantes.

Lors de l'étude bibliographique réalisée en amont du projet (cf. chapitre 5), plusieurs facteurs ont été identifiés comme favorables à la dissolution des calcaires.

La classification proposée par le BRGM tient principalement compte de la proportion, de carbonates et d'évaporite et de la massivité des formations. Les logs géologiques mentionnent la notion de structures massives, bien décrite dans les cartes géologiques. Les alternances marnes/calcaires ont par exemple été conservées et associées à une sensibilité moyenne (classe C).

L'estimation de proportion de carbonates repose sur un avis d'expert géologue à partir de données cartographiques et de coupes de forage, en l'absence de données minéralogiques (type diffraction RX) en nombre suffisant.

L'homogénéité de la dureté (absence de délitements) n'a par contre pas été prise en compte, les phénomènes de délitements n'étant pas décrits systématiquement dans les notices des cartes géologiques.

La fracturation n'est également pas prise en compte à ce stade. Si la fracturation régionale le sera ultérieurement dans la méthodologie, ce n'est pas le cas de la fracturation locale (échelle de l'affleurement), qui nécessite un travail de terrain non compatible avec cette échelle de travail.

En suivant ces critères, sur la zone pilote, les deux types de formations concernées par les cavités naturelles n'ont pas le même niveau de sensibilité à la dissolution :

- les formations marneuses gypsifères du Trias sont limitées à un niveau moyen (classe C) de sensibilité à la dissolution, étant donné que le gypse est sous forme de lentilles dans des marnes ;
- les formations carbonatées du Jurassique sont potentiellement très sensibles à la dissolution (classe maximale A) étant donné que certaines formations sont exclusivement carbonatées.

Par rapport aux résultats obtenus (carte de sensibilité à la dissolution), dans le domaine du karst, les résultats sont corroborés par la bibliographie. Ainsi les observations de Colin (1965) indiquant une altération karstique généralisée des calcaires Bathonien et Bajocien sur le premier plateau du Jura confirment la classe A (très sensible à la dissolution) retenue par le BRGM.

Certaines formations liasiques ont effectivement été retenues comme calcaires potentiellement karstiques à partir des descriptions des cartes géologiques, correspondant aux observations de sources karstiques par Colin.

D'après cette expertise géologique, la sensibilité à la dissolution des calcaires du Jurassique supérieur (Haute-Chaine) est qualifiée de moyenne (classe D ou E). Effectivement, dans le rapport BRGM RR-39761-FR, son potentiel de karstification était jugé « moins important » à partir de l'observation des exutoires.

6.3. LES FORMATIONS SUPERFICIELLES

La cartographie des formations superficielles est issue de la carte géologique harmonisée du département du Jura à l'échelle 1/50 000.

Ces formations recouvrent en discordance d'autres formations géologiques qu'elles masquent, alors que celles-ci peuvent être sujettes à la dissolution. Dans l'optique d'identifier les risques qu'un désordre lié à une cavité puisse apparaître en surface, il nous faut donc disposer de la nature de l'horizon recouvert par les formations superficielles et de sa profondeur. Il convient donc de chercher à obtenir l'épaisseur des formations superficielles et la nature de l'horizon sous-jacent.

6.3.1. Épaisseur des formations superficielles

Contrairement aux autres formations, l'épaisseur des formations superficielles (alluvions, moraines...) est très rarement renseignée dans les notices des cartes géologiques à 1/50 000 et le dépouillement complet de la BSS (Banque de données du Sous-Sol, interrogeable sur infoterre.brgm.fr) n'est pas compatible avec l'échelle de

l'étude. Il est d'ailleurs peu certain que l'on dispose d'un nombre de forages suffisant pour chaque formation.

En l'absence de ces informations, l'estimation des épaisseurs des formations géologiques de couverture s'est basée sur :

- les données disponibles dans l'étude « synthèse hydrogéologique du bassin Rhône-Méditerranée-Corse » (RMC). Dans ce cadre, les épaisseurs des formations superficielles les plus épaisses et/ou les plus étendues ont été estimées dans le département du Jura à partir d'un dépouillement des données BSS et d'avis d'experts (réunions entre BRGM, Agence de l'Eau RMC, DREAL, universités et bureaux d'études) ;
- un avis d'expert à partir de données BSS et de la connaissance générale du BRGM sur les formations superficielles non couvertes par la synthèse Agence de l'Eau RMC.

Le Tableau 8 synthétise les types de formations superficielles cartographiées sur la zone pilote, à partir des informations de la carte géologique harmonisée. Pour chacune d'entre elles, une épaisseur moyenne a été renseignée ainsi que les valeurs extrêmes, estimées grâce aux sources consultées. Comme pour les lithologies du substratum, cette plage de variation permet de conserver la dispersion de l'information et donc la fiabilité de l'information utilisée. Cette synthèse permet de rendre compte et de mesurer les variations de faciès prononcées de certains horizons superficiels, comme les alluvions de la Loue aval et de faire ressortir l'épaisseur exceptionnelle des moraines de la Combe d'Ain.

Formations superficielles		Épaisseur estimée (m)		
Lithologie	Notation	minimale	maximale	moyenne
Alluvions de la Loue amont	<i>Fz</i>	5	5	5
Alluvions de la Loue aval		1	30	10
Alluvions de la combe d'Ain		1	10	5
Alluvions de la Seille		4	13	10
Autres alluvions		1	15	10
Moraines de la combe d'Ain	<i>G</i>	50	60	55
Moraines du 2nd plateau		0,5	15	5
Moraines de la Haute-Chaîne		0,5	15	5
Autres moraines		0,5	5	1
Argiles de recouvrement	<i>Arg</i>	0,5	5	1
Limons	<i>Lim</i>	0,5	3	1
Eboulis	<i>E</i>	1	10	5
Colluvions	<i>Col</i>	0,5	8	3
Tourbes	<i>T</i>	0,5	10	3
Remblais, tufs	<i>X, tufs</i>	0,5	3	1

Tableau 8 : Épaisseur des formations superficielles.

6.3.2. Nature des lithologies sous-jacentes

L'identification des formations géologiques que ces formations superficielles masquent est nécessaire pour identifier l'aléa d'affaissement ou effondrement.

Cependant, la base de données de forages documentés recoupant ces formations superficielles s'est avérée largement insuffisante sur la zone d'étude, pour être exploitée. Afin d'accéder à cette information, l'identification de l'horizon géologique caché (n-1) a été effectuée par raisonnement d'expert géologue, à partir de l'étude de la carte géologique à 1/50 000. Il existe une incertitude significative sur les lithologies et les épaisseurs liée à l'absence de données géologiques. Cette incertitude augmente plus encore avec la profondeur (notamment sur les épaisseurs).

L'épaisseur de la formation sous-jacente n'a pas été renseignée, elle nécessiterait la réalisation d'un modèle géologique en 3D, ce qui suppose avoir à disposition de nombreuses coupes de forages.

Pour affiner les résultats, une étude approfondie à une échelle de travail plus fine nécessiterait de préciser la nature de la formation rocheuse sous-jacente par la réalisation de coupes géologiques, à partir de données géologiques plus fournies.

6.4. DONNÉES GÉOLOGIQUES STRUCTURALES

L'identification des failles principales est issue de la carte géologique harmonisée du Jura (harmonisation des cartes géologiques à 1/50 000 du BRGM).

Dans les zones plissées de l'est de la zone pilote (est de la faille de l'Heute), les plissements ont été cartographiés à grande échelle (approximativement) d'après les coupes géologiques disponibles dans la littérature et surtout avec l'aide des indices de pendage fournis dans les cartes géologiques du BRGM.

Pour chaque zone plissée, les éléments suivants ont été fournis :

- type de pli (antiforme/synforme ou flanc si le pli n'est pas identifié) ;
- valeurs minimales/ maximales et direction générale des pendages.

Le tableau ci-après indique les résultats obtenus. Certains secteurs n'y figurent pas étant donné qu'ils sont :

- soit trop peu plissés, comme le plateau de Lons-le-Saunier ;
- soit lorsque la géologie cassante (jeu des failles) est estimée déterminante que les plissements, comme les faisceaux par exemple.

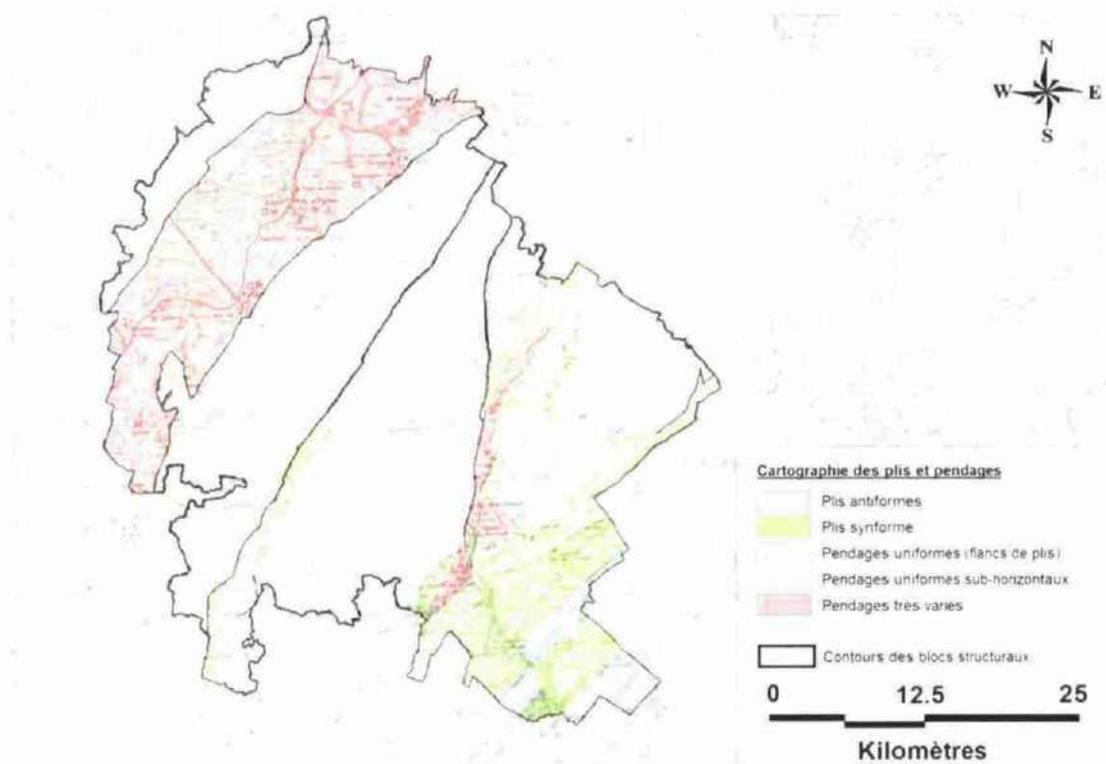


Illustration 29 : Cartographie des pendages et des zones plissées.

Les sept catégories suivantes ont été identifiées en fonction des valeurs de pendage et du type de plis :

- Catégorie A : pendages uniformes sub-horizontaux (plateaux) ;
- Catégorie B : pendages uniformes entre 10 et 20° ;
- Catégorie C : pendages uniformes entre 20° et 35 ;
- Catégorie D : pendages uniformes au-delà de 35°, essentiellement présents près des chevauchements ;
- Catégorie E : plis synformes ;
- Catégorie F : plis antiformes ;
- Catégorie G : pendages très variés, où le rôle des failles est prépondérant.

À titre indicatif, pour chaque catégorie, les surfaces ont été calculées (Illustration 30) et montrent que plus de la moitié de la zone étudiée (54 %) est concernée par des secteurs sub-horizontaux (dont 83 km² pour la plaine bressane). Les secteurs à fort ou très fort pendage, près des zones de chevauchement, sont très réduits (4 %), tandis que les plis synformes et antiformes sont présents en proportions équivalentes (7 et 5 % respectivement). Il est à noter que pour environ 22 % de la surface, les pendages ne peuvent pas être utilisés (lié à la complexité de la zone).

Bloc structural	ID	Nom	Type de pli	Pendage		
				orientation	minimum	maximum
1	1	Bresse Joughannaise	uniforme sub-horizontale	indéterminé	0 °	0 °
2	2	Faisceau ledonien	variés	variés	0 °	0 °
3	3	Arbois	variés	variés	0 °	0 °
4	4	Faisceaux salinois et de Quingey	variés	variés	0 °	0 °
5	5	Plateau de Lons-le-Saunier	uniforme sub-horizontale	indéterminé	0 °	10 °
6_A	6A_1	Plateau de Champagnole	uniforme sub-horizontale	indéterminé	0 °	10 °
	6A_2	Côte Heute sud	uniforme (flanc)	indéterminé	10 °	30 °
	6A_3	Côte de Chatonnay	uniforme (flanc)	indéterminé	15 °	40 °
	6A_4	Le Frasnois	synforme	indéterminé	0 °	35 °
	6A_5	La Basevière	uniforme (flanc)	0	45 °	70 °
6B	6B	Côte de l'Heute	uniforme (flanc)	E	10 °	25 °
7	7_1	Faisceau de Syam oriental	uniforme (flanc)	O/O	10 °	35 °
	7_2	Nans	uniforme (flanc)	O/O	10 °	30 °
	7_3	Forêt de la Joux	uniforme (flanc)	O/O	0 °	10 °
8A	8A_1	Varmont	uniforme (flanc)	O/O	10 °	35 °
	8A_2	bordure de Haute-Joux	uniforme sub-horizontale	ESE	5 °	15 °
	8A_3	Anticlinal du Toillon	antiforme	indéterminé	0 °	10 °
	8A_4	Vallée de l'Ain	uniforme sub-horizontale	indéterminé	10 °	35 °
	8A_5	Preyat	variés	variés	40 °	45 °
	8A_6	Mignovillard	uniforme sub-horizontale	indéterminé	0 °	10 °
8_B	8_B	Massif du Rachet	antiforme	SE	45 °	85 °
8_C	8_C	Massif de la Forêt de Haute-Joux	antiforme	NO	10 °	75 °
8D	8D_1	Pont de Chaux	synforme	indéterminé	0 °	70 °
	8D_2	Les Gressets	uniforme (flanc)	indéterminé	20 °	30 °
	8D_4	Cornu	variés	variés	0 °	20 °
	8D_5	Syam-sud-est	synforme	indéterminé	20 °	30 °
	8E	8E	Prolongement du faisceau de Syam	variés	variés	10 °
9A	9A_1	Morbier	synforme	indéterminé	0 °	20 °
	9A_2	La Joux Devant	antiforme	indéterminé	0 °	20 °
	9A_3	St-Laurent	synforme	indéterminé	0 °	30 °
	9A_4	Dombief	uniforme (flanc)	SO	10 °	20 °
9B	9B	Pic de l'Aigle	variés	variés	20 °	45 °
10	10_1	Entre-Deux-Monts	uniforme (flanc)	SE	10 °	20 °
	10_2	Foncin	Synforme	indéterminé	20 °	50 °
	10_3	Mont Noir	antiforme	indéterminé	0 °	10 °
	10_4	Combe de Morbier	synforme	indéterminé	0 °	20 °
	10_5	Le Risoux	antiforme	indéterminé	0 °	15 °

Tableau 9 : Pendages et plis par secteurs.

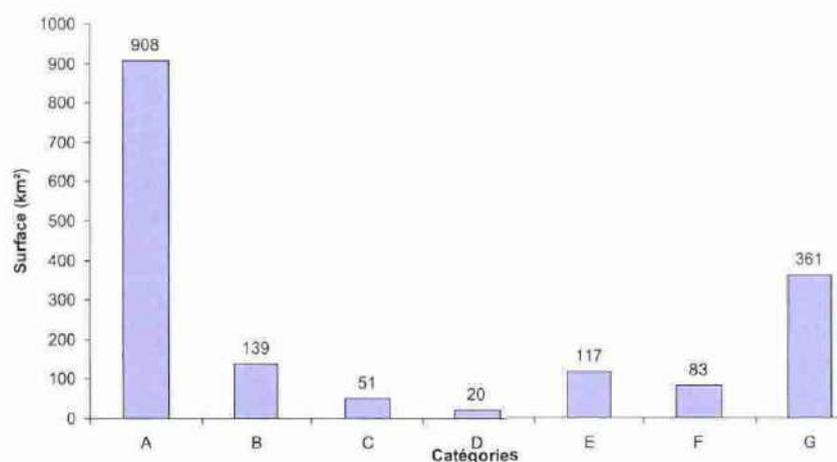


Illustration 30 : Surface (km²) occupée par chaque catégorie.

6.5. CAPACITÉ D'INFILTRATION DE EAUX

À l'échelle du bassin, la lithologie, la pédologie et la présence d'une couverture végétale sont des facteurs qui influencent la perméabilité et la rugosité de la surface ; de ce fait, ils conditionnent les possibilités du ruissellement et la proportion d'eau infiltrée.

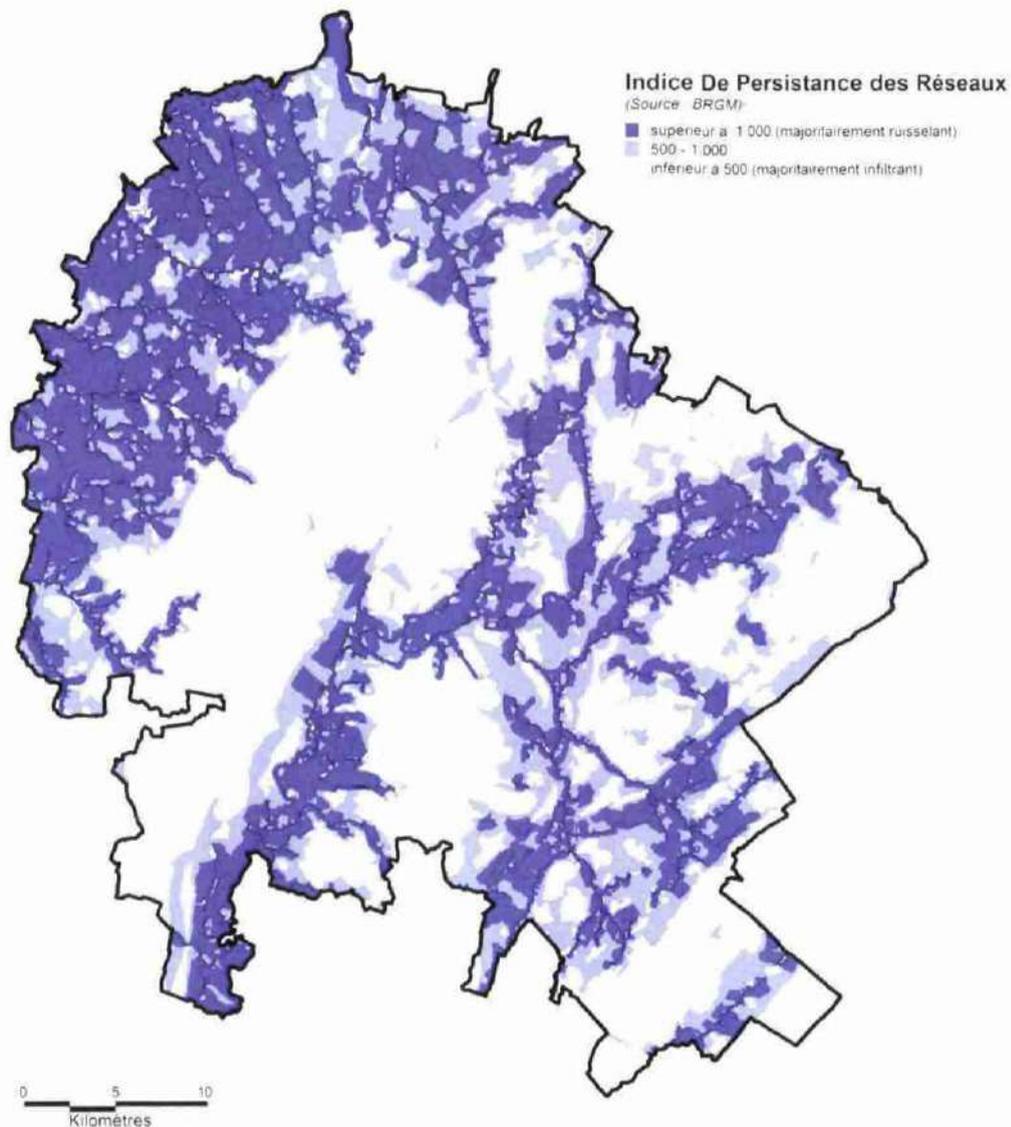


Illustration 31 : Représentation de l'indice IDPR sur le territoire de la zone pilote.
Source : BRGM.

L'indice de persistance et de développement des réseaux (IDPR) traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface (Mardhel *et al.*, 2006). Il permet de représenter spatialement et quantitativement l'infiltration des

eaux comme facteur déclenchant d'effondrements. Il est calculé en tenant compte des facteurs explicités ci-dessus, en exploitant la BDCarthage (réseau hydrographique) et le MNT au pas de 50 m.

La valeur de l'indice varie entre 0 et 2 000 (cf. Tableau 10) : quand les conditions de site entraînent majoritairement une infiltration des eaux, l'indice est inférieur à 1 000 ; Inversement, en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2 000.

Tableau Valeurs de l'IDPR

IDPR < 1000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. 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.
IDPR = 1000	Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place.
IDPR > 1000	Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg.
IDPR voisin ou égal à 2000	Stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltré pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

Tableau 10 : Signification de l'indice IDPR.
Source : Rapport BRGM/RP-55311-FR (Mardhel, 2006).

7. Évaluation de la susceptibilité d'apparition de désordre liés aux cavités naturelles

La connaissance du phénomène naturel peut s'approcher à partir du concept de « susceptibilité » (abusivement assimilé à un « aléa »). La susceptibilité d'un désordre mesure l'occurrence spatiale de son apparition en surface, sans la référence à une fréquence temporelle dont tient compte l'aléa (Galve *et al.*, 2009). Indicateur de décision pour le décideur, ce niveau de susceptibilité sera ici évalué de manière quantitative.

Le niveau de susceptibilité est évalué par la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables ou défavorables (facteurs de prédisposition). La pertinence de ces facteurs est « mesurée » en les confrontant aux événements recensés.

7.1. DEUX PHÉNOMÈNES INDÉPENDANTS À L'ORIGINE DE L'APPARITION D'UN DÉSDRE EN SURFACE

Le « désordre » observé en surface est issu de l'occurrence de deux événements : la présence d'une cavité en profondeur et l'effondrement (ou la rupture) des terrains du recouvrement (au droit de la cavité) jusqu'à engendrer des instabilités en surface. La réalisation conjointe de ces deux événements est une condition nécessaire et suffisante : une cavité volumineuse présente sous un banc de grés, massif et résistant ne présentera pas de risque pour la surface. À l'inverse, un recouvrement marneux peu épais n'aura pas tendance à contenir la propagation d'une instabilité (sous réserve qu'une cavité puisse exister à cet endroit).

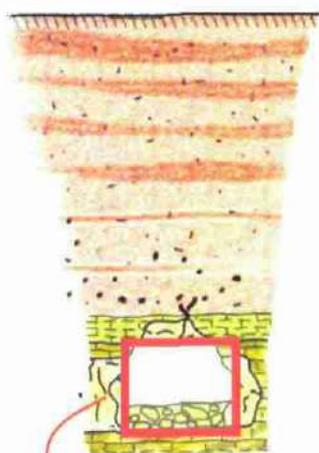
L'illustration 32 illustre ces deux conditions. Les cavités et les désordres recensés dans le chapitre 4 sont donc les seules informations certaines disponibles illustrant la réalisation de chacun des deux phénomènes redoutés. Le raisonnement de l'expert se construira à partir de l'observation de ces deux échantillons.

La susceptibilité qu'un désordre apparaisse en surface, ce que l'on recherche, sera donc définie ici comme le croisement de deux valeurs indépendantes :

- la susceptibilité de présence de cavités en profondeur (illustrée par les cavités recensées) ;
- la susceptibilité d'effondrement des terrains au droit de la cavité jusqu'à engendrer des instabilités en surface (illustrée par les désordres recensés).

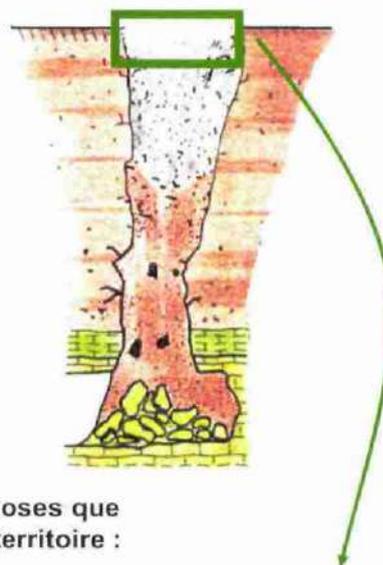
Ces valeurs sont évaluées en parallèle, à partir de facteurs explicatifs indépendants. Les facteurs explicatifs envisageables ont été présentés au chapitre 5.

D'abord, comment expliquer la présence d'une cavité à un endroit ? **Quels sont les facteurs de présence ?**



Inventaire des cavités

Ensuite, comment expliquer la rupture du recouvrement au-dessus de la cavité ? **Quels sont les facteurs d'effondrement ?**



Inventaire des désordres

À partir des seules choses que l'on connaisse sur le territoire :

Illustration 32 : Schéma conceptuelle illustrant la décorrélation des deux phénomènes (Source : C. Mathon).

7.2. PRINCIPE DE QUANTIFICATION DU NIVEAU DE SUSCEPTIBILITÉ

Chaque « facteur de prédisposition » ou « critère » choisi donne lieu à l'attribution d'un indice de susceptibilité à tous les éléments du territoire étudié. L'indice de susceptibilité d'apparition de désordre est obtenu en combinant l'indice de susceptibilité de présence avec celui de susceptibilité d'effondrement. Ici, 3 critères ont finalement été retenus comme indépendants et discriminants sur le territoire étudié. L'illustration 33 schématise le déroulement de la démarche, détaillée ci-après.

Comment fixer un indice à partir d'un critère ?

La méthodologie nationale propose deux outils pour quantifier le niveau de susceptibilité, 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, quand des données géotechniques ou hydrogéologiques ne sont pas disponibles.

Les deux principes théoriques sont présentés en Annexe 4.

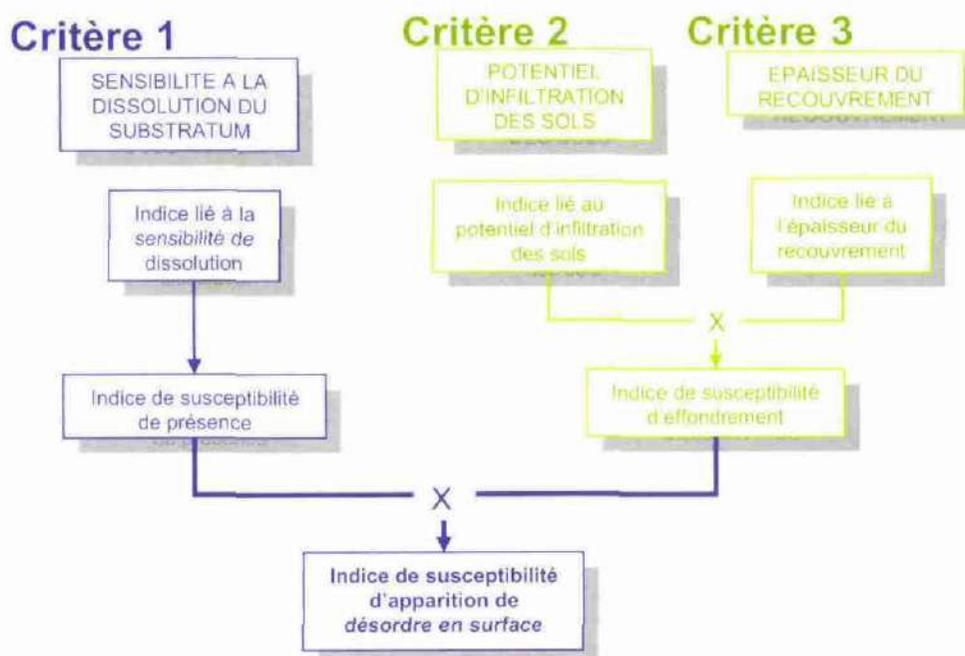


Illustration 33 : Combinaison des facteurs de prédisposition, sélectionnés sur la zone pilote pour évaluer la susceptibilité.

Dans notre étude, on sera amené à se servir de :

- la théorie des évidences pour quantifier le niveau de susceptibilité associé à une information d'expert qualitative, ce qui concerne le critère explicatif 1, relatif à la « sensibilité à la dissolution du substratum » (cf. § 0.), seul facteur de prédisposition de présence de cavités ;
- la logique floue pour quantifier le niveau de susceptibilité associé à un facteur explicatif associé à une variable quantitative. Sur le territoire étudié, ceci concerne les critères explicatifs 2 et 3, associés à l'épaisseur du recouvrement (cf. § 7.4.1.) et à la capacité d'infiltration des eaux IDPR cf. § 7.4.2.), tous deux facteurs de prédisposition d'effondrement de cavités.

7.3. SUSCEPTIBILITÉ DE PRÉSENCE DE CAVITÉS

L'échantillon des cavités recensées sur le territoire étudié est particulièrement fourni, puisqu'il rassemble 1 240 événements sur un territoire de 1 679 km². Nous le considérons comme représentatif de l'existant et donc pertinent pour guider et confirmer l'identification des facteurs de présence de cavités.

Nous considérons tous les événements recensés dans l'inventaire (cf. chapitre 4) comme illustrant la présence d'une cavité en profondeur à cet endroit, qu'il soit un désordre, une perte ou une cavité *stricto-sensu*.

7.3.1. Susceptibilité liée à la sensibilité à la dissolution des formations (Critère 1)

Critères explicatifs théoriques

Expliquer la présence d'une cavité revient à rechercher l'existence d'un horizon géologique susceptible de receler des cavités naturelles. Le principal facteur justifiant la présence de cavités dans un horizon géologique est la sensibilité à la dissolution de cet horizon.

Pour évaluer l'indice de susceptibilité relatif à un critère de nature qualitative comme celui-ci, le principe consiste donc à décomposer le secteur étudié en unités spatiales dans chacune desquelles la sensibilité à la dissolution sera la même (cf. description du principe théorique en Annexe 4).

La hiérarchisation des formations selon leur sensibilité à la dissolution a été établie pour toutes les formations rencontrées sur la zone pilote et a conduit à distinguer 6 classes notées A à F (décrites dans le Tableau 7). L'analyse géologique, principalement liée à la proportion de carbonate et d'évaporite, est explicitée au § 0. Or, la lithologie affleurante masque les formations sous-jacentes; la carte géologique ne suffit donc pas à connaître l'emprise des formations sensibles à la dissolution. Cependant, en chaque point du territoire, grâce au log géologique reconstitué (cf. § 6.1.), nous sommes en mesure de connaître la succession lithologique rencontrée, associée à l'épaisseur et à la proportion d'éléments carbonatés et évaporitiques de chaque couche. Ainsi, en chaque point du territoire, nous sommes en mesure d'estimer la profondeur de l'horizon le plus sujet à la dissolution.

Calage des indices

Pour valider ce critère, nous disposons d'une base de données de cavités, localisées à un endroit mais pouvant concerner n'importe quelle formation sous-jacente. Nous ferons **l'hypothèse forte et le choix que cet échantillon de cavités recensées par l'homme est représentatif de ce qui se passe dans les 100 premiers mètres** et qu'il y a peu de chance que des cavités plus profondes aient été visitées et répertoriées. Il se trouve que cette tranche de profondeur est celle qui intéresse les pouvoirs publics dans un objectif de gestion du territoire, autant pour la connaissance du sous-sol que pour la prévention des risques associés. Pour les cavités situées au-delà de cette profondeur, on verra que les risques d'effondrements en surface qui pourraient leur être imputables sont quasiment inexistants (cf. § 7.4.1.).

Le territoire étudié sera donc partitionné en 5 unités spatiales (fusion des classes E et F), représentant la formation la plus sensible à la dissolution sur les 100 premiers mètres, d'après la stratigraphie locale. En pratique, si la formation affleurante appartient à la classe A, on conserve cette classe. Ailleurs, on tient compte de la classe maximale parmi les formations se succédant jusqu'à 100 m de profondeur. Vu la complexité structurale régionale, ce travail impératif ne peut se faire que grâce aux logs reconstitués par secteurs structuraux (au § 6.1.). À titre informatif, l'illustration 34

représente l'emprise respective de chaque type de formation selon qu'on considère seulement la lithologie affleurante ou la lithologie la plus défavorable sur 100 m de profondeur.

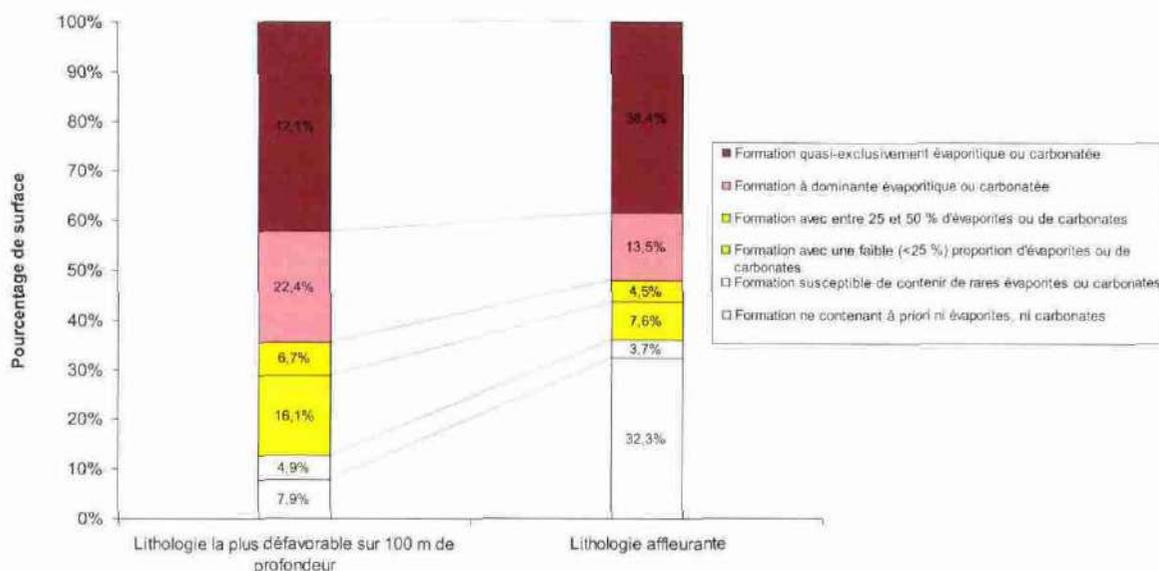


Illustration 34 : Proportion surfacique occupée par chaque type de lithologie selon que l'on considère la lithologie affleurante ou la lithologie maximale rencontrée sur 100 m de profondeur.

En utilisant les concepts théoriques décrits en Annexe 4, chaque unité spatiale est associée à un poids unique calé sur les événements observés (et non plus uniquement sur un jugement d'expert). Les calculs obtenus sur la zone pilote, sont synthétisés dans le Tableau 11 ci-dessous. Finalement 5 poids ont été évalués avec les rapports de discrimination associés. Pour limiter l'effet d'un des biais (potentiel) déjà évoqué, ces calculs n'ont pas tenu compte des 250 événements recensés dans la forêt domaniale des Moidons (cf. § 4.3.), pour ne pas accentuer le ratio séparant les classes A et B.

Lithologie maximale sur 100 m de profondeur	Surface (km ²)	Nombre de phénomènes recensés	Poids de l'unité	Rapport entre deux poids
E et F	213,5	20	0,1	
D	269,4	68	0,3	2,7
C	112,0	48	0,6	1,7
B	374,1	219	0,8	1,4
A	704,7	635	1,2	1,5
	1 673,6	990		

Tableau 11 : Répartition des phénomènes recensés dans chaque unité.

La pertinence du facteur identifié au départ est donc vérifiée par l'observation de l'échantillon de données, puisque les poids respectent l'ordination théorique supposée.

De manière à mesurer les différences de comportement des horizons selon les secteurs structuraux, un calcul de ce type a été testé indépendamment sur chacun d'eux, mais l'inventaire n'est pas assez fourni à cette échelle pour que les résultats se soient révélés utilisables.

Cet outil permet de gérer l'hétérogénéité de répartition spatiale des données au sein des unités en propageant l'information localisée à un endroit ; tout le plateau calcaire du Kimméridgien inférieur (j6a) et de l'Oxfordien (j5c), au sud du plateau de Champagnole (en orange sur l'illustration 35), sera affecté par même poids (0,8 d'après le Tableau 11) alors que les données sont réparties de façon hétérogène sur le plateau.

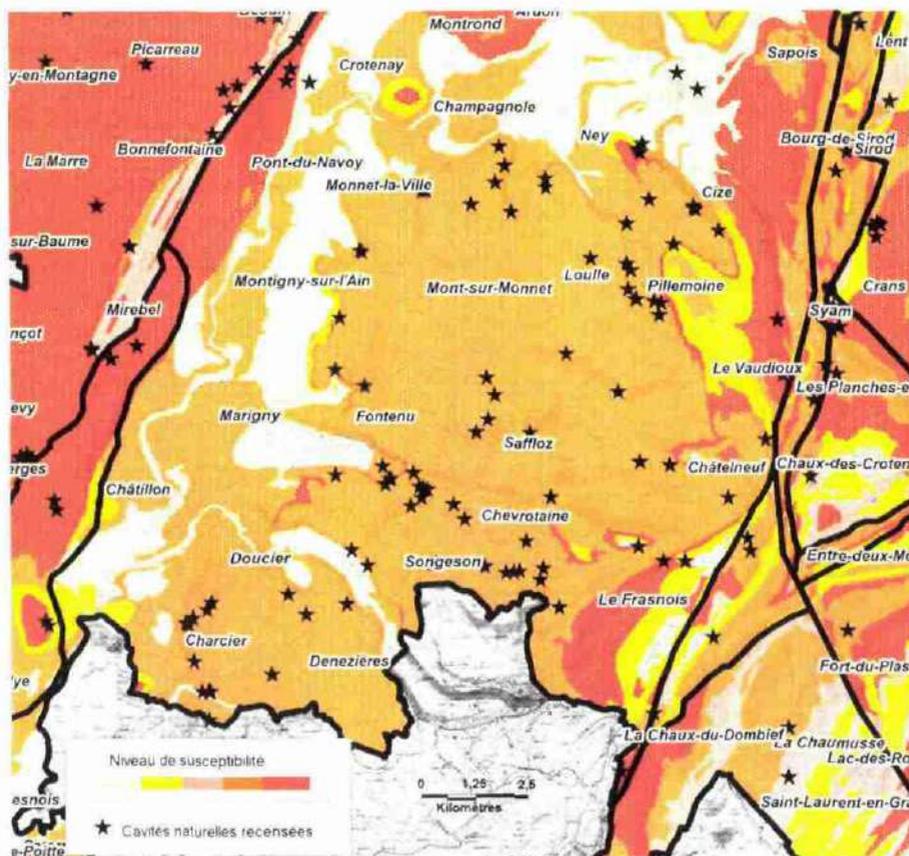


Illustration 35 : Extrait de la carte de susceptibilité (Annexe 5) sur le sud du plateau de Champagnole.

Gestion des incertitudes

Intégrer les incertitudes participe à améliorer la gestion du risque. Le calage des poids peut être entaché par plusieurs sources d'incertitude :

- les biais liés à l'imprécision du support cartographique disponible. Remarquons ici la limite de l'exercice à cette échelle. Nous n'avons pas d'autres moyens que de

supposer que si la formation affleure, il est possible qu'elle soit présente entièrement, alors qu'en réalité, il se pourrait qu'elle ait été partiellement érodée. Ceci pourrait expliquer l'absence d'événements recensés sur le calcaire Bathonien (j3) de la partie centrale du plateau de Champagnole, séparée du plateau de Lons-le-Saunier particulièrement karstique par la faille de l'Euthe. Il est envisageable que le niveau karstique ait été érodé sur le plateau de Champagnole à cet endroit. Nous conserverons la trace du doute lié à l'absence d'événement en attribuant une fourchette de valeur à l'indice de susceptibilité à cet endroit ;

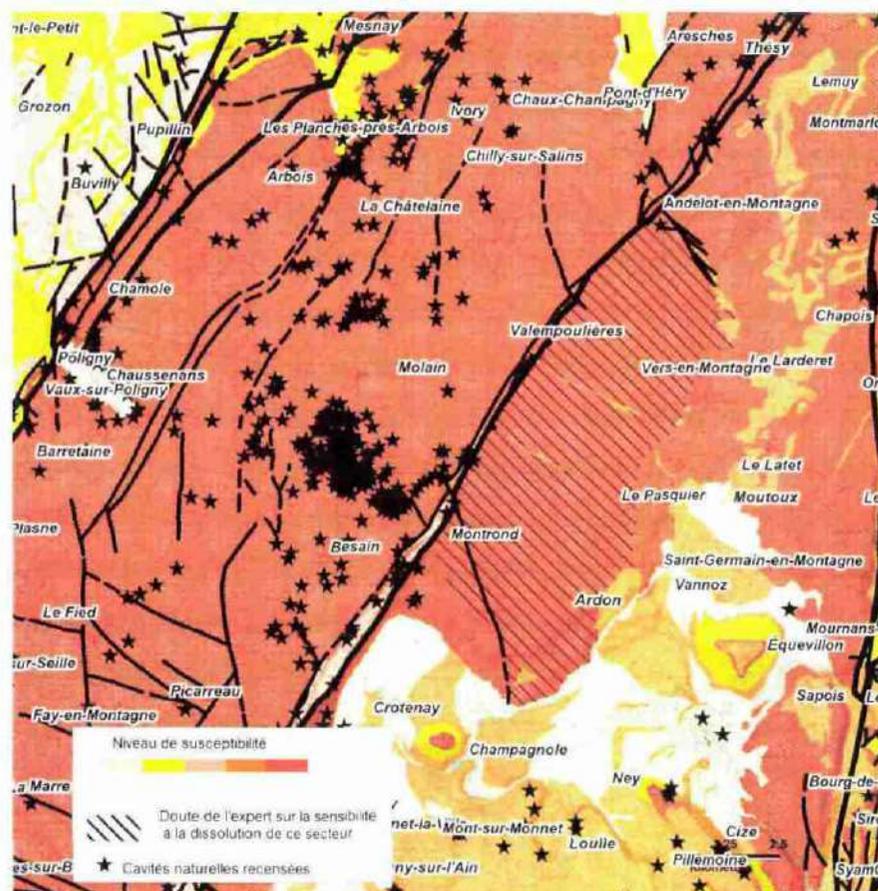


Illustration 36 : Extrait de la carte de susceptibilité (Annexe 5) au centre du plateau de Champagnole.

- les biais anthropiques dans la répartition des données de l'inventaire sur le territoire, nécessitant cependant d'être identifiés a priori pour pouvoir être éliminés. Cette hypothèse peut être envisagée pour expliquer l'accumulation des événements dans la forêt de Moidons (cf. § 4.3.) ; nous avons choisi de ne pas tenir compte de ces événements ;
- les biais liés à la fiabilité et à la précision de localisation de certaines données de l'inventaire (imprécision pouvant atteindre plusieurs centaines de mètre). Ainsi, nous pouvons nous interroger sur la fiabilité des 20 événements recensés sur les horizons appartenant à la classe E et F, ne contenant a priori pas ou très peu d'évaporites ou

de carbonates. Nombre d'entre eux sont situés à proximité d'une limite de classe. Ainsi, nous conserverons une fourchette de valeur pour le poids des classes E et F, entre 0 (théorique) et 0,1 (calculé).

7.3.2. Susceptibilité liée à la structure

La présence de failles au sein des calcaires semble être, d'après les résultats de la synthèse bibliographique, un critère de formation de cavités (infiltration des eaux). D'après les synthèses documentaires (cf. § 5.1.2.), il est précisé, en particulier, que les structures tectoniques majeures, témoignant d'un rejeu en distension, favorisent le développement de fractures ouvertes susceptibles de drainer les eaux souterraines.

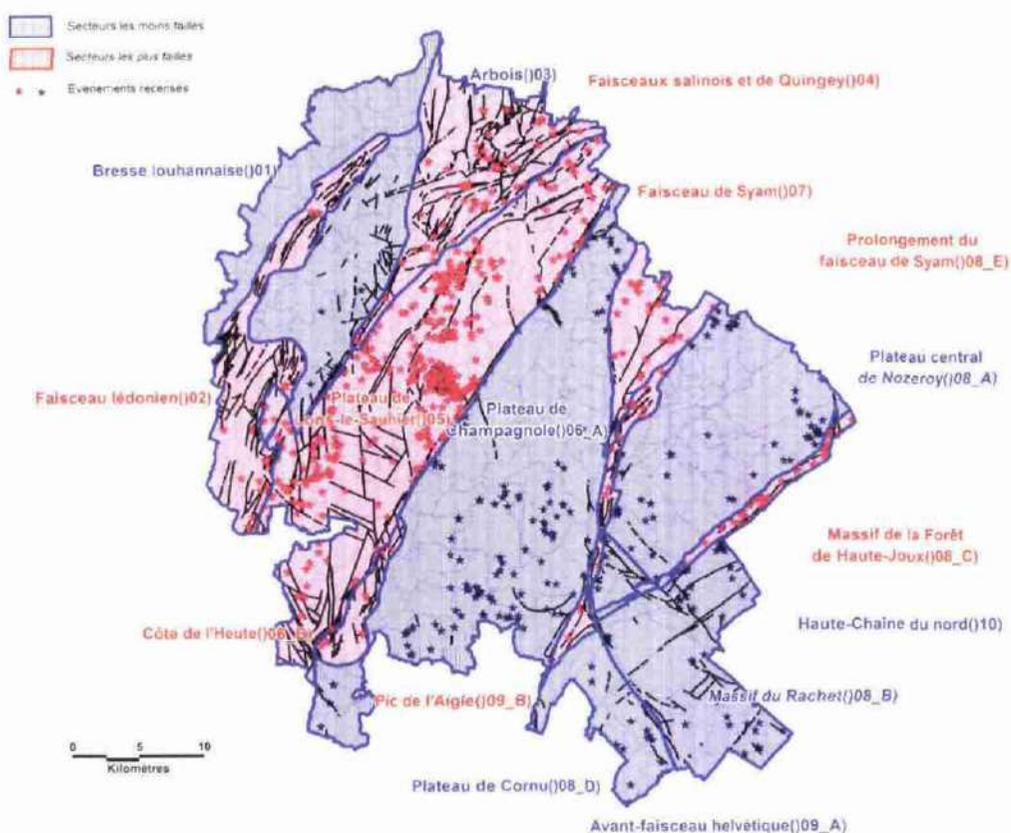


Illustration 37 : Distinction de deux types de secteurs structuraux

Nous avons testé deux moyens de mesurer cette influence des failles, à partir des informations disponibles : une analyse de sensibilité à grande échelle, considérant la proximité des failles stricto-sensu comme facteurs défavorables et l'autre à petite échelle, distinguant les grands ensembles structuraux selon leur intensité globale de fracturation. Nous avons considéré que les failles relevées à l'échelle du 1/50 000 sur

la carte géologique étaient représentatives de ce type d'événements structuraux majeurs. D'après ces indications, les secteurs homogènes structuraux identifiés au § 3.2. peuvent se répartir en deux catégories, comme le montre l'illustration 37. 942 événements sur 1 240, soit 76 %, sont situés sur les secteurs structuraux les plus faillés. Ces secteurs couvrent une superficie de 687 km², soit la moitié du territoire étudié.

Finalement, sur notre zone pilote, le critère n'a pas été retenu comme discriminant, mais pourra éventuellement être utilisé à l'échelle du département. Plus que la localisation des failles principales, seule information disponible, le degré de fracturation des calcaires est un élément clé de leur karstification, mais cette information est peu détaillée dans les documents géologiques consultés (cartes géologiques, forages BSS...). Son estimation nécessiterait un travail sur le terrain (observations d'affleurement) afin de créer des classes de vulnérabilité.

7.3.3. Résultat : la carte de susceptibilité de présence de cavités

À partir de l'évaluation de ces indices de susceptibilité, la carte de susceptibilité de présence de cavités naturelles, associée aux incertitudes dans le diagnostic, est disponible en Annexe 5.

Rappelons que cette analyse de susceptibilité se limite à la tranche 0-100 m de profondeur pour laquelle nous disposons de données et qui se trouve être celle qui intéresse les pouvoirs publics dans un objectif de gestion du territoire, autant pour la connaissance du sous-sol que pour la prévention des risques associés.

7.4. SUSCEPTIBILITÉ D'EFFONDREMENT DE CAVITÉS JUSQU'À ENGENDRER DES DÉSORDRES EN SURFACE

On qualifie de désordre, l'apparition en surface d'un affaissement ou d'un effondrement liée à la présence d'une cavité. Cette apparition est liée à des facteurs de prédisposition spécifiques, qui expliquent qu'à un endroit une cavité va produire un désordre en surface alors qu'ailleurs, la cavité n'aura pas de conséquence en surface. L'analyse des désordres réellement observés doit, normalement, nous aider à comprendre comment expliquer leur apparition.

Parmi les 1 240 événements recensés dans notre base, seulement 124 correspondent à des désordres en surface, soit 10 % de l'ensemble. Ce nombre est vraisemblablement inférieur à l'existant par rapport à notre connaissance du territoire, mais cette étude ne prévoit pas de réaliser un inventaire détaillé (ni recensement sur le terrain, ni étude avec un modèle numérique de terrain précis) L'analyse sera donc étayée par des considérations sur les territoires voisins et similaires et sur la connaissance du phénomène en général.

7.4.1. Susceptibilité liée à l'épaisseur des terrains de recouvrement (Critère 2)

Nature du recouvrement

Le recouvrement est défini par l'épaisseur des terrains surincombants à une cavité. A cette échelle de l'étude, nous ne pouvons situer le niveau karstique (ou évaporitiques) à l'intérieur d'un horizon lithologique. Un ordre de grandeur de l'épaisseur de ce recouvrement sera donné par l'épaisseur de l'horizon lithologique qui recouvre, en discordance ou pas, l'horizon sujet à la présence de cavités. Sur les horizons qui affleurent, sensibles à la dissolution, la nature du recouvrement est minimale, sans qu'elle puisse être connue.

Les évènements sont répartis comme indiqué dans le Tableau 12 en fonction de la lithologie du terrain en surface. Les terrains de recouvrement correspondent à toutes les lithologies affleurantes non calcaires ou non gypsifères (classes D, E ou F: marnes crétacées, moraines, alluvions...), voir paragraphe 0.), les terrains calcaires aux lithologies notées A, B ou C. Les calculs montrent une densité de désordres 2 fois plus importantes sur les zones où les terrains calcaires affleurent, c'est-à-dire où l'épaisseur de recouvrement au-dessus des cavités (niveaux karstiques principalement) est minimale. Néanmoins, le nombre de désordres recensés dans des zones de terrains à recouvrement non calcaires justifie de s'intéresser à ce type de zones.

Terrains de recouvrement (superficie = 728,5 km ²)		Terrains calcaires (superficie = 941 km ²)	
Nombre	Densité	Nombre	Densité
37	0,05	87	0,09

Tableau 12 : Répartition des désordres en fonction de la nature des terrains affleurants.

Évaluation de l'épaisseur des terrains de recouvrement

Pour chaque polygone de la zone d'étude, on calcule la valeur de la variable E_p , représentative de l'épaisseur minimale des terrains de recouvrement.

Si on note N la formation affleurant en surface et N-1 la formation sous-jacente, la valeur de E_p est calculée suivant les règles suivantes, synthétisées dans le Tableau 13 :

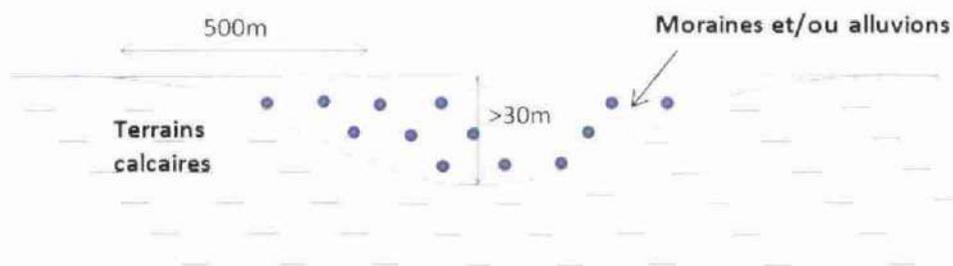
- si la formation affleurante N est sensible à la dissolution (classe lithologique A, B ou C), alors l'épaisseur du recouvrement au-dessus d'une cavité est minimale ; E_p est fixé à 0 ;
- si la formation affleurante N est peu sensible à la dissolution (classe lithologique D, E ou F) :
 - si la formation N-1 est sensible à la dissolution (classe lithologique A, B ou C), E_p est égale à l'épaisseur minimale de la formation N,
 - si la formation N-1 est peu sensible à la dissolution (classe lithologique D, E ou F),

- si l'épaisseur de la formation N-1 est connue, E_p est égale à la somme des épaisseurs minimales des formations N et N-1,
- si l'épaisseur de la formation N-1 n'est pas connue, E_p est égale à l'épaisseur minimale de la formation N et un indice d'incertitude est appliqué.

Formation affleurante N (E_{pN})	Formation affleurante N-1 (E_{pN-1})	Epaisseur de recouvrement estimée
classe = A, B, C	-	0
classe = D, E ou F	classe = A, B, C	E_{pN}
classe = D, E ou F	classe = D, E ou F	$E_{pN} + E_{pN-1}$
classe = D, E ou F	?	$[E_{pN} ; \text{Incertitude}]$

Tableau 13 : Récapitulatif de l'évaluation de l'épaisseur du recouvrement.

Dans le cas des moraines et alluvions, quand l'épaisseur minimale est supérieure à 30 mètres, un traitement particulier est appliqué dans une zone de 500 mètres à proximité des limites de ces dépôts, pour tenir compte de leur amincissement aux extrémités. Dans cette zone de 500 mètres, la valeur de E_p est prise égale à 0.



Répartition des données de désordres en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement

On s'intéresse maintenant à la répartition des désordres en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement. Localement, le manque d'information sur l'épaisseur de la formation sous-jacente à la formation de surface induit une incertitude sur l'épaisseur des terrains de recouvrement. Cette incertitude sera exploitée lors de l'évaluation de la susceptibilité d'effondrement.

Classe d'épaisseur minimale de terrain de recouvrement	Nombre de désordres	Densité
0 à 50 mètres	21 (dont 4 avec une incertitude liée au manque d'information sur l'épaisseur sous-jacente)	0,036
50 à 100 mètres	16 (dont 8 avec incertitude liée au manque d'information sur l'épaisseur sous-jacente)	0,119
100 à 300 mètres	0	0

Tableau 14 : Répartition des désordres en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement.

Les résultats du Tableau 14 montrent que, sur la zone pilote, on observe des événements même lorsque l'épaisseur minimale des terrains de recouvrement est comprise entre 50 et 100 mètres.

Si on affine les classes d'épaisseur dans la gamme 0-100 mètres (Tableau 15), on observe une prédominance des événements lorsque l'épaisseur de recouvrement est très faible, entre 0 et 10 mètres, mais aussi plusieurs événements jusqu'à 100 mètres d'épaisseur. Il est important de noter que 8 des 12 « désordres » observés au droit d'un recouvrement supérieur à 80 m correspondent à des horizons évaporitiques (t6-7). Ceci tendrait à confirmer que les cavités évaporitiques peuvent en général atteindre des dimensions largement supérieures à celles des cavités karstiques, et par conséquent, produire des désordres perceptibles en surface malgré des recouvrements beaucoup plus épais. L'imprécision de localisation de ces 12 événements issus de la BD MVT peut également justifier expliquer ces valeurs importantes. En tout cas, nous ne pouvons exclure l'apparition de désordre pour des recouvrements inférieurs à 100 m, mais la prédisposition que le recouvrement gêne l'apparition d'un désordre en surface décroît avec cette épaisseur.

Classe d'épaisseur minimale de terrain de recouvrement	Nombre de désordres
0 à 10 mètres	17
10 à 20 mètres	0
20 à 30 mètres	0
30 à 40 mètres	0
40 à 50 mètres	4
50 à 60 mètres	2
60 à 70 mètres	2
70 à 80 mètres	0
80 à 90 mètres	8
90 à 100 mètres	4

Tableau 15 : Répartition des désordres entre 0 et 100 mètres d'épaisseur des terrains de recouvrement.

Vu le peu d'événements explicitement qualifiés de désordres, dans l'inventaire, il nous semble important d'étayer nos observations sur un territoire plus large. L'illustration 38 rappelle ce qui avait été observé sur un panel de 100 événements inventoriés dans des secteurs où l'épaisseur du recouvrement marneux était connue avec précision, dans le cadre de l'étude sur le potentiel géothermique de la Franche Comté⁴. La répartition des désordres confirmerait la concentration des événements dans les zones où le recouvrement est le plus faible. Avec ce panel, globalement, il ressort que 50 mètres apparaît comme l'ordre de grandeur de l'épaisseur maximale raisonnable au-delà de laquelle les désordres en surface se font plus rares et s'expliqueraient par des conditions spécifiques qu'on ne peut exclure (cavités volumineuse, recouvrement

⁴ C. Legrand, D. Allier, A. Nachbaur avec la collaboration de S. Belkacim, R. Coueffe, P. Hemlot, K. Rousseil, B. Tourlière (2010). Atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région Franche-Comté. Rapport final. BRGM RP-58768-FR, 279 p., 104 ill. 13 ann.

sans cohésion...). Cependant, il faut rappeler qu'une circulation d'eau dans le réseau karstique aura également tendance à évacuer les produits éboulés fins et à limiter l'effet de l'auto-comblement. À une échelle plus fine, la localisation des cavités exondées et la nature du recouvrement pourraient permettre d'affiner l'influence du lessivage sur l'auto-comblement.

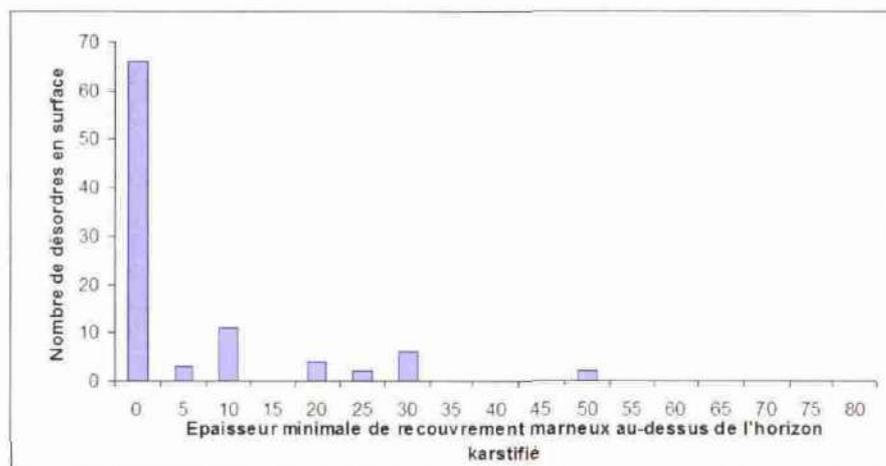


Illustration 38 : Nombre de désordres en fonction des épaisseurs de recouvrement marneux (en mètres). Source : Rapport BRGM RP-58768-FR

On définit l'ensemble flou M comme les épaisseurs de recouvrement qui peuvent limiter les désordres en surface. Dans cet ensemble, chacune des épaisseurs est associée à un poids entre 0 et 1 mesurant leur degré de corrélation à la réalisation de l'événement « présence d'un désordre en surface ». Sur la base des données collectées ainsi que de la connaissance du contexte régional, d'après l'illustration 39, on ne peut exclure que l'effondrement d'une cavité située à une profondeur inférieure à 30 m n'engendre des répercussions en surface (possibilité d'effondrement = 1) Sur l'intervalle [30-100], la possibilité que l'effondrement atteigne la surface, diminue. Au-delà de 100 m de profondeur, l'expert géotechnicien a estimé qu'un désordre en surface est très peu probable (possibilité d'effondrement = 0), même avec l'effet de lessivage par circulation des eaux dans le réseau. Cet outil permet de s'affranchir de l'insuffisance de données dans l'inventaire en le complétant.

Cependant, afin de limiter la subjectivité des choix des seuils de l'expert et donc l'incertitude du modèle choisi pour représenter la réalité, le diagnostic est encadré par deux enveloppes, l'une optimiste et l'autre pessimiste, à partir des événements recensés et de la connaissance du contexte local. L'incertitude que l'expert adosse à son diagnostic est quantifiable par la différence entre les résultats obtenus par les deux distributions.

Au-delà de 100 m de profondeur et en deçà de 30 m de profondeur, l'expert est certain de son diagnostic ; entre ces deux valeurs, son jugement est accompagné d'une incertitude représentée par une plage de variation, qui est maximale à 50 m de profondeur. Ainsi, en tout point du territoire étudié, est attribué un indice de

susceptibilité et une plage de variation de cet indice liée à l'incertitude du diagnostic de l'expert.

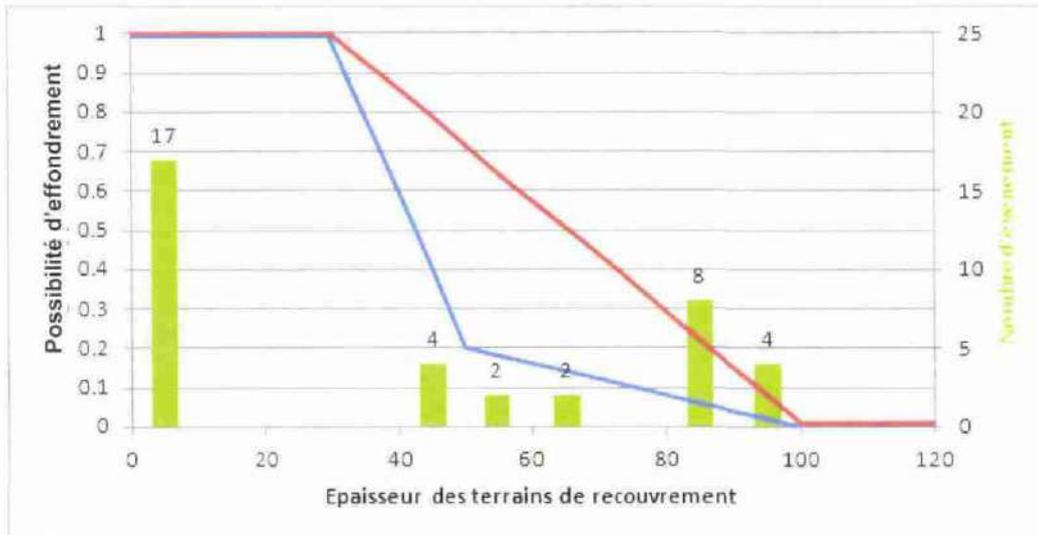


Illustration 39 : Possibilité d'effondrement (degré d'appartenance) en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement et nombre d'évènements recensés.

7.4.2. Susceptibilité liée à l'infiltration des eaux (Critère 3)

Le paragraphe 6.5 présente l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) dont la valeur rend compte de la capacité d'un sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Il décrit, de manière qualitative, la perméabilité de la lithologie affleurante.

Le Tableau 16 indique la répartition des désordres recensés en fonction de la valeur de l'IDPR classé en 4 classes (0 à 500, 500 à 1000, 1000 à 1500, 1500 à 2000). D'après la littérature associée à cet indice, un indice inférieur à 1000 signifie que l'infiltration des eaux est majoritaire sur ce secteur, alors que le ruissellement l'emporte dès que l'indice dépasse 1000 (cf. Tableau 10).

Valeur de l'IDPR	Nombres de désordres	Densité
0 à 500	87	11
500 à 1000	21	5,6
1000 à 1500	10	3
1500 à 2000	6	3,4

Tableau 16 : Répartition des désordres en fonction de la valeur de l'IDPR.

Bien que le nombre de désordres soit limité, un plus grand nombre d'entre eux semble effectivement se situer sur les horizons majoritairement infiltrant. Un écoulement vertical ne peut qu'accroître le processus de dégradation souterrain d'une cavité existante. Cette hypothèse est surtout étayée par la littérature dans ce domaine qui

confirme que l'eau participe à accélérer la remontée de voûte ou la déstructuration du toit des cavités. Cet écoulement vertical favorise également le lessivage des produits fins, limitant l'autocomblement. Cet indice reflète le mode d'écoulement actuel, il ne saurait refléter la circulation des eaux responsable de la formation des cavités dans les calcaires, qui ne sont pas forcément ceux qui affleurent (87 % des cavités sont concernés par des horizons affleurant qualifiés d'infiltrant, probablement parce qu'ils correspondent à des calcaires fracturés).

De ces observations, on déduit une fonction d'appartenance qui permet d'évaluer un indice de susceptibilité d'effondrement d'une cavité liée à la capacité d'infiltration du sous-sol. Ce facteur n'étant qu'un facteur aggravant/déclenchant parmi d'autres, l'expert ne peut assurer que dans la partie ruisselante, il n'y ait aucune possibilité de désordre provenant d'autres facteurs, d'où la possibilité d'effondrement minimale de 0,4 (et non de 0).

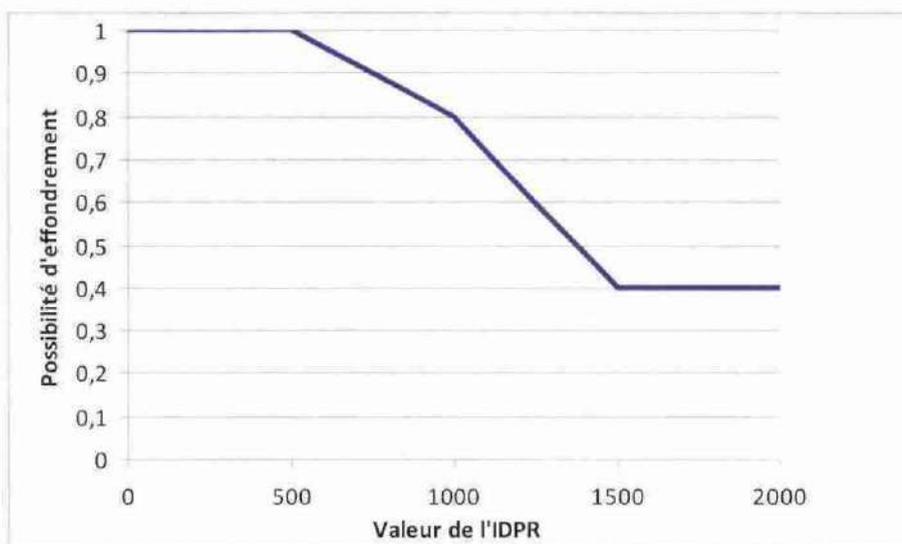


Illustration 40 : Possibilité d'effondrement en fonction de la valeur de l'IDPR.

7.4.3. Résultat : la carte de susceptibilité d'effondrement

Les deux critères retenus comme explicatifs pour que des effondrements de cavités aient des répercussions en surface, sont :

- l'épaisseur des terrains de recouvrement ;
- la capacité d'infiltration des eaux.

La carte de susceptibilité d'effondrement, en Annexe 6, est évaluée par le croisement des deux indices issus des deux critères discriminants ci-dessus. Dans la réalité, deux valeurs extrêmes sont retenues, tenant compte de l'incertitude que l'expert attribue à son diagnostic sur l'épaisseur du recouvrement.

Lors du croisement des critères, les outils mathématiques utilisés permettent d'agréger les informations contenues dans chaque maille sans compenser les critères majoritaires. Le facteur « infiltration des eaux », n'étant qu'un facteur aggravant la situation par rapport au facteur permanent « épaisseur du recouvrement », il ne pourra qu'avoir tendance à faire diminuer la possibilité qu'un effondrement ait des répercussions en surface. Au-delà de 100 m de recouvrement, quel que soit le potentiel d'infiltration, un effondrement de cavité ne sera pas perceptible en surface. En deçà de 100 m d'épaisseur, l'indice correspond au potentiel d'effondrement relatif à l'épaisseur de recouvrement, facteur permanent, atténué (au maximum jusqu'à 0,4) selon le potentiel d'infiltration.

La susceptibilité d'effondrement est peu discriminante sur la zone pilote, puisque la majorité du territoire est concernée par une susceptibilité maximale (égale à 1), n'ayant pas de données ni de critères plus discriminants disponibles à cette échelle. L'interprétation est restée mesurée et cohérente avec le peu de désordres disponibles pour valider des hypothèses.

Cette carte de susceptibilité d'effondrement peut être affinée à des échelles plus grandes (communales), en :

- étayant l'inventaire des effondrements (par détection de dolines par exemple) ;
- affinant l'identification des critères explicatifs. Notamment, la profondeur de l'horizon karstique à l'intérieur de la formation carbonatée est un critère très discriminant qu'il serait intéressant d'utiliser.

7.5. RÉSULTAT EN TERMES DE SUSCEPTIBILITÉ D'APPARITION DE DÉSORDRES EN SURFACE

7.5.1. La carte de susceptibilité globale

La susceptibilité qu'un désordre apparaisse en surface est finalement obtenue à partir du croisement de la susceptibilité de présence de cavités en profondeur et celle de l'effondrement (rupture) jusqu'en surface, des terrains au droit de la cavité, comme le rappelle l'illustration 33.

La carte finale de « susceptibilité d'apparition de désordres liés à des cavités naturelles » est présentée en Annexe 7. Cette carte donne une vision globale du territoire et permet de localiser les zones prioritaires. Le plateau de Lons-le-Saunier ressort nettement, comme le plus susceptible à l'apparition de désordres liés aux cavités naturelles.

Chaque endroit du territoire est caractérisé par une note quantitative qui permet de le situer relativement aux autres. Ces notes sont ramenées à la valeur maximale rencontrée sur le territoire étudié, correspondant ici au plateau de Lons-le-Saunier, par exemple. Le code de couleur utilisé est représenté en illustration 41.

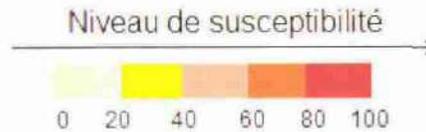


Illustration 41 : Légende des cartes de susceptibilité.

Par construction, le niveau de susceptibilité final obtenu rassemble de type d'information indépendant. Les cartes en Annexe 5 et Annexe 6 permettent de remonter aux informations initiales, ce qui peut s'avérer important puisque les moyens de prévention dont dispose une commune seront différents selon que celle-ci est concernée par un fort niveau de susceptibilité de présence ou un fort niveau d'effondrement.

7.5.2. L'indice de confiance du diagnostic

Le niveau de susceptibilité est couplé à une valeur de qualité du diagnostic, dont la signification a été explicitée dans les paragraphes précédents. Cet indice mesure le risque pris par l'expert dans son analyse et permet de rester prudent dans le diagnostic affiché.

Concrètement, en chaque point du territoire, deux valeurs extrêmes de susceptibilité sont évaluées, tenant compte de l'incertitude que l'expert attribue :

- à son diagnostic pour certaines valeurs d'épaisseur de recouvrement (cf. § 7.4.1.) ;
- au poids qu'il attribue à certains horizons pour quantifier leur sensibilité à la dissolution (cf. § 7.3.1.).

Les cartes présentent le niveau de susceptibilité le plus défavorable, qu'il est éventuellement et localement possible d'atténuer vu l'incertitude que l'expert attribue à cette valeur localement (Illustration 42). Comme l'incertitude est quantifiée, il est alors possible de connaître également la valeur la moins défavorable que pourrait atteindre le niveau de susceptibilité à cet endroit.

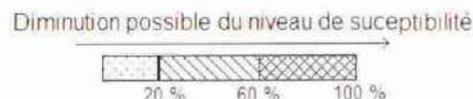


Illustration 42 : Légende des cartes de susceptibilité.

7.5.3. Analyse des résultats et limites

En superposant les résultats avec l'inventaire utilisé, il ressort clairement que la connaissance des cavités (« là où l'on a de la donnée ») ne guide plus arbitrairement les résultats, i.e. qu'une zone sans information sur les cavités peut être classée en susceptibilité moyenne ou forte.

L'interprétation quantitative est à manipuler précautionneusement. **Le niveau de susceptibilité ne représente pas une probabilité temporelle, mais mesure une probabilité spatiale d'apparition de désordre qui n'a qu'une signification relative et non absolue.**

L'analyse de susceptibilité menée à l'échelle départementale n'a pas la résolution suffisante pour pouvoir être reprise précisément à l'échelle d'une commune (et donc dans un PPR). Elle permet d'identifier les bassins de risques pour lancer ensuite une étude à l'échelle communale.

La base de données des effondrements connus ne reste que très partielle et il convient de rester prudent sur l'utilisation de la carte de susceptibilité d'effondrement en gardant à l'esprit le peu de connaissance disponible à l'échelle de l'étude sur les modalités d'effondrements (typologie, facteurs déclenchants, dimensions). Ceci donne des perspectives d'amélioration des connaissances particulièrement intéressantes.

8. Enjeux et loi d'exposition au risque

8.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE PILOTE EN TERMES D'ENJEUX

Description de la zone pilote

La zone pilote regroupe 181 communes (sur les 580 que comptent le département), sur un territoire de 1 679 km² (soit un tiers du département). Les informations quantitatives décrivant chacune d'entre elles sont regroupées en Annexe 14.

L'illustration 43 permet d'avoir une vue d'ensemble de ces communes, selon la valeur de l'enjeu population.

Ainsi, les communes concernées sont peu peuplées. 90 % d'entre elles ont moins de 160 habitants. 45 % ont une densité inférieure à 20 habitants/km² et 95 % en-dessous de 100 habitants/km².

5 communes seulement ont plus de 1 500 habitants (Saint-Laurent-en-Grandvaux, Morbier, Salins-les-Bains, Arbois, Poligny et Champagnole). Champagnole se détache avec 8 133 habitants.

Distinction des communes

À l'échelle d'un département, l'exposition au risque des communes les plus peuplées est systématiquement la plus élevée. L'information liée au risque dans les autres communes se retrouve « noyée » par ces communes où se concentrent les enjeux. D'autre part, le critère du nombre d'enjeux exposé est un critère de décision pour le décideur.

L'illustration 44 synthétise le type de communes constituant le département du Jura. À partir de cet état des lieux, nous proposons de distinguer deux types de communes

- communes dont le nombre d'habitants est supérieur à 1400 habitants, ce qui ne représente que 5 % des communes du département. Sur la zone pilote, ceci ne concerne que les communes d'Arbois, Champagnole, Morbier, Poligny, Saint-Laurent-en-Grandvaux et Salins-les-Bains ;
- communes dont le nombre d'habitants est inférieur à 400 habitants, ce qui représente les trois-quarts des communes du département. Ceci concerne 80 % des communes de la zone pilote, soit 146 ;
- communes dont le nombre d'habitants est compris entre 400 et 1 400. Sur la zone pilote, ceci ne concerne que 29 communes.

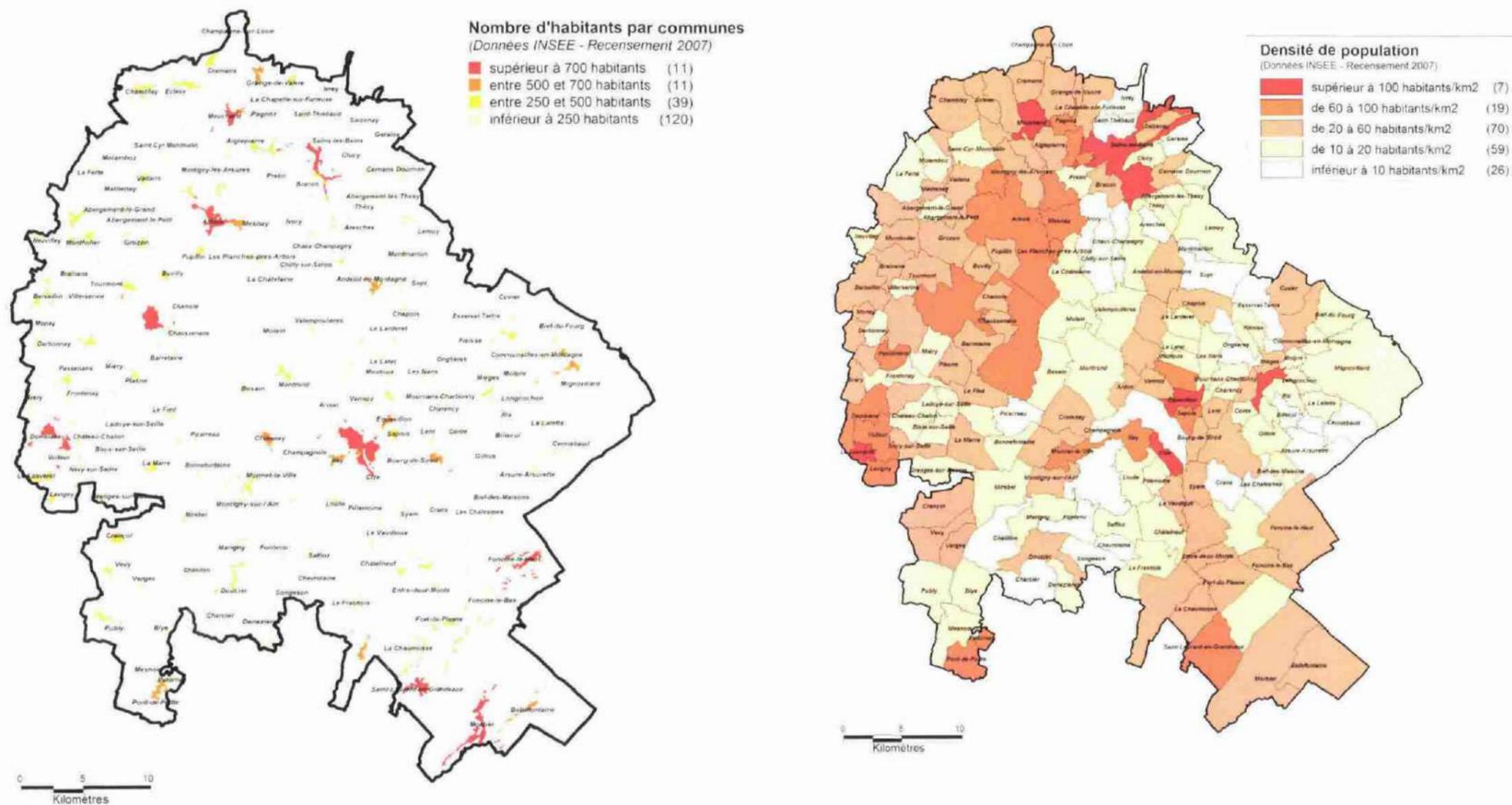


Illustration 43 : Description démographique des 181 communes composant la zone pilote.

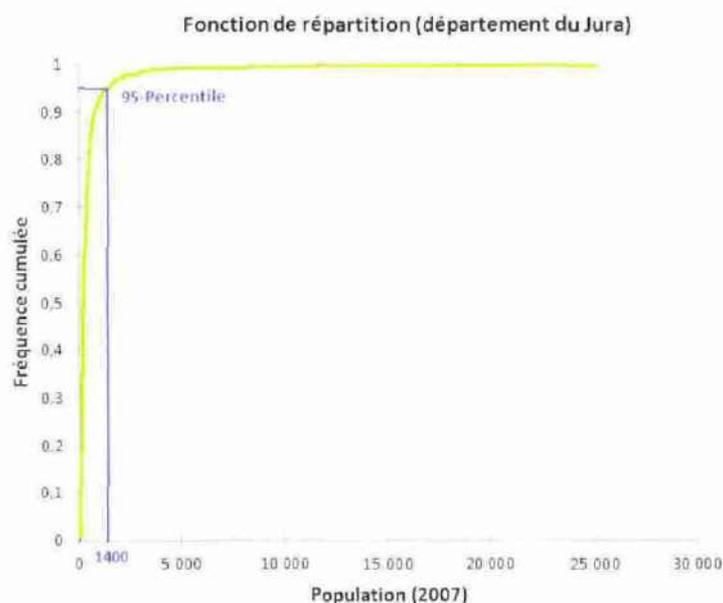


Illustration 44 : Répartition des communes du département du Jura, selon leur nombre d'habitants. 95 % de ces communes compte moins de 1 400 habitants.

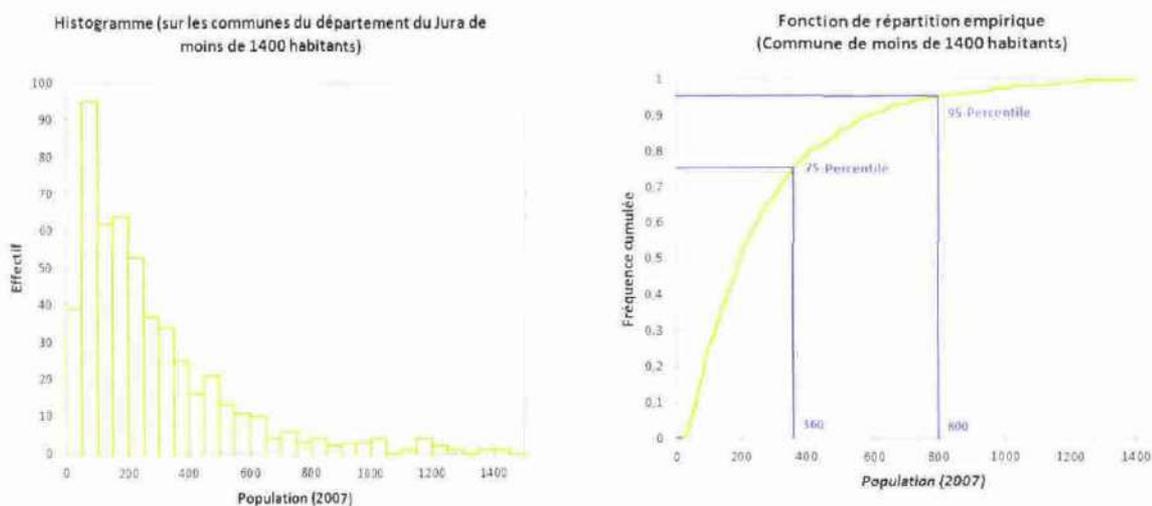


Illustration 45 : Répartition des communes du département du Jura de moins de 1 400 habitants. 75 % de ces communes compte moins de 400 habitants.

8.2. ÉVALUATION DES ENJEUX

Les étapes concernant le renseignement des enjeux sont décrites dans l'organigramme général (Illustration 1), repris ci-dessous.

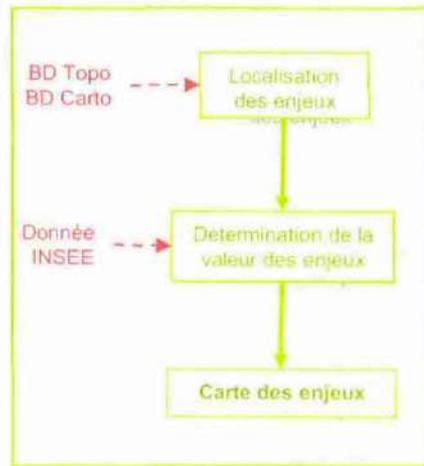


Illustration 46 : Étape de descriptions des enjeux.

8.2.1. Localisation des enjeux

Il a été considéré que **les enjeux se localisent sur les zones bâties d'un territoire**. Cela revient à négliger la présence d'enjeux sur les surfaces non habitées. À l'échelle départementale, pour un phénomène aussi localisé qu'un effondrement de cavité, il n'est pas raisonnable de tenir compte des critères du développement durable (facteurs économique, social et environnemental) ou des réseaux.

Pour localiser ces zones bâties, il a été décidé de se concentrer sur la BD Carto, validée et précisée par les photos aériennes de Google Earth et la BD Topo, ces deux supports s'étant avéré complémentaires.

La BD Carto donne l'emprise spatiale des zones bâties principales. Elle ne distingue pas à l'échelle d'un large territoire, les bâtiments isolés tels que les corps de fermes dans les communes rurales. Elle donne une image de la surface terrestre que l'on peut observer dès que l'on s'élève au-dessus du sol ou une schématisation de l'image qu'en donnent les cartes à l'échelle 1/100 000. Le raffinement des zones d'enjeux n'a pas de sens au regard des cartes de susceptibilité.

De précision métrique, la BD Topo comprend une description vectorielle des éléments du paysage et recense dans une couche détaillée les différents bâtiments, y compris les bâtiments isolés. Individualiser l'habitat n'est pas compatible avec l'échelle de l'étude, mais cette base de données permet de préciser certains zonages.

Ainsi, l'emprise spatiale des zones bâties issue de la BD Carto est validée et éventuellement mise à jour à l'aide de la BD Topo et des photos aériennes de Google Earth, plus récentes. Celles-ci permettent d'identifier des habitats isolés ou des développements communaux d'ampleur comme celui de l'illustration 49. Une distance tampon d'une centaine de mètre appliquée autour des bâtiments, permet de prendre en compte les futures zones d'extension urbaines.

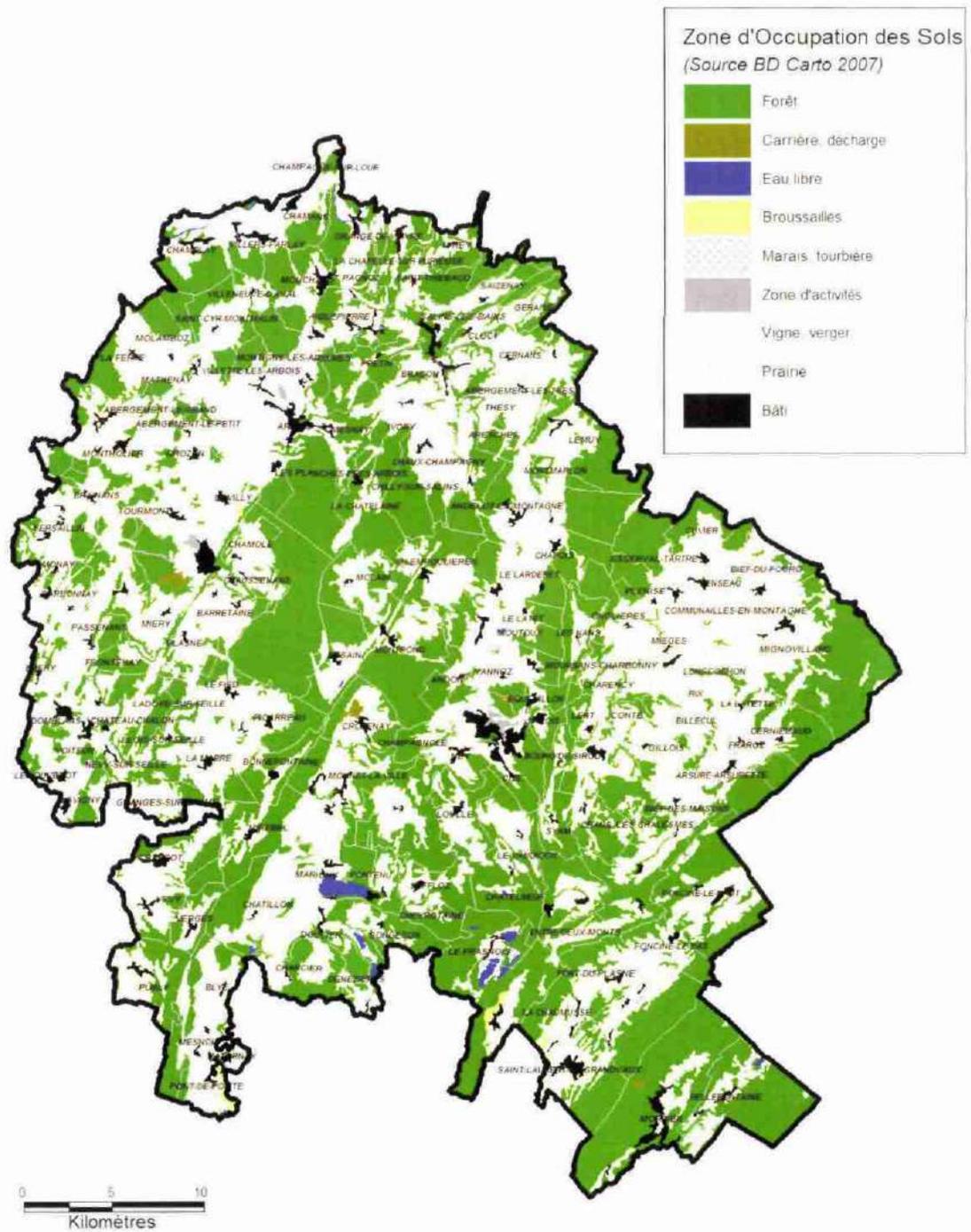


Illustration 47 : Zone d'occupation des sols de la zone pilote, département du Jura.
Source : BD Cartho.

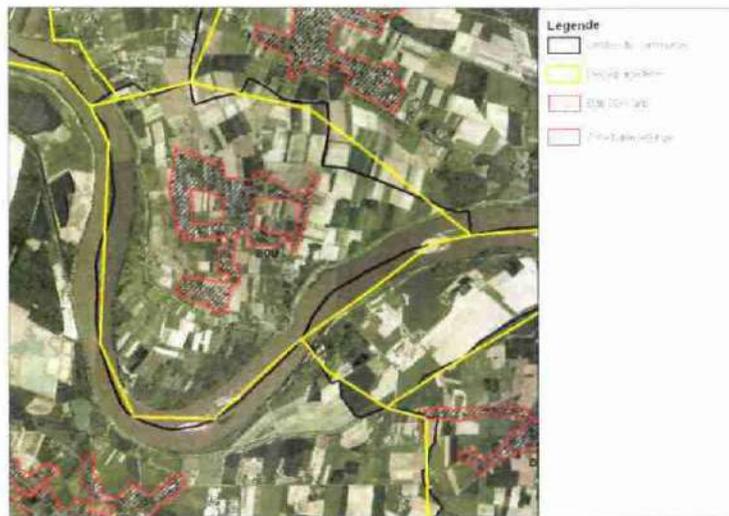


Illustration 48 : Exemple de sélection des zones bâties.
Source photo aériennes : Google Earth.

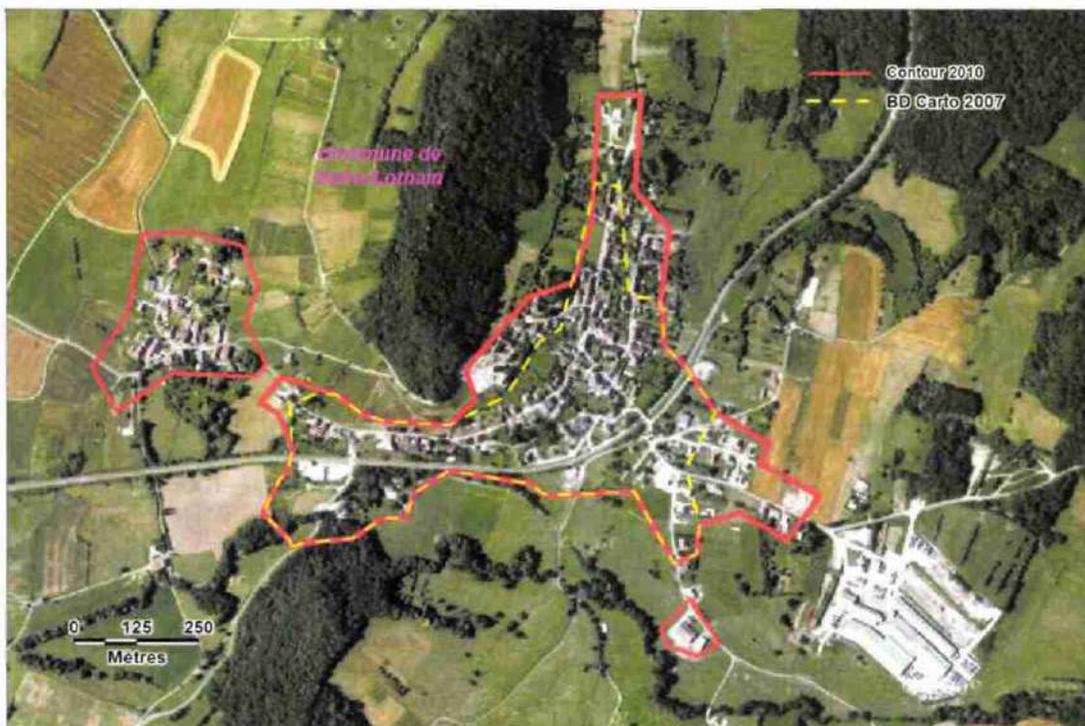


Illustration 49 : Exemple de sélection des zones bâties dans la commune de Saint-Lothain.
Source photo aériennes : Google Earth.



Illustration 50 : Exemple de sélection des zones bâties dans la commune de Domblans.
Source photo aériennes : Google Earth.

8.2.2. Choix de l'enjeu considéré comme représentatif : la population

Il a été choisi de quantifier l'enjeu en termes de nombre d'habitants, information donnée à l'échelle de l'IRIS (défini ci-dessous) pour les communes les plus peuplées et globalement à l'échelle de la commune, pour les autres.

Essentiel par nature, l'enjeu « population » a été jugé plus adapté à l'objectif de l'étude que l'enjeu « bâti » (nombre d'immeubles ou de logements par exemple) vu les difficultés de définir des courbes d'endommagement. La valeur foncière des terres est une variable qui aurait permis de tenir compte des zones d'extension urbaine, mais qui est difficilement accessible et soumise à subjectivité.

Pour la hiérarchisation finale, le nombre d'individus concerné par un niveau de susceptibilité donné reste un critère de choix pour le décideur. Il a été choisi de *considérer cette valeur plutôt que la densité de population, permettant de différencier des secteurs selon l'étendue de la zone bâtie concernée.* Au moment des découpages cartographiques, la population communale est répartie dans chaque maille, selon la surface bâtie de la maille par rapport à l'emprise totale de la zone bâtie.

8.2.3. Estimation de la valeur des enjeux : dénombrement de la population

Source des données de population

Ces données sont en libre accès sur le site internet de l'INSEE⁵. À la date d'aujourd'hui, elles sont issues du recensement de la population de 2007.

La base « Population » porte sur l'ensemble des IRIS des communes découpées en IRIS, que ces communes aient plus ou moins de 10 000 habitants. Elle contient également les données au niveau communal, pour les communes non découpées en IRIS, afin de couvrir l'ensemble du territoire. D'après les précisions de l'INSEE, les chiffres de population présentés correspondent à l'ensemble des personnes dont la résidence habituelle se situe sur le territoire considéré.

Découpage infra-communale : le recourt à l'IRIS pour les communes les plus peuplées

Sur le territoire national, les communes d'au moins 10 000 habitants et la plupart des communes de 5 000 à 10 000 habitants sont découpées en IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique). Ce découpage constitue une partition en « quartiers » dont la population est de l'ordre de 2 000 habitants. L'illustration 51 donne l'exemple de ce que peut être ce découpage. C'est à partir de ces zonages que l'INSEE donne ensuite des informations chiffrées (nombre d'habitants, habitats collectifs et individuels...) issues du recensement.

Il constitue la maille de base en matière de diffusion de données infra-communales. Il est construit à partir de critères géographiques et statistiques et, autant que possible, est homogène du point de vue de l'habitat.

Seule 4 communes du département du Jura sont concernées par un découpage à l'IRIS. Il s'agit de Lons-Le-Saunier, Saint Claude, Dole et Champagnole. Seule cette dernière est située dans l'emprise de la zone pilote. Sur ces communes, la répartition de la population est donc précisée par IRIS. Les 4 IRIS qui constituent la commune de Champagnole sont représentés en illustration 51.

Sur les communes qui ne sont pas découpées en IRIS (soit la quasi intégralité des communes de la zone pilote), l'intégralité de la population est localisée sur la zone bâtie.

⁵ <http://www.recensement.insee.fr/basesInfracommunales.action>

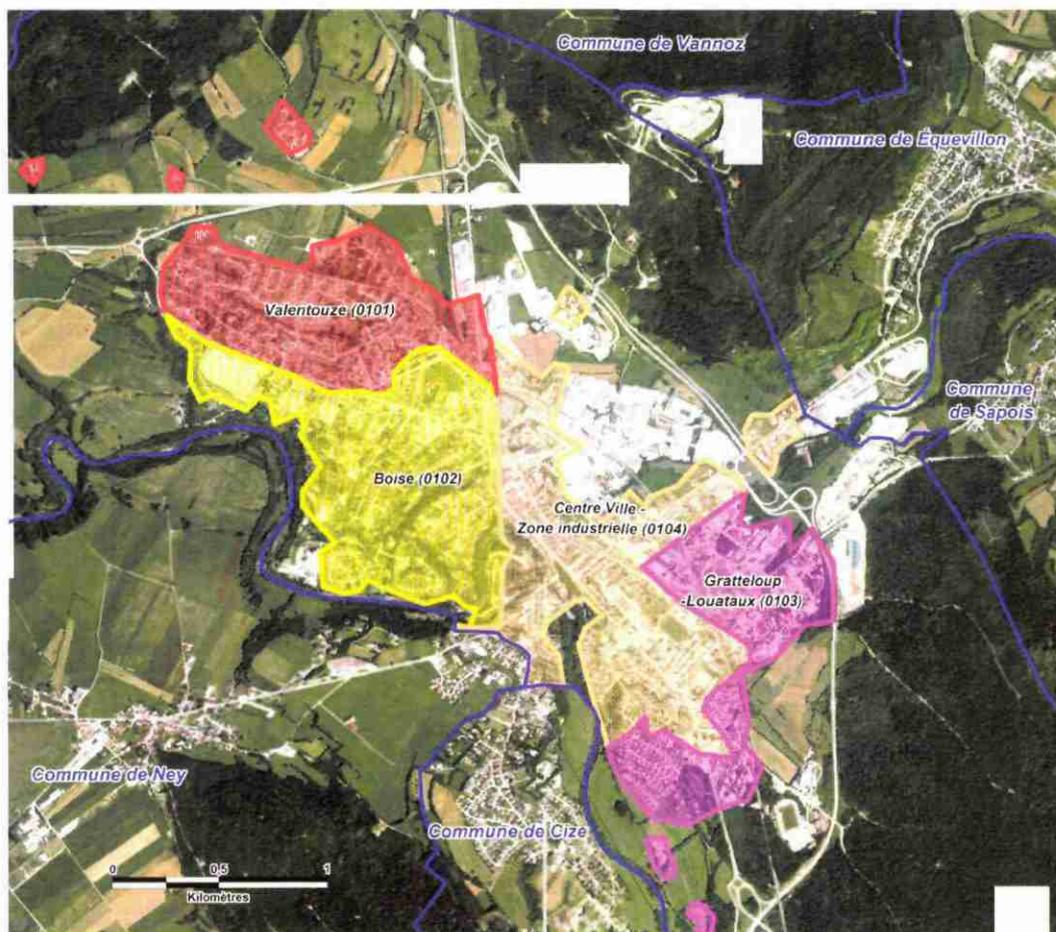


Illustration 51 : Exemple de découpage infra-communale dans la commune de Champagnole.
Source photo aériennes : Google Earth.

8.3. VULNERABILITÉ DES ENJEUX : LOI BINAIRE D'EXPOSITION

Dans le domaine des cavités souterraines, le nombre de retours d'expérience sur la nature des dommages selon les caractéristiques des désordres qui les affectent (hors affaissement minier) est loin de suffire à l'établissement d'une relation d'endommagement, caractéristique de la vulnérabilité des enjeux. Outre ce manque d'information sur les dommages, l'intensité du phénomène naturel redouté (effondrement) est difficilement accessible puisque les caractéristiques des cavités à l'origine du phénomène sont rarement disponibles.

Par manque de références, de données et de retours d'expérience, une approche binaire est donc adoptée pour l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux : soit l'enjeu est indemne soit il est détruit totalement, ce qui revient à mesurer si l'enjeu est exposé ou non à un aléa (soit la personne est exposée totalement, soit elle ne l'est pas). Cette définition se cale plus précisément à un enjeu de type population qu'à du bâti, susceptible de se dégrader partiellement.

On parle alors **d'exposition au risque (plutôt que de risque)**, démarche généralement utilisée pour les cavités souterraines, pour lesquels les dommages sont rarement détaillés notamment parce que l'intensité de la sollicitation d'entrée est difficilement accessible.

Comme l'indique l'illustration 52, on obtient l'exposition au risque en croisant l'indice de susceptibilité avec le nombre d'enjeu et ce, en tout point du territoire. Cette valeur permet d'estimer « le nombre d'individus exposé à un niveau de susceptibilité ».

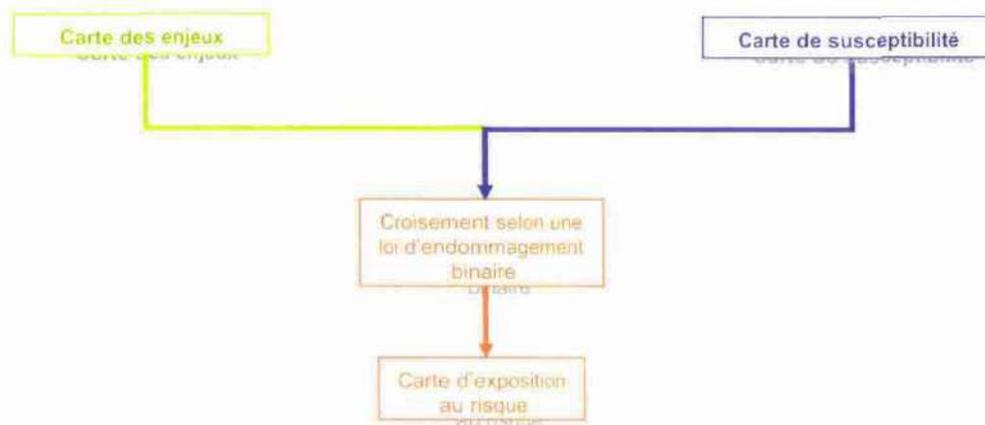


Illustration 52 : Principe d'évaluation de l'exposition au risque.

9. Résultats en termes d'exposition au risque

9.1. REPRÉSENTATION DE L'EXPOSITION AU RISQUE SUR LA ZONE PILOTE

Deux éclairages sont donnés aux décideurs :

- **la connaissance du phénomène naturel** (la possibilité d'apparition de désordres liés aux cavités naturelles), donnée par :
 - plusieurs cartes de susceptibilité, permettant de quantifier le niveau de susceptibilité en tout point du territoire,
 - une base de données des cavités et désordres associés ;
- **l'exposition au risque** qui permet de confronter l'aléa aux enjeux concernés.

Ces informations quantitatives sont couplées à une valeur de qualité du diagnostic, qui mesure le risque pris par l'expert dans son analyse et permet de rester prudent dans le diagnostic affiché. Ces informations sont traduites en classement permettant de situer les communes les unes par rapport aux autres en termes d'exposition au risque et de susceptibilité maximale, tout en intégrant l'incertitude sur le diagnostic.

9.1.1. Résultats en termes de susceptibilité globale

Afin de donner des éclairages différents, le niveau de « susceptibilité d'apparition de désordres liés à des cavités naturelles » est présenté de 2 manières :

- le niveau de susceptibilité brut, tel qu'il a été évalué et décrit au chapitre 7 (Annexe 7) ;
- le niveau de susceptibilité représenté uniquement sur les zones bâties, où se concentrent les enjeux (Annexe 8).

Ces cartes donnent une vision globale du territoire et permettent de localiser les zones prioritaires. Le plateau de Lons-le-Saunier ressort nettement, comme le plus susceptible à l'apparition de désordres liés aux cavités naturelles.

L'Annexe 9 est une version simplifiée de la carte de susceptibilité, plus adaptée à la communication auprès des communes.

9.1.2. Synthèse de l'exposition de chaque communes, en termes d'emprise surfacique et de nombre d'habitants

Quantifier un niveau d'exposition en multipliant un niveau de susceptibilité et un nombre d'habitants n'a pas de signification réelle et ne permet pas de distinguer les communes peu peuplées très exposées de celles très peuplées peu exposées. Les

membres du Comité de Pilotage ont confirmé qu'en termes de hiérarchisation, l'accent doit prioritairement être mis sur la susceptibilité (plutôt que l'enjeu).

Ainsi, en complément des cartes de susceptibilité obtenues, un tableau récapitulatif a été conçu de manière à ce que chaque commune puisse se situer en termes d'exposition au risque, à l'aide d'information quantitative. Chaque commune peut ainsi connaître :

- la proportion de sa surface concernée par chaque niveau de susceptibilité ;
- le nombre d'habitants exposé à chaque classe de susceptibilité (nombre d'habitants total au prorata de la surface exposée à chaque niveau de susceptibilité).

Ces informations sont présentées sous forme de tableau en Annexe 10. Un aperçu est donné en Illustration 53 ci-dessous.

	Surface (km ²)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité					Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4,1	87%	1%	5%	3%	4%	60	55	0	0	5	0
Abergement-le-Petit	1,6	92%	6%	2%	0%	0%	40	28	7	5	0	0
Abergement-lès-Thésy	4,6	0%	0%	5%	15%	80%	60	0	0	0	13	47
Aiglepierre	7,1	13%	11%	48%	25%	3%	405	4	25	179	197	0
Andelot-en-Montagne	12,7	0%	6%	21%	27%	46%	544	0	0	48	156	340
Arbois	45,5	41%	4%	3%	4%	48%	3487	3181	49	78	120	59
Ardon	5,1	6%	3%	23%	68%	0%	118	15	11	50	37	4
Aresches	4,8	3%	0%	0%	2%	95%	44	0	0	0	0	44

Illustration 53 : Extrait du tableau de l'Annexe 10, synthétisant l'exposition de chaque commune.

Ceci est un moyen de mesurer l'exposition au risque de chaque commune, en s'affranchissant de poser une hypothèse sur une loi d'endommagement. De plus, les grandeurs obtenues ont une signification réelle (nombre d'habitants / surface), facilement utilisable comme critère de choix pour le décideur, contrairement aux grandeurs de risque classiquement issus du croisement d'une note de susceptibilité et d'une valeur d'enjeux.

Ce principe de représentation de l'information communale permet de rendre compte de variation géographique à l'intérieur d'une même commune. En effet, une même zone bâtie, suffisamment étendue, peut être concernée par des niveaux de susceptibilité et donc des niveaux d'exposition très différents (cf. exemple de Morbier et Belefontaine en Illustration 54). Ces découpages correspondent à des niveaux de susceptibilité différents puisque le nombre d'habitants est réparti d'une manière uniforme sur chaque commune (sauf Champagnole). Après ce découpage lié à une variation de susceptibilité, sur chaque entité, le nombre d'habitants est rapporté à la surface bâtie.

Il reste important de distinguer l'emprise surfacique exposée et le nombre d'habitants. En effet, les habitants ne sont concernés que par le niveau de susceptibilité des zones bâties alors que la commune peut être concernée par d'autres niveaux de susceptibilité ailleurs sur son territoire, en dehors des zones bâties actuelles. Rien n'empêche que des secteurs non urbanisés actuellement, puissent le devenir.

En dehors des zones bâties, le niveau d'exposition est nul puisque la valeur de l'enjeu est nulle, alors que le niveau de susceptibilité peut prendre toutes les valeurs. L'information sur la surface de la commune concernée par chaque niveau de susceptibilité permet de conserver cette information en dehors des zones bâties.

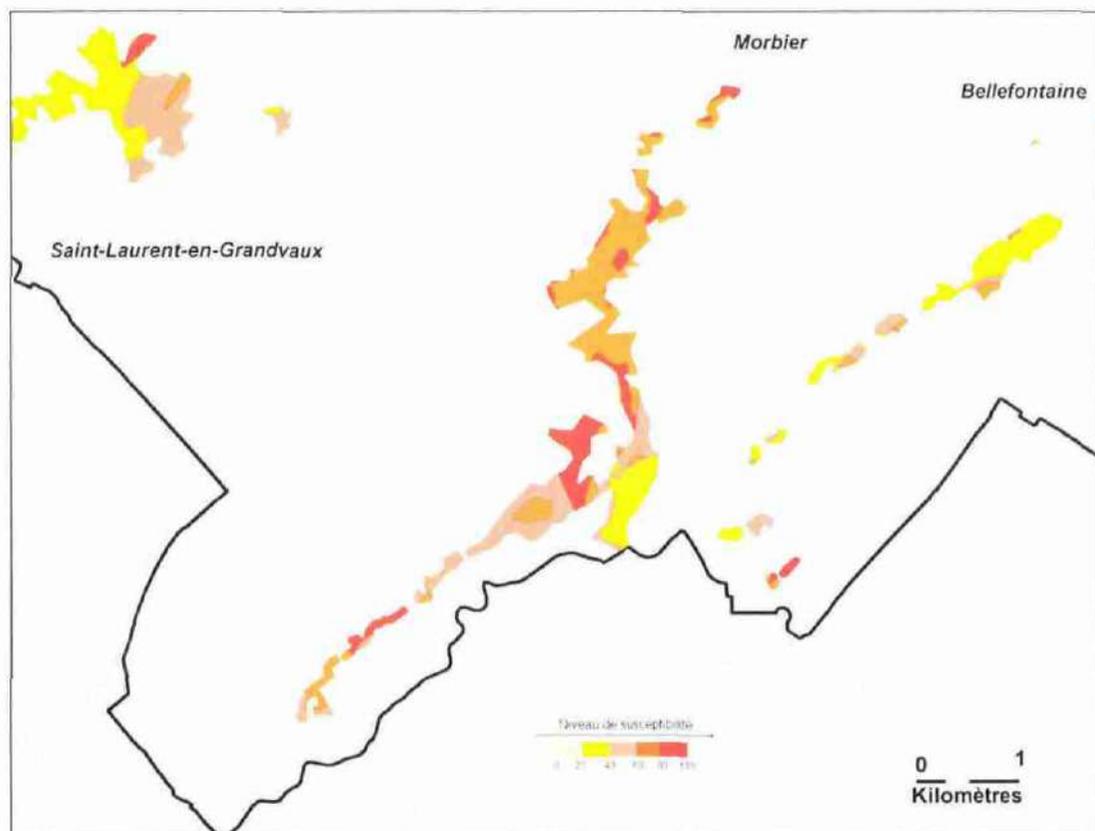


Illustration 54 : Exemple de variation du niveau de susceptibilité à l'intérieur d'une même commune

9.2. PRINCIPE DE HIÉRARCHISATION DES COMMUNES

9.2.1. Choix des deux valeurs représentatives

Le tableau précédent conserve pour chaque commune, l'ensemble des informations. Cependant, afin de pouvoir comparer les communes entre elles, il convient de choisir une (ou deux) valeurs représentatives de chaque commune.

Il s'est avéré que la distinction entre zones bâties où se concentrent les enjeux d'une part et emprise de la commune d'autre part, est particulièrement importante à conserver puisque les niveaux de susceptibilité peuvent y être différents, vu l'étendue d'une commune par rapport à celle des zones bâties. Ainsi, après avoir testé plusieurs critères de choix, le couple : niveau de susceptibilité représentatif du bâti / niveau de susceptibilité représentatif de la commune, s'est avéré être l'information la plus pertinente pour caractériser l'exposition d'une commune.

La valeur représentative est donnée ici par le niveau de susceptibilité occupant le plus de surface, c'est-à-dire « le niveau de susceptibilité le plus fréquent ». Le « niveau de

susceptibilité maximal » a été jugé moins représentatif ; il met l'accent sur un enjeu en particulier.

En choisissant de ne considérer que des niveaux de susceptibilité, on s'affranchit de donner plus d'importance aux communes les plus peuplées (ce qui n'est pas le cas avec une quantification du risque). Cependant, pour que cette information apparaisse sans fausser la hiérarchisation, le graphique distingue par un coloris différent les communes selon leur nombre d'habitant. La classification a été choisie à partir de l'observation statistique faite sur les communes du département, et décrite au § 8.1.

Le graphique obtenu est reproduit en Annexe 11. Il permet de constituer des groupes de communes homogènes en termes de susceptibilité. Ainsi, les communes de Poligny et Arbois (en bas à droite) sont globalement concernées par un niveau de susceptibilité élevé puisque les secteurs non urbanisés s'étendent sur un plateau karstique, alors que les zones bâties de ces communes sont installées sur les reculées jurassiennes. À l'inverse, les communes de Mouchard, Gillois et La Latette (en haut à gauche) sont concernées par un niveau de susceptibilité faible globalement, mais les zones bâties sont installées sur des secteurs localement karstiques.

Les reculées sont essentiellement présentes dans la bordure ouest du massif, ce sont des vallées en U qui entaillent les plateaux calcaires. Leur mode de formation n'est pas exactement défini, plusieurs hypothèses existent. Les reculées sont, selon Nicod (1972), des vallées développées dans des conditions structurales favorables dans des couches marneuses tendres et imperméables sous-jacentes aux calcaires. Elles ne sont donc pas exposées aux phénomènes karstiques (mais peuvent être exposés à des dissolutions de lentilles de gypse contenues dans les marnes).

9.2.2. Classes de communes

Le graphique obtenu permet de constituer des groupes de communes homogènes en termes d'exposition. Une classification en 4 classes de priorité, a été proposée en Annexe 12, donnant une priorité à l'exposition des enjeux. L'illustration 55 précise son mode de construction.

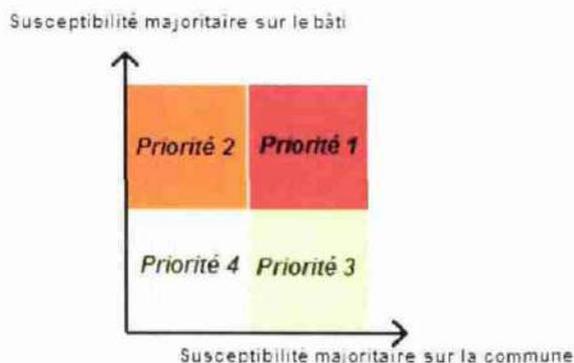


Illustration 55 : Classes de priorité proposées.

Chaque commune a ainsi été classée dans une des quatre classes de priorité. Cette classification est reportée sur une carte (Annexe 13) pour avoir une vision spatialisée de cette hiérarchisation sur le territoire.

Les décideurs sont libres de proposer une autre classification, à partir du graphique en Annexe 12. A l'intérieur de ces classes, une hiérarchisation secondaire entre commune d'une même classe, peut facilement être proposée à partir du nombre d'habitants, illustré en Annexe 12 par un code couleurs.

10. Conclusion

Le sous-sol du département du Jura se caractérise par l'existence de très nombreuses cavités d'origine naturelle. Certaines d'entre elles sont instables, conduisant à l'existence de nombreux affaissements voire effondrements. À l'heure actuelle, cet aléa géologique et le risque lié à celui-ci ne sont pas cartographiés à l'échelle départementale dans le Jura. Pour répondre à des exigences de planification et de gestion des risques et notamment pour hiérarchiser d'éventuelles prescriptions de Plans de Prévention des Risques liés aux cavités naturelles, les services de l'État souhaitent bénéficier d'un outil d'aide à la décision.

Pour répondre à cet objectif, une convention a été signée entre la Préfecture 39 et le BRGM, le 22 janvier 2010. Dans une première phase d'une durée de 12 mois, une méthodologie est initiée et appliquée sur une zone pilote de 181 communes, puis sera étendue à l'ensemble du département dans une seconde phase.

La méthode utilisée a permis d'aboutir à une hiérarchisation quantitative des niveaux de susceptibilité et d'exposition au risque sur le territoire étudié, couplée à une indication sur la qualité du diagnostic. Le niveau de susceptibilité est quantifié grâce à l'utilisation d'outils spécifiques, adaptés à l'échelle départementale, qui limitent les biais généralement associés à l'expertise (subjectivité de la pondération, effet de seuil, « boîte noire », non exhaustivité de l'inventaire...). Le principe est de systématiquement confirmer les interprétations et les choix d'expert en les confrontant aux événements réellement observés.

L'évaluation de la susceptibilité s'est basée sur 3 critères explicatifs :

- la sensibilité à la dissolution de la formation géologique sous-jacente ;
- l'épaisseur du recouvrement au-dessus des cavités (profondeur de l'horizon karstifié) ;
- la capacité d'infiltration des eaux.

Finalement, deux éclairages sont donnés aux décideurs :

- **la connaissance du phénomène naturel** (i.e. la possibilité d'apparition de désordres liés aux cavités naturelles), donnée par :
 - plusieurs cartes de susceptibilité, construites à partir de l'analyse des données existantes et permettant de quantifier le niveau de susceptibilité en tout point du territoire, sans donner plus de poids aux endroits où l'information existe. Ces cartes sont couplées à une valeur de qualité du diagnostic, qui mesure, en chaque endroit, le risque pris par l'expert dans son analyse et permet de rester prudent dans le diagnostic affiché,
 - une base de données de cavité et désordres associés, qui restent la connaissance la plus aboutie du phénomène et auquel il convient de se reporter en parallèle. 1 240 événements géoréférencés ont ainsi été inventoriés sur la zone pilote ;

- **l'exposition au risque** qui permet de confronter l'aléa aux enjeux concernés. Cette information est donnée au moyen d'un tableau de synthèse précisant pour chaque commune, la proportion de sa surface et le nombre d'habitant concernée par chaque niveau de susceptibilité.

En termes de hiérarchisation des priorités à l'échelle du territoire, le couple niveau de susceptibilité du bâti / niveau de susceptibilité de la commune, s'est avéré être l'information la plus pertinente pour caractériser l'exposition d'une commune puisqu'elle distingue deux informations bien différentes : l'exposition des zones bâties où se concentrent les enjeux d'une part et l'exposition surfacique de la commune d'autre part. La valeur représentative est donnée ici par le niveau de susceptibilité occupant le plus de surface, c'est-à-dire « le niveau de susceptibilité le plus fréquent ».

À l'aide des résultats départementaux ainsi établis, les gestionnaires territoriaux ont les moyens de hiérarchiser les secteurs susceptibles d'être affectés par l'effondrement de cavités naturelles et ainsi décider les risques qu'ils peuvent accepter ou doivent réduire. En effet, le résultat obtenu sous forme de graphique) permet facilement de constituer des groupes de communes homogènes en termes de susceptibilité. Dans le cadre de cette étude, une classification en 4 classes de priorité, a été proposée.

L'analyse menée à l'échelle départementale n'a pas la résolution suffisante pour pouvoir être reprise précisément à l'échelle d'une commune (et donc dans un PPR). L'identification des bassins de risques répond à des exigences de planification et de gestion des risques à l'échelle départementale et permet de hiérarchiser le lancement d'étude à l'échelle communale.

11. Bibliographie

• Cartes géologiques du BRGM au 1/50 000 sur l'ensemble du département du Jura et leurs notices

Feuille	Numéro	Auteurs de la carte et de la notice (année de publication de la carte)
Pesmes	501	M. Campy, P. Chauve, C. Pernin, A. Bambier, N. Morre-Biot (1982)
Besançon	502	M. Dreyfuss, G. Kuntz (1967)
Seurre	527	R. Fleury, G. Farjanel, J.-J. Collin (1980)
Dole	528	P. Chauve, Y. Kerrien, C. Pernin, J. Cornet, J. Féraud (1979)
Quingey	529	A. Bonte, P. Celet (1975)
Pierre-de-Bresse	554	L. Clozier, J.-J. Collin, G. Farjanel, J.-J. Puisségur et R. Fleury (1984)
Poligny	555	Y. Kerrien, J. Landry J. (1982)
Salins-les-Bains	556	A. Caire (1970)
Pontarlier	557	P. Chauve, M. Dreyfuss, S. François, L. Glangeaud, J. Tricart (1960)
Louhans	580	F. Zanon, G. Farjanel, J. Barruol (1981)
Lons-le-Saunier	581	P. Chauve, M. Campy, D. Contini, J. Martin, E. Petitjean, F. Sequeiros (1993)
Champagnole	582	S. et A. Guillaume (1965)
Mouthe	583	Tricart J., Chauve P., Guillaume S., <i>et al.</i> (1964)
Montpont-en-Bresse	603	F. Bergerat, G. Farjanel, R. Fleury, J.-J. Puisségur, J. Putallaz (1983)
Orgelet le Bourget	604	Y. Kerrien, M. Campy, M. Dreyfuss (1983)
Morez - Bois d'Amont	605	A. et S. Guillaume (1969)
Saint-Amour	626	F. Bergerat, R. Fleury, P.-C. Beauduc, G. Farjanel, A. Guiffroy, G. Latreille, J.-J. Puységur (1985)
Moirans-en-Montagne	627	J. Tricart, M. Clin, J. Perriaux (1970)
Saint-Claude	628	A. et S. Guillaume, F. Llac, M. Meurisse (1972)

Carte géologique harmonisée à l'échelle 1/50 000 du département du Jura.

• Base de données et sites internet

Coupes de forages provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), disponible sur <http://infoterre.brgm.fr>.

Base de données nationale des cavités souterraines BD-Cavités, disponible sur <http://infoterre.brgm.fr> ou <http://www.bdcavite.net>.

Base de données nationale des mouvements de terrain BD-MVT, disponible sur <http://www.infoterre.brgm.fr> ou <http://bdmvt.net>.

Photographies satellites mises à disposition en 2009 sur Google Earth (<http://earth.google.fr>)

<http://www.prim.net> : site internet du MMEDDM, sur la prévention des risques majeurs, affichant les risques naturels et technologiques ainsi que les reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle.

• Rapports et références thématiques

Aste J.P., Messin M. (1974) - Mouvements de terrain à Miery (39) - rapport n° 1 - recherche des causes et des mécanismes. Rapport BRGM 74-SGN-206-JAL.

Aste J.P., Messin M. (1976) - Mouvements de terrain à Miery (39) - rapport n° 2 - recherche des causes et des mécanismes. Rapport BRGM 76-SGN-084-JAL.

Aste J.P., Camus G., Messin M., Roignot R. (1975) - Étude d'un glissement de terrain à Salins-les-Bains (39). Rapport BRGM 75-SGN-256-JAL.

Aste J.P., Messin M., Roignot R. (1975) - Étude des sols de fondation de 2 nouveaux bâtiments L' et K' au lieu-dit « Le Sicon » à Salins-les-Bains (39). Rapport BRGM 75-SGN-257-JAL.

Aste J.P., Cornet J., Messin M., Oltra M., Valentin J. (1977) - Étude géotechnique de la ZAC de Béthoncourt (25) - 1ere phase. Rapport BRGM 77-SGN-311-JAL.

Bayle E. (2008) - Bonnevent-Velloreille (70). Avis géologique sur des phénomènes karstiques. Rapport BRGM RP-56955-FR.

Bérard P. (1997) - Mise en place d'un réseau de suivi piézométrique dans le karst jurassique du bassin de Thau. Rapport BRGM RR-39395-FR.

Bonham-Carter G. (1994) - Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. New York, Pergamon.

BRGM (1997) - Schéma départemental des carrières du département du Jura - rapport de synthèse. Rapport BRGM RR-39052-FR.

BRGM (1997) - Étude hydrogéologique des plateaux calcaires de Haute-Saône au Sud de Vesoul. Rapport BRGM RR-39761-FR.

BRGM (1998) - Inventaire pour la cartographie des risques du département du Jura - phénomènes naturels et principaux enjeux. Rapport BRGM RR-40032-FR.

- Chalumeau G.** (1982) - Diversification des sources d'alimentation en eau potable de la région de Morez – Saint-Claude - recherche de site de substitution en cas de pollutions accidentelles - rapport final. Rapport BRGM 82-SGN-774-FRC.
- Colin J.J., Dreyfuss M., Lienhardt G.** (1964) - Recherche d'un magasin aquifère en domaine karstique (Premier plateau du Jura). Rapport BRGM 64-DSGR-A-043.
- Colin J.J., Dreyfuss M., Lienhardt G.** (1965) - Connaissance de la géologie du territoire de la coupure topographique Lons 3. Rapport BRGM 65-DSGR-A-075.
- Colin J.J., Dreyfuss M., Lienhardt G.** (1973) - Premier plateau du Jura (39) - recherches hydrogéologiques expérimentales en domaine karstique. Rapport BRGM 73-SGN-314-JAL.
- Colin J.** (Fédération Française de Spéléologie) (1966) - Inventaire spéléologique de la France. Département du Jura 1. Ed. BRGM
- Cornet J.** (2002) - Caractérisation technique de 4 synthèses hydrogéologiques en projet sur la région Franche-Comté. Rapport BRGM RP-51466-FR.
- Coolbaugh M.F. and Bedell R.** (2006) - A simplification of weights of evidence using a density function and fuzzy distributions; geothermal systems, in Harris, J.R., ed., GIS for the Earth Sciences: *Geological Association of Canada Special Paper 44*, p. 115-130.
- Delarozière O.** (1968) - Contribution à l'étude du bassin du Doubs - Climatologie, hydrologie et déficit d'écoulement rapportés aux unités géologiques. Rapport BRGM 68-SGN-162-JAL.
- Donsimoni M., Berthier H., Martin J.-C., Nachbaur A.** (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. Rapport final. BRGM/RP-55711-FR. 179 p., 60 fig., 14 tabl., 5 photos, 8 ann., 1 pl. hors-texte.
- Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S.** (2004) - Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en FRC. Rapport BRGM RP-53576-FR.
- Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J.** (2008) - Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées. Rapport final. BRGM/RP-56275-FR, 167 p., 63 ill., 7 tabl., 7 ann.
- Nachbaur A., Rohmer J.** (2011) - Managing expert-information uncertainties for assessing collapse susceptibility of abandoned underground structures. Submitted.
- Galve J.P., Gutiérrez F., Remondo J., Bonachea J., Lucha P., Cendrero A.** (2009) - Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*, Volume 111, Issues 3-4, 15 October 2009, Pages 160-172.

Gudelin H. (1969) - Etude géologique du site envisagé pour l'implantation d'un pylône ORTF au Mont Rivel (Champagnole) JURA. Rapport BRGM 69-SGN-164-JAL.

Javey C. (1980) - Carte des risques liés aux phénomènes géologiques de la région de Saint-Claude (39). Rapport BRGM 80-SGN-854-FRC.

Javey C. (1981) - Carte des risques liés aux phénomènes géologiques de la région de Morez (39). Rapport BRGM 81-SGN-329-FRC.

Javey C. (1984) - Plan d'occupation des sols de Montperreux (25) - Évaluation des risques géologiques au droit des zones d'urbanisation. Rapport BRGM 84-AGI-309-FRC.

Javey C. (1986) - Projet de stockage de déchets inertes dans la carrière des Andiers à Chalezeule (25) - Étude de faisabilité. Rapport BRGM 86-SGN-279-FRC.

Javey C. (1986) - Analyse des données géologiques et hydrogéologiques relatives aux dépôts d'hydrocarbures du service des essences des armées - dépôt de Valdahon (25). Rapport BRGM 86-SGN-518-FRC.

Javey C. (1988) - Étude des risques de pollution des eaux souterraines par la carrière Di Lena à Crancot (39). Rapport BRGM 88-SGN-767-FRC.

Javey C. (1990) - Projet d'extension du lycée J. Haag de Besançon (25) - reconnaissance géologique et géotechnique des sols de fondation. Rapport BRGM RR-31385-FR.

Javey C. (1993) - Autoroute A39 Dijon-Dole - conditions d'exploitabilité des matériaux rocheux du déblai de Foucherans. Rapport BRGM RR-36532-FR.

Jauffret D. (2004) - Diagnostic et propositions d'optimisation et d'extension du réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines en Franche-Comté. Rapport BRGM RP-53553-FR.

Legrand C., Allier D., Nachbaur A. avec la collaboration de **S. Belkacem, R. Coueffe, P. Herniot, K. Roussel, B. Tourlière** (2010) - Atlas du potentiel géothermique très basse énergie de la région Franche-Comté. Rapport final. BRGM RP-58768-FR, 279 p., 104 ill. 13 annexes.

Lamotte C., Nicolas J., Legran C., Jauffret D., Bault V., Doucet, M. Bayle E., Coëffé R., Tourlière B. (2009) - Actualisation de la synthèse hydrogéologique du bassin Rhône-Méditerranée – Régions Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes. Rapport BRGM RP-57091-FR.

Lefavrais A., Lienhardt G., Ricour J. (1953) - Rapport de fin de sondage. Rapport BRGM BRGG-A0572.

Mardhel V., Gravier A., Koch--Mathian J.Y. (2006) - Cartographie de la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie et application aux sites BASOL. International symposium Darcy 2006 - Aquifers Systems Management.

Mardhel. V. (2006) - Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. Décembre 2006. BRGM/RP-55311-FR

Margat J., Paloc H. (1966) - Catalogue régional des cavités naturelles - inventaire au 31-12-64 - Jura – Alpes. Rapport BRGM 66-DS-A-114.

Moiriat D., Longet A. (2003) - Inventaire départemental des cavités souterraines (hors mine) du Doubs (25). Rapport BRGM RP-52476-FR.

Moiriat D., Longet A. (2003) - Inventaire départemental des mouvements de terrain de la Haute-Saône. Rapport BRGM RP-52590-FR.

Musillon C. (1962) - Étude géologique de la région de Syam (Jura). Faculté des sciences de l'université de Besançon. Rapport de thèse.

Odent B.E. (2006) - Inventaire départemental des mouvements de terrain du Territoire de Belfort. Rapport BRGM RP-55278-FR.

Odent B. (2008) - Inventaire des mouvements de terrain en surface du Jura. Rapport BRGM/RP-55976-FR.

Odent B., Masson M. (2003) - Inventaire des cavités souterraines (hors mines) du Jura. Rapport BRGM/RP-52586-FR.

Ross T.J. (1995) - Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw-Hill, New York.

Schomburgk S., Jauffret D., Pointet T. (2002) - Etude des nappes aquifères au voisinage du Doubs navigable et de ses dérivations entre la limite est du département du Doubs et la confluence avec la Saône - Phase 1. Rapport BRGM RP-51463-FR.

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



Annexe 1

Cahier des charges

CAHIER DES CHARGES

Préambule

Les effondrements karstiques sont un phénomène fréquent dans le département du Jura. L'inventaire des cavités souterraines abandonnées (hors mines) recense plus de 500 cavités naturelles sur le département. L'inventaire des mouvements de terrain, réalisé l'année dernière, répertorie 157 effondrements de cavités essentiellement karstiques. Au-delà de l'objectif initial de « porter à connaissance », la valorisation de ce travail d'inventaires départementaux à des fins d'information du public et des collectivités en termes de prévention des risques liés aux cavités, est souhaitable.

Actuellement, à l'échelle d'un bassin de risque ou d'un département, il n'existe pas d'outil d'aide à la décision opérationnel en matière de « risque cavités ». Sur des territoires relativement proches, les niveaux d'aléas établis par des études distinctes, s'avèrent souvent difficilement comparables. Bien que des Plans de prévention de risque (PPR) liés à des cavités aient déjà été programmés sur le département du Jura, une mise en cohérence est nécessaire dans un souci d'homogénéisation et d'appréciation du risque à l'échelle départementale. Un outil d'aide à la décision s'avère pertinent pour répondre à des exigences de planification et de gestion des risques à l'échelle départementale pour les pouvoirs publics (Préfectures et Services déconcentrés de l'Etat).

Un secteur pilote (1/3 du département) a été identifié comme particulièrement représentatif concernant les mouvements de terrains type glissement (cf figure ci-après). En parallèle, une première phase permettrait de visualiser le niveau d'exposition au risque d'effondrement karstique sur cette même zone pilote (phase 1) et par extrapolation, d'étendre l'étude, dans une seconde phase à l'ensemble du département du Jura (phase 2).

Dans le cadre d'une convention avec le MEEDDAT, le BRGM a développé une méthodologie type « Scénarios départementaux » pour évaluer les risques liés aux effondrements de cavités souterraines abandonnées (tout type, hors mines). Ces « Scénarios cavités » sont un outil d'aide à la décision puisqu'ils contribuent à la planification de PPR liés aux cavités souterraines en hiérarchisant les secteurs prioritaires (communes, bassin de risque) ainsi qu'à l'appropriation du risque par les collectivités territoriales.

Le principe général a été établi et validé sur deux sites pilotes suffisamment hétérogènes en termes d'aléa et d'enjeux (communauté de communes d'Orléans et d'Arras). Cette application a permis de tester la cohérence et l'adaptabilité de la démarche, de mettre au point les processus et d'en tester la fiabilité. Reproductible à l'échelle nationale, la méthodologie développée s'ajuste à la problématique soulevée dans le département du Jura et peut être déployée de manière ciblée, sur les cavités naturelles.

La méthode développée se différencie de celle traditionnellement utilisée puisqu'elle aboutit à une hiérarchisation quantitative des niveaux de susceptibilités tout en gérant (i) la non exhaustivité des données connues (cavités, effondrements..), (ii) les effets de seuil habituellement induits par les jugements d'expert et (iii) la représentation de l'incertitude du diagnostic.

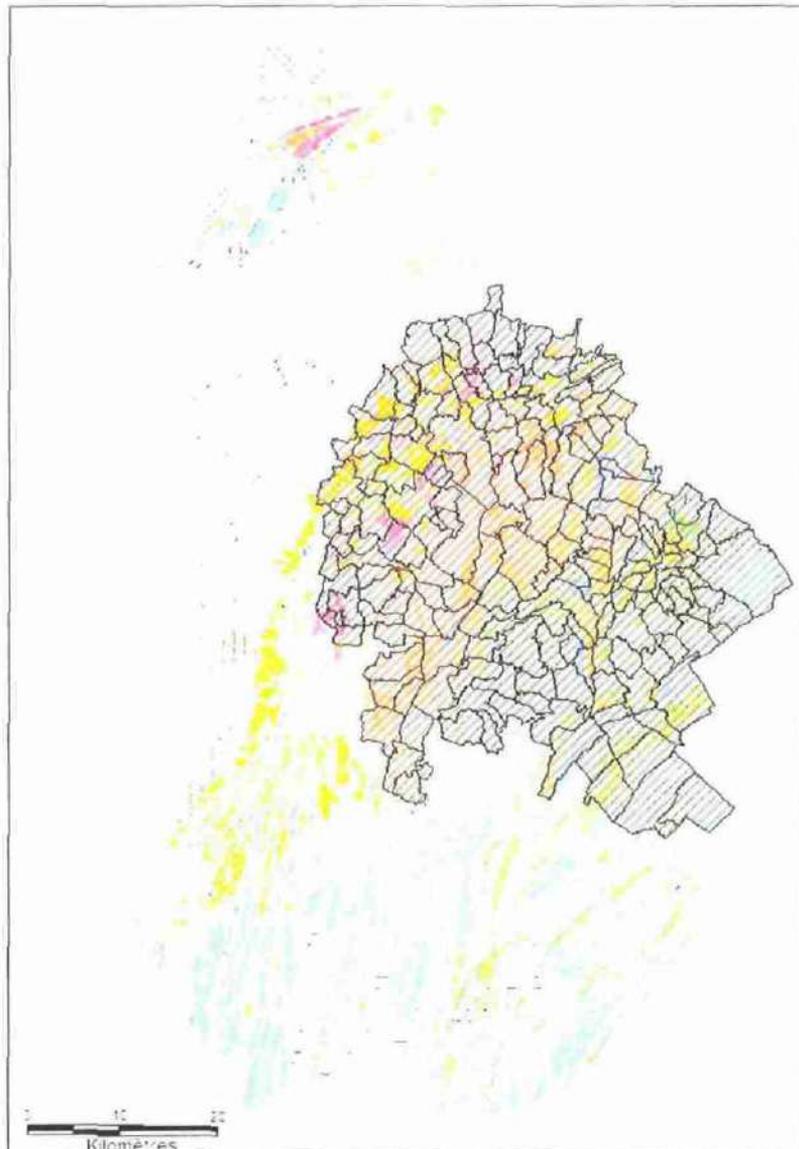


figure – Localisation sur la carte géologique du site pilote (182 communes, en fond zébrée) pour la réalisation du SDR-MVT Jura

Il s'agit donc, dans les grandes lignes, de :

- réaliser une cartographie qualitative de l'aléa : en croisant la notion de facteurs de prédisposition à la présence de cavités et de facteurs de prédisposition aux effondrements, tout en affichant des niveaux d'incertitude sur les données et leur analyse ;
- évaluer les enjeux : sur la base de données de type INSEE (étant donnée l'échelle de l'étude, on considère exclusivement la population) ;
- évaluer le risque (ou plutôt l'exposition) : de façon simplifiée, en termes de nombre de personnes exposées.

A l'aide des résultats départementaux ainsi établis, les gestionnaires territoriaux peuvent quantifier les enjeux touchés par l'effondrement de chaque type de cavités (dont les cavités naturelles) et ainsi hiérarchiser ce qu'ils sont susceptibles de subir, d'accepter ou de réduire. Les livrables proposés permettent de remonter aux sources des informations et d'avoir

accès aux arguments techniques. La multiplication des éclairages facilite ainsi l'appropriation du risque par les services de l'Etat et répond à des exigences de planification et de gestion des risques à l'échelle départementale.

Description des tâches

Pour un département donné, chaque type de cavités conduit à l'évaluation d'un « scénario d'effondrement » distinct lié à une intensité de phénomène constante. Ici, l'exercice sera mené sur la zone pilote (phase 1), puis sur le département du Jura (phase 2) pour un seul type de cavité, les cavités naturelles.

Données d'entrée et prestations fournies par le partenaire :

BD Ortho et BD Carto mises à disposition

Données INSEE-IRIS (si disponible par le partenaire). A acheter éventuellement

1 : Constitution d'un inventaire

Afin de pouvoir utiliser la méthode, il convient au préalable de disposer des inventaires des cavités souterraines et des mouvements de terrain qui leurs sont associés (Base de données nationales complétées éventuellement par d'autres sources de données). Il est impératif que l'inventaire des cavités soit suffisamment dense pour être considéré comme représentatif (sans nécessairement être exhaustif). Sur le département du Jura, nous disposons actuellement de deux inventaires nationaux fournis (526 cavités naturelles et 157 effondrements), que l'on pourra éventuellement compléter ou mettre à jour. Rappelons que cette étude se base d'abord sur les inventaires existants ; elle ne consiste pas à les compléter de manière systématique.

2 : Evaluation quantitative de l'aléa

La méthode s'appuie d'une part sur l'inventaire de données précédemment constitué (BD Cavités et autres bases de données) et d'autre part sur une liste de critères explicatifs pertinents identifiés par des experts locaux. A partir de cela, la méthode « superpose » ces deux types d'information de manière à gérer (i) la non-exhaustivité des données de l'inventaire, (ii) les effets de seuils induit par les jugements d'expert, (iii) la représentation de l'incertitude. L'idée est de traiter individuellement chaque critère, différemment selon qu'il soit de nature qualitative ou quantitative.

2.a. Identification de critères théoriques associés à des données exploitables

La méthode « Scénario Cavités » ne fixe pas de critères préétablis (facteurs de prédispositions ou critères explicatifs) mais un principe d'évaluation de la susceptibilité, une fois que les critères les plus pertinents ont été identifiés.

La mise en œuvre de la méthode repose donc essentiellement sur l'identification de critères théoriques, complémentaires, discriminants et associés à des données disponibles, sur l'intégralité de la zone pilote étudiée au cours de la phase 1 (ou département au cours de la phase 2). L'identification de ces critères repose donc sur le jugement des experts locaux (géologues, hydrogéologues...). Adaptés au contexte départemental du Jura et aux caractéristiques des cavités naturelles, ces critères doivent pouvoir expliquer d'une part, la présence d'une cavité naturelle et d'autre part la possibilité d'un effondrement. Le travail consistera donc notamment en :

- une analyse géologique et hydrogéologique du contexte afin d'évaluer les **facteurs de présence de cavités naturelles** (nature des formations géologiques, épaisseur des terrains hors nappe, profondeur ou épaisseur des formations...);
- une analyse des facteurs de stabilité de ces cavités et de la typologie des mouvements de terrain connus afin d'évaluer les **facteurs de prédisposition et de déclenchement aux effondrements de cavités naturelles** (ex : topographie,

pendage de la formation karstique, nature et épaisseur de la couverture, battement de la nappe etc ...).

Pour un résultat pertinent à l'échelle de la zone pilote, l'identification de critères explicatifs nécessitera d'être menée à une échelle plus importante, pour tenir compte notamment de l'étendue du faisceau de la formation karstique. La recherche de ces facteurs, point clé des Scénarios Cavités, sera donc la même sur la zone pilote que sur le département entier.

A chaque critère ainsi défini devra être associée une donnée spatiale permettant de représenter la donnée. Dans ce cadre, on pourra être amené à réaliser des interpolations géostatistiques (par krigeage ou autre) afin de disposer des données les plus pertinentes sur le territoire étudié (isohypse des formations si la profondeur des formations karstiques s'avère être un critère pertinent, par exemple...). Dans la mesure du possible, la création de ces supports sera effectuée dès la phase 1 sur l'étendue du département, pour respecter l'homogénéité des rendus attendus.

La précision des résultats finaux dépendra essentiellement de la pertinence des critères identifiés ici et de la précision des supports cartographiques associés.

2.b. Evaluation d'une note de susceptibilité globale et cartographie

La carte de susceptibilité globale sur le territoire étudié sera issue du croisement d'une carte de susceptibilité de présence de cavités naturelles et d'une carte de susceptibilité d'effondrement. Chacune de ces cartes sera couplée à une représentation de la qualité du diagnostic ; en tout point du territoire, le lecteur pourra identifier le facteur sur lequel porte la majorité de l'incertitude du diagnostic de l'expert.

Deux outils ont donc été développés pour évaluer des notes de susceptibilité à partir des critères théoriques identifiés (cf. tâche 2.a.) : la fonction de densité (pour traiter les critères de nature qualitative) et la fonction de possibilité (pour traiter ceux de nature quantitative). Pour chaque critère, l'une ou l'autre de ces fonctions sera utilisée afin d'évaluer une note de susceptibilité. Ces notes sont attribuées à tous les éléments d'une grille de calcul (à maille adaptable à la précision des données d'entrées, de l'ordre kilométrique) :

- à partir des critères explicatifs de la présence de cavités naturelles, une carte de susceptibilité de présence sera établie à l'aide d'une discrétisation par maille de la zone pilote (puis du département) ;
- à l'aide des critères explicatifs de l'effondrement de ces cavités naturelles, une carte de susceptibilité d'effondrement sera établie à l'aide d'une autre discrétisation par maille de la zone pilote (puis du département) ;
- la carte de susceptibilité finale est issue du croisement de ces deux cartes, à l'aide de l'intersection des deux discrétisations précédentes.

Finalement, les cartes de susceptibilité proposées seront à double lecture et représenteront :

- un niveau de susceptibilité (nul à très faible, faible, moyen, fort) symbolisé par une couleur
- un niveau de représentativité de l'information (mauvais, moyen, bon) symbolisé par une trame ;

Comme la note a été évaluée de manière quantitative, les bornes des classes sont ajustables. Les cartes intermédiaires, de susceptibilité de présence de cavité et d'effondrement de cavité, restent des outils d'aide à la décision disponibles pour le décideur.

3 : Identification des enjeux et de leurs valeurs

Il est considéré que les enjeux se localisent sur les zones bâties du territoire, repérées à partir de la BD Carto et Ortho. A l'échelle départementale, il n'est pas raisonnable de tenir compte des critères du développement durable (facteurs économique, social et

environnemental) ou même d'évaluer le coût des structures exposées et l'importance des fonctions exposées. Les enjeux seront harmonisés sur une grille à maille kilométrique (de l'ordre de grandeur d'un village), pour rester pertinent mais réaliste à l'échelle départemental et au regard des aléas discrétisés sur des mailles de plusieurs kilomètres. Dans chaque maille, la valeur de l'enjeu sera précisée en nombre d'habitants. Ces chiffres seront issus des données INSEE-IRIS (à acheter éventuellement), qui concernent l'échelle du quartier (ilots IRIS).

A réaliser manuellement sur le territoire, cette discrétisation des enjeux dépend directement de la taille des secteurs étudiés (plus particulièrement de l'étendue des zones bâties). Le travail effectué sur la zone pilote (182 communes environ) devra donc être poursuivi à l'échelle du département (544 communes au total).

4 : Evaluation du risque

Etant donnée l'échelle de l'étude et la nature du phénomène étudiée, le risque est quantifié en termes d'exposition selon le principe d'une loi d'endommagement binaire : soit la personne est exposée totalement, soit elle ne l'est pas. L'évaluation de l'exposition permet donc d'estimer le nombre d'individus exposés à un niveau d'aléa.

Etant donnée l'échelle de l'étude, il n'est donc pas envisageable de donner des résultats à l'échelle communale. Etant donnée l'hétérogénéité des communes (nombre d'habitants), une hiérarchisation communale n'aurait pas de sens à l'échelle départementale. Les résultats et comparaisons inter-communales ne sont donnés que par types de communes homogènes : rurales, semi-urbaines et urbaines.

La vision globale de l'exposition au risque d'effondrement sera donnée par une carte de synthèse à l'échelle de la zone pilote (ou du département), dressée à l'aide de mailles kilométriques. L'utilisation de trois échelles de couleurs permet de distinguer le niveau d'exposition par catégorie de communes (rurale, semi-urbaine, urbaine). Pour chacune de ces catégories s'ajoute un « graphique » permettant de situer les communes les unes par rapport aux autres en termes d'exposition au risque et de susceptibilité maximale tout en intégrant l'incertitude du diagnostic. L'interprétation de ce « graphique » en termes de classes de priorité, sera laissée à l'appréciation des décideurs. En effet, selon les politiques locales, il pourra être privilégié l'urgence (accent mis sur l'aléa) ou la gestion du long terme (accent mis sur les enjeux).

A réaliser manuellement, cette hiérarchisation communale dépend donc directement du nombre de communes étudiées. Le travail effectué sur la zone pilote (182 communes environ) devra donc être poursuivi à l'échelle du département (544 communes au total).

5 : Rédaction d'un rapport de synthèse

Les données nécessaires à la compréhension des résultats obtenus feront l'objet d'un rapport. Il explicitera notamment les critères théoriques identifiés pour évaluer la susceptibilité de présence de cavités naturelles et d'effondrement, spécifiques au contexte jurassien.

Le programme d'étude de la phase 1 est envisagé sur 12 mois. Celui de la phase 2 sur 9 mois. Cette durée est conditionnée par la mise à disposition par le Partenaire, des données d'enjeux, avant la fin du 6^{ème} mois.

Chronogramme pour l'année en cours :

Principales étapes	année n-1		année de l'opération												année n+1
	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Phase 1	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

1 Constitution d'un inventaire			X	X												
2a Identification de critères				X	X	X										
2b Evaluation susceptibilité							X	X	X							
3 Identification des enjeux									X	X						
4 Evaluation du risque											X	X	X			
5 Rédaction du rapport															X	

Principales étapes Phase 2	année n-1	année de l'opération												année n+1		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		J	
1 Constitution d'un inventaire																
2a identification de critères																
2b Evaluation susceptibilité		X	X	X												
3 Identification des enjeux			X	X	X	X										
4 Evaluation du risque						X	X	X	X							
5 Rédaction du rapport										X						

La méthodologie nationale « Scénario Cavités » a été validée par le MEEDDAT, fin 2008.

Tâches :

1 : Constitution d'un inventaire exhaustif

2 : Evaluation quantitative de l'aléa

2a : Identification de critères théoriques associés à des données exploitables

2b : Evaluation et cartographie de la susceptibilité globale

3 : Identification des enjeux et de leurs valeurs

4 : Evaluation du risque

5 : Rédaction d'un rapport de synthèse

Les tâches communes de la phase 1 et 2 sont : l'identification des critères théoriques (tâche 2a) à partir de l'inventaire des données existantes (tâche 1).

Annexe 2

Illustrations extraites de la bibliographie

Echelle stratigraphique	Echantillons	Espèce	Figure	Description	Caractéristiques techniques
Bathonien	Supérieur	6 ^m		"Marnes supérieures". Calcaire pisolithique.	<div style="border: 2px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px; display: inline-block;">Altération karstique généralisée</div>
		8 ^m		Calcaire à oolites juxtaposées.	
		11 ^m		Calcaire gréseux beige.	
	Inférieur	37 ^m		Calcaire oolithique, à oolites souvent développées autour de débris ou d'entrouques.	<input type="checkbox"/>
		4 ^m		Marne calcaire bleue, schistoïde. Calcaire très fossilifère.	* Niveau de sources
		10 ^m		Calcaire grossier à zones récifales.	<div style="border: 2px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px; display: inline-block;">Altération karstique quasi générale</div>
		5 ^m		Calcaire grossier à débris de coquilles	
		20 ^m		Calcaire gris, compact, dur en petits bancs jointifs.	<input type="checkbox"/>
		20 ^m		Calcaire grossier en bancs ondulés, à nombreux silix, interbancs argileux au sommet.	* Pertes totales d'injection de grout.
		60 ^m		Calcaire grenu, gris sale, rogneux marneux en gros bancs.	<input type="checkbox"/>
15# 1.2		passe progressivement à : Calcaire à entroques, bistre, en bancs épais. Calcaire à entroques et oolites rares	<input type="checkbox"/>		
Dogonien	5 ^m		Marno-calcaire gréseux gris.	* Niveau de sources et de résurgences très importantes.	
	5 ^m		Marne à oolites ferrugineuses.		
	3 ^m		Calcaire marneux noir.		
	11 ^m		Marne-calcaire à entroques.		

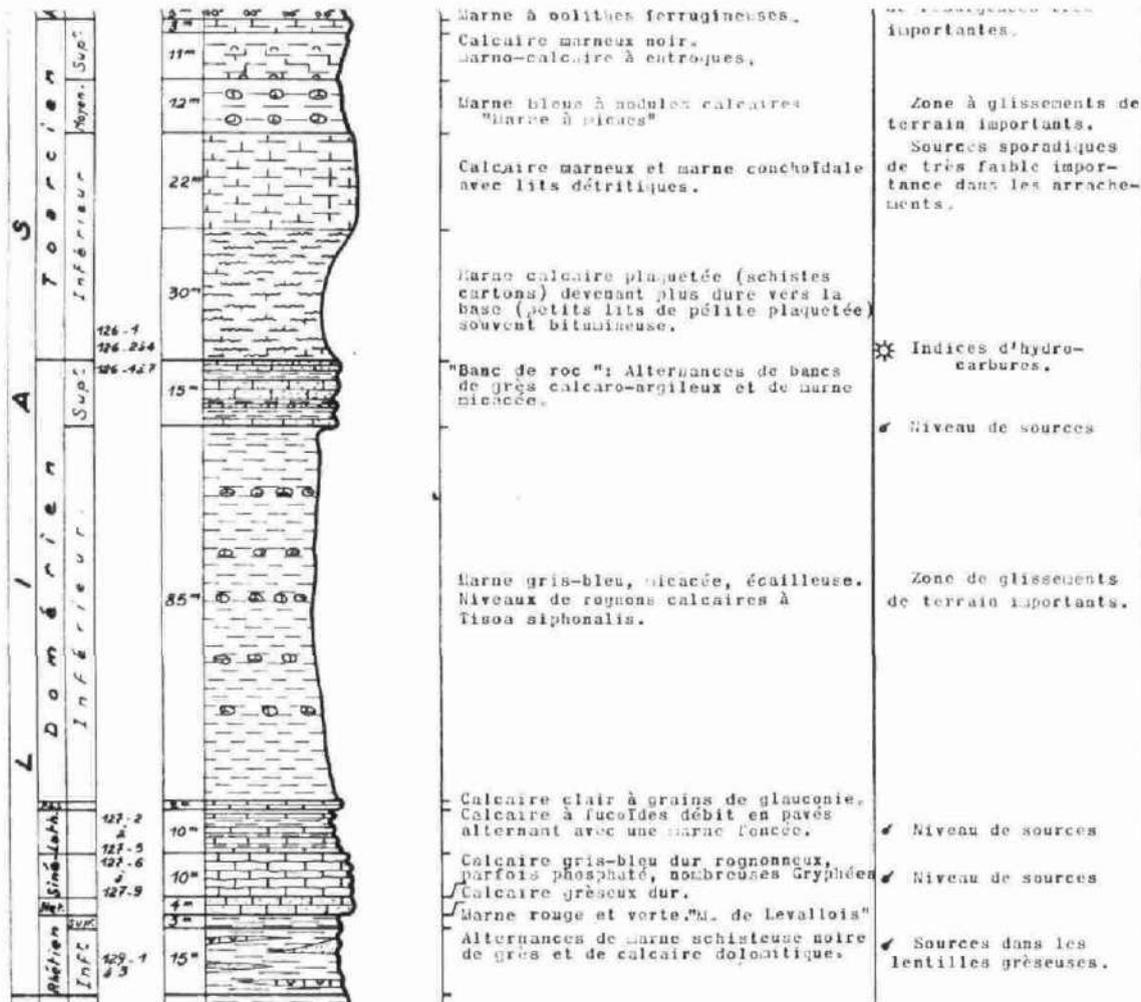


Illustration 56 : Coupe géologique synthétique des terrains secondaires de la coupure Lons 3 - extrait du rapport BRGM 65-DSGR-A-075, Colin (1965) – figure tronquée au Jurassique inférieur et moyen.

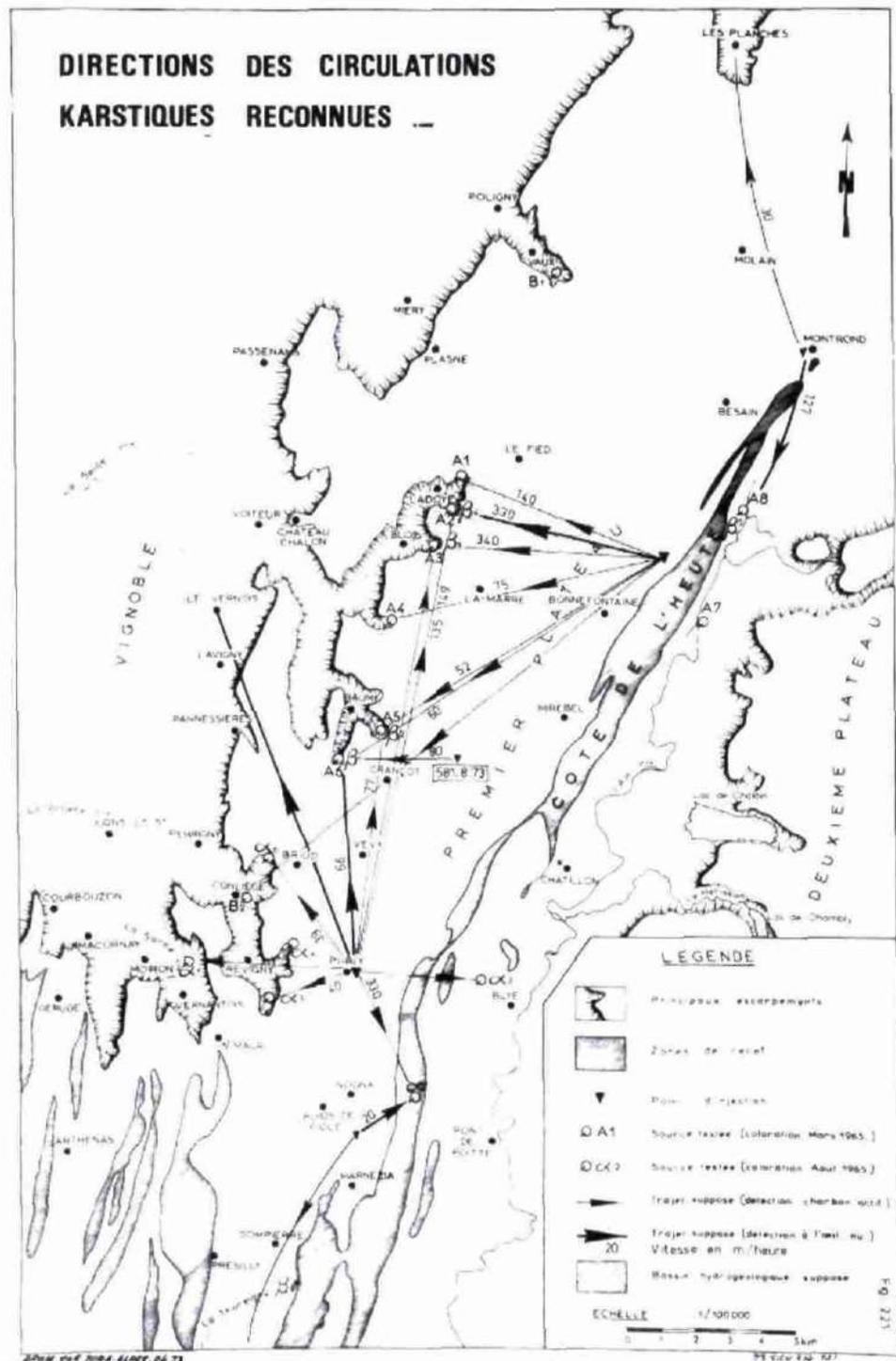


Illustration 57 : Directions des circulations karstiques reconnues - Premier Plateau du Jura - Colin (1973).

Annexe 3

Répartition géologique des phénomènes liés aux cavités souterraines

Secteur	Stratigraphie	Notation	Nb de phénomènes recensés						Surface (km ²) d'affleurement	Densité de cavité par km ²
			Total	Cavité	Gouffre	Désordre	Perte	source		
2	Argile	Arg	1	1	0	0	0	0	12,95	0,077
2	Alluvions	Fz	1	0	0	1	0	0	25,35	0,000
2	Bathonien	j3	8	7	0	1	0	0	2,36	2,960
2	Bajocien	j2	14	7	7	0	0	0	7,50	0,933
2	Pliensbachien	i3	2	0	0	2	0	0	13,00	0,000
2	Jurassique inférieur	i	6	4	2	0	0	0	4,74	0,844
3	Colluvions	Col	1	0	1	0	0	0	1,29	0,000
3	Alluvions	Fz	1	1	0	0	0	0	43,35	0,023
3	Bathonien	j3	1	1	0	0	0	0	0,37	2,721
3	Bajocien	j2	10	4	6	0	0	0	3,05	1,310
3	Pliensbachien	i3	6	1	1	4	0	0	5,11	0,196
3	Hettangien/Sinemurien	i1-2	2	0	0	2	0	0	10,28	0,000
4	Alluvions	Fz	4	0	3	0	0	1	7,94	0,000
4	Formations glaciaires	G	1	0	0	0	0	1	0,01	0,000
4	Miocène	m	5	3	1	0	1	0	3,76	0,799
4	Kimméridgien supérieur	j6b	2	2	0	0	0	0	9,74	0,205
4	Kimméridgien	j6	10	7	1	0	1	1	12,86	0,544
4	Oxfordien supérieur	j5c	6	2	4	0	0	0	9,21	0,217
4	Callovien-Oxfordien	j4-5	1	0	0	0	0	1	1,42	0,000
4	Bathonien	j3	17	12	4	0	1	0	7,33	1,638
4	Bajocien	j2	13	6	5	2	0	0	24,91	0,241
4	Aalénien-Bajocien	j1-2	8	5	3	0	0	0	9,81	0,509
4	Toarcien/Aalénien	i4-j1	4	3	1	0	0	0	8,59	0,349
4	Pliensbachien	i3	1	0	0	1	0	0	7,25	0,000
4	Trias supérieur	t6c-t7	5	3	2	0	0	0	6,13	0,490
4	Trias supérieur	t6-7	8	0	0	8	0	0	2,50	0,000
5	Eboulis	E	5	4	1	0	0	0	1,25	3,202
5	Argile	Arg	3	0	3	0	0	0	4,05	0,000
5	Alluvions	Fz	28	11	13	1	3	0	11,37	0,968
5	Tufs	Tufs	2	2	0	0	0	0	0,30	6,608
5	Formations glaciaires	G	7	1	2	3	0	1	3,67	0,272
5	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	9	7	2	0	0	0	1,60	4,381
5	Oxfordien supérieur	j5c	2	1	1	0	0	0	5,23	0,191
5	Oxfordien moyen	j5b	3	2	1	0	0	0	3,54	0,565
5	Oxfordien inférieur	j5a	4	0	3	0	1	0	2,46	0,000
5	Callovien-Oxfordien	j4-5	13	5	4	1	3	0	3,02	1,658
5	Callovien	j4	2	0	1	0	1	0	0,70	0,000
5	Bathonien-Callovien	j3-4	19	10	9	0	0	0	2,54	3,942
5	Bathonien	j3	319	41	256	20	0	2	57,17	0,717
5	Bajocien / Bathonien	j2-3	42	6	35	1	0	0	18,09	0,332
5	Bajocien	j2	230	94	81	50	3	2	184,33	0,510
5	Aalénien-Bajocien	j1-2	17	5	3	3	3	3	28,88	0,173
5	Toarcien	i4	2	0	2	0	0	0	6,05	0,000
5	Jurassique inférieur	i	3	1	0	2	0	0	2,78	0,360
5	Trias / Jur. inf.	it	1	0	1	0	0	0	0,91	0,000
06_A	Eboulis	E	3	1	0	0	0	2	5,19	0,193
06_A	Alluvions	Fz	9	6	1	2	0	0	63,71	0,094
06_A	Formations glaciaires	G	12	3	2	6	0	1	85,67	0,035
06_A	Tithonien	j7	1	0	1	0	0	0	4,14	0,000
06_A	Kimméridgien supérieur	j6b	26	11	14	0	1	0	29,93	0,368
06_A	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	50	22	25	0	1	2	47,91	0,459
06_A	Oxfordien supérieur	j5c	12	7	3	0	0	2	14,15	0,495
06_A	Oxfordien moyen	j5b	1	1	0	0	0	0	9,44	0,106
06_A	Callovien	j4	5	2	3	0	0	0	10,44	0,192
06_A	Bathonien-Callovien	j3-4	3	1	2	0	0	0	5,98	0,167
06_A	Bathonien	j3	12	4	8	0	0	0	71,91	0,056
06_A	Bajocien / Bathonien	j2-3	3	0	3	0	0	0	12,93	0,000
06_A	Bajocien	j2	2	1	1	0	0	0	4,33	0,231

Risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura (39) – Zone pilote

Secteur	Stratigraphie	Notation	Nb de phénomènes recensés						Surface (km²) d'affleurement	Densité de cavité par km²
			Total	Cavité	Gouffre	Désordre	Perte	source		
06_B	Oxfordien supérieur	j5c	0	0	0	0	0	0	1,32	0,000
06_B	Bathonien	j3	0	0	0	0	0	0	9,64	0,000
06_B	Bajocien	j2	0	0	0	0	0	0	2,13	0,000
7	Alluvions	Fz	0	0	0	0	0	0	1,22	0,000
7	Tithonien	j7	0	0	0	0	0	0	0,31	0,000
7	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	6,43	0,000
7	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	6,40	0,000
7	Oxfordien supérieur	j5c	0	0	0	0	0	0	1,95	0,000
7	Oxfordien	j5	0	0	0	0	0	0	0,94	0,000
7	Bathonien	j3	0	0	0	0	0	0	13,09	0,000
7	Bajocien	j2	0	0	0	0	0	0	10,06	0,000
7	Aalénien-Bajocien	j1-2	0	0	0	0	0	0	0,93	0,000
08_A	Formations glaciaires	G	0	0	0	0	0	0	76,34	0,000
08_A	Barrémien	n4	0	0	0	0	0	0	6,29	0,000
08_A	Valanginien	n2	0	0	0	0	0	0	14,72	0,000
08_A	Berriasien	n1	0	0	0	0	0	0	1,92	0,000
08_A	Tithonien	j7	0	0	0	0	0	0	30,36	0,000
08_A	Kimméridgien/Tithonien	j6-7	0	0	0	0	0	0	33,73	0,000
08_A	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	8,99	0,000
08_A	Kimméridgien	j6	0	0	0	0	0	0	1,13	0,000
08_B	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	1,61	0,000
08_B	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	0,84	0,000
08_C	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	9,71	0,000
08_C	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	3,34	0,000
08_C	Oxfordien supérieur	j5c	0	0	0	0	0	0	0,82	0,000
08_C	Oxfordien moyen	j5b	0	0	0	0	0	0	0,73	0,000
08_D	Valanginien	n2	0	0	0	0	0	0	2,33	0,000
08_D	Berriasien	n1	0	0	0	0	0	0	0,37	0,000
08_D	Tithonien	j7	0	0	0	0	0	0	4,38	0,000
08_D	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	2,41	0,000
08_E	Barrémien	n4	0	0	0	0	0	0	0,84	0,000
08_E	Hauteriviens	n3	0	0	0	0	0	0	1,30	0,000
08_E	Valanginien	n2	0	0	0	0	0	0	0,84	0,000
08_E	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	5,92	0,000
08_E	Kimméridgien	j6	0	0	0	0	0	0	1,38	0,000
08_E	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	1,29	0,000
09_A	Formations glaciaires	G	0	0	0	0	0	0	9,60	0,000
09_A	Tithonien	j7	0	0	0	0	0	0	8,29	0,000
09_A	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	12,98	0,000
09_A	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	4,28	0,000
09_A	Bajocien	j2	0	0	0	0	0	0	1,46	0,000
09_B	Eboulis	E	0	0	0	0	0	0	0,72	0,000
09_B	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	2,64	0,000
10	Tourbe	T	0	0	0	0	0	0	0,83	0,000
10	Eboulis	E	0	0	0	0	0	0	2,09	0,000
10	Formations glaciaires	G	0	0	0	0	0	0	30,62	0,000
10	Hauteriviens	n3	0	0	0	0	0	0	8,16	0,000
10	Berriasien	n1	0	0	0	0	0	0	0,90	0,000
10	Tithonien	j7	0	0	0	0	0	0	14,02	0,000
10	Kimméridgien supérieur	j6b	0	0	0	0	0	0	28,38	0,000
10	Oxfordien sup. / Kimméridgien inf.	j5c-6a	0	0	0	0	0	0	23,33	0,000
10	Oxfordien moyen	j5b	0	0	0	0	0	0	5,23	0,000
10	Bathonien-Callovien	j3-4	0	0	0	0	0	0	3,16	0,000
	Totaux		0	0	0	0	0	0	305,98	

Annexe 4

Principes théoriques d'évaluation quantitative d'un niveau de susceptibilité, issus de la Méthodologie Scénario Cavité



Méthodologie Scénario Cavité

Les principes méthodologiques utilisés pour quantifier le niveau de susceptibilité, sont inspirés de la méthodologie Scénario Cavité⁶, 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 and Rohmer, 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 pallier à l'hétérogénéité de répartition des données et d'autre part, de la logique floue, pour pallier à l'imprécision et au manque de données. Ces deux outils sont particulièrement adaptés à l'échelle départementale, 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 par Bonham-Carter *et al.* (1994), la théorie des évidences dérive de la théorie probabiliste de Bayes qui exprime la modification apportée par la réalisation d'un événement B, à la probabilité de réalisation a priori de l'évènement G, noté $p(G)$. Dans ce cas, la probabilité de réalisation a posteriori de G notée $P(G|B)$, est donnée par la formule (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.

$$P(G|B) = \frac{p(B|G).p(G)}{p(B)} \quad (1)$$

avec :

⁶ Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J. (2008) - Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées. Rapport final. BRGM/RP-56275-FR, 167 p., 63 ill., 7 tabl., 7 ann.

- G : l'évènement ou phénomène géologique redouté ; « présence d'une cavité souterraine » ou « occurrence d'un désordre lié à une cavité » ;
- B : l'évidence ; dans notre cas, il s'agit de la réalisation d'un facteur explicatif.

Le « poids des évidences » W mesure alors la modification en termes de probabilité, qu'apporte la présence du facteur explicatif B à la réalisation du phénomène géologique redouté, soit la présence d'une cavité.

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

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 ⁷ unique, calée sur les événements observés (issus en pratique de l'inventaire). Dans le cas des cavités, nous définissons donc la fonction de densité D_i par l'équation (3) :

$$D_{\text{unité}} = \frac{N_{\text{unité}} / N_{\text{total}}}{S_{\text{unité}} / S_{\text{total}}} \quad (3)$$

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

$N_{\text{unité}/\text{total}}$: nombre d'évènement dans l'unité spatiale / total

$S_{\text{unité}/\text{total}}$: surface de l'unité spatiale / totale

Cette approximation n'est valable que si les événements comptabilisés occupent une surface négligeable devant celle des unités considérées (Coolbaugh *et al.*, 2004), ce qui est le cas avec les cavités et effondrements localisés et 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.

Dans notre étude, on sera amené à se servir de cette théorie pour comprendre la répartition spatiale des cavités naturelles à partir du critère lithologique : « sensibilité à la dissolution du substratum ».

⁷ Appelée « fonction de densité » dans la méthodologie « Scénarios départementaux cavités souterraines »

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 la théorie classique de logique Booléenne, on définit μ la fonction d'appartenance d'un élément x à un ensemble X , comme une fonction binaire qui prend la valeur $\mu(x)=1$ si l'élément appartient à X et $\mu(x) = 0$ sinon. Graphiquement, l' représente l'ensemble X . Sa frontière est clairement définie. Cependant face à une information entachée d'incertitude, il apparait parfois difficile de définir avec précision la localisation de cette frontière. 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 (cf. Figure 1 ci-dessous). L'élément x_2 de la Figure 1B située dans la zone "floue" entre les frontières dites « certaines », est associé à un degré d'appartenance de 0.6, alors qu'il est entièrement exclu de l'ensemble A dans la théorie classique (cf. Figure 1A).

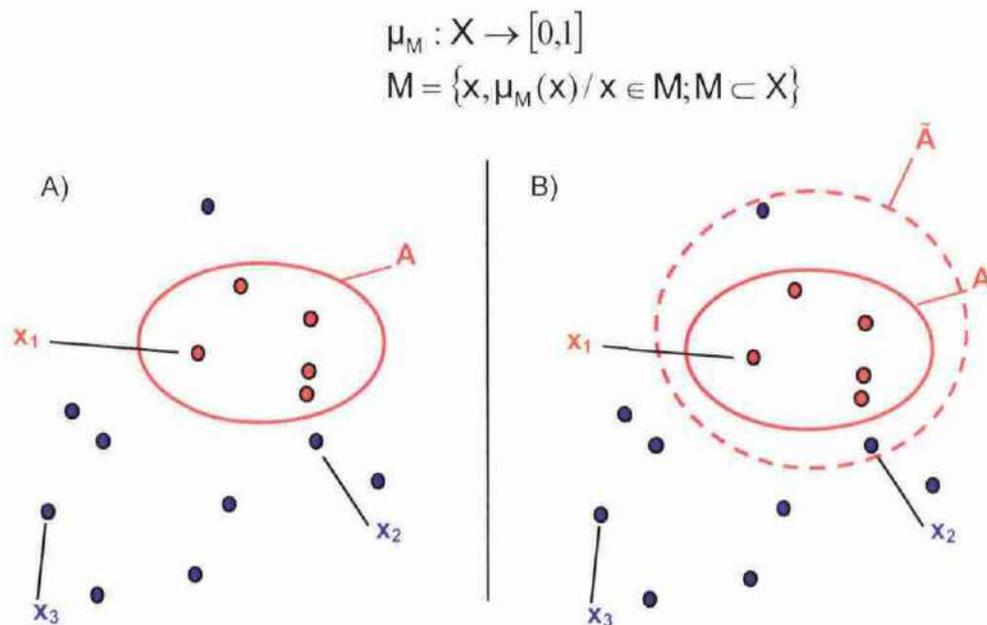


Figure 1 : Représentation graphique de la théorie des ensembles A) dans la théorie booléenne classique – B) dans la théorie des ensembles flous (Nachbaur and Rohmer, 2011).

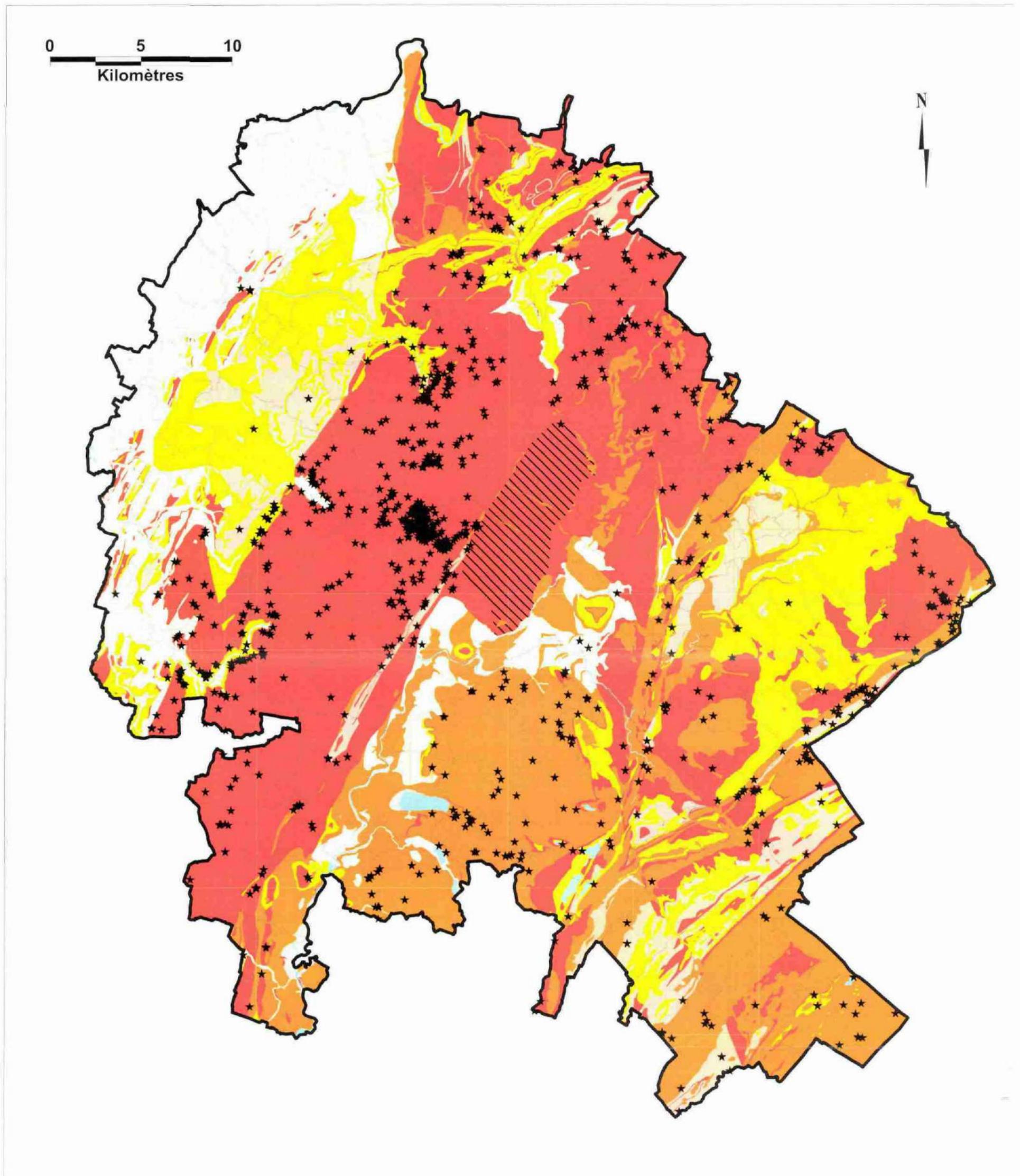
Un ensemble flou M est un sous ensemble d'une grandeur physique X (profondeur, distance...). La logique floue permet d'associer à chacune des valeurs de cet ensemble un degré d'appartenance à la réalisation de l'événement redouté (Ross, 1995).

Annexe 5

Carte de susceptibilité de présence



SUSCEPTIBILITE DE PRESENCE DE CAVITES NATURELLES (Sensibilité à la dissolution du substratum)

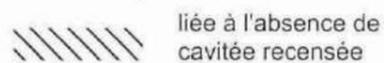


Département du JURA. Zone Pilote. Echelle 1/20000

Niveau de susceptibilité



Incertitude pouvant diminuer le niveau



★ Cavité naturelle recensée





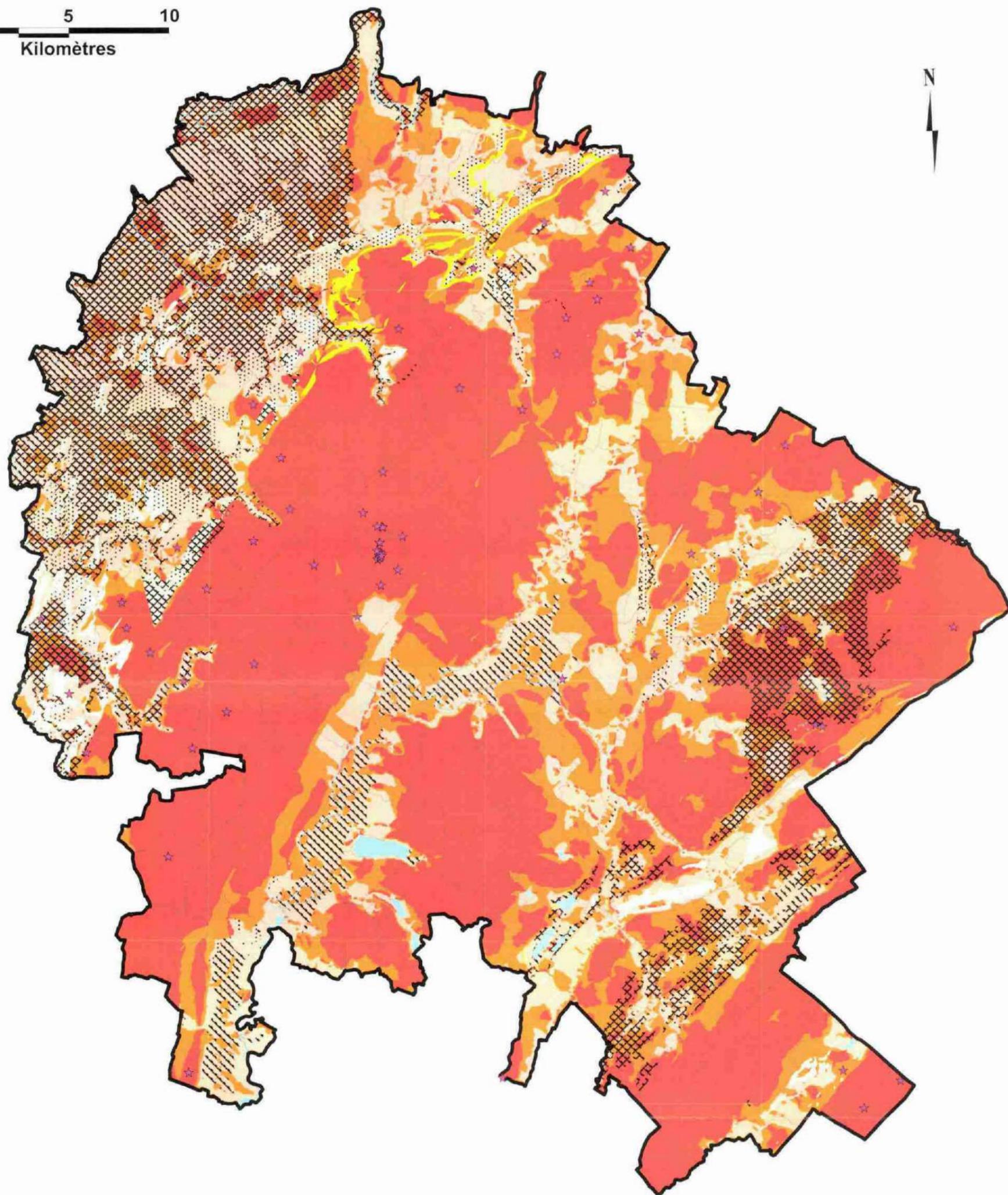
Annexe 6

Carte de susceptibilité d’effondrement



SUSCEPTIBILITE D'EFFONDREMENT DE CAVITE (Epaisseur du recouvrement et capacité d'infiltration des eaux)

0 5 10
Kilomètres



Département du JURA. Zone Pilote. Echelle 1/20000

Niveau de susceptibilité



Incertitude pouvant diminuer le niveau



liée à l'épaisseur des
terrains de recouvrement

★ Effondrement recensé





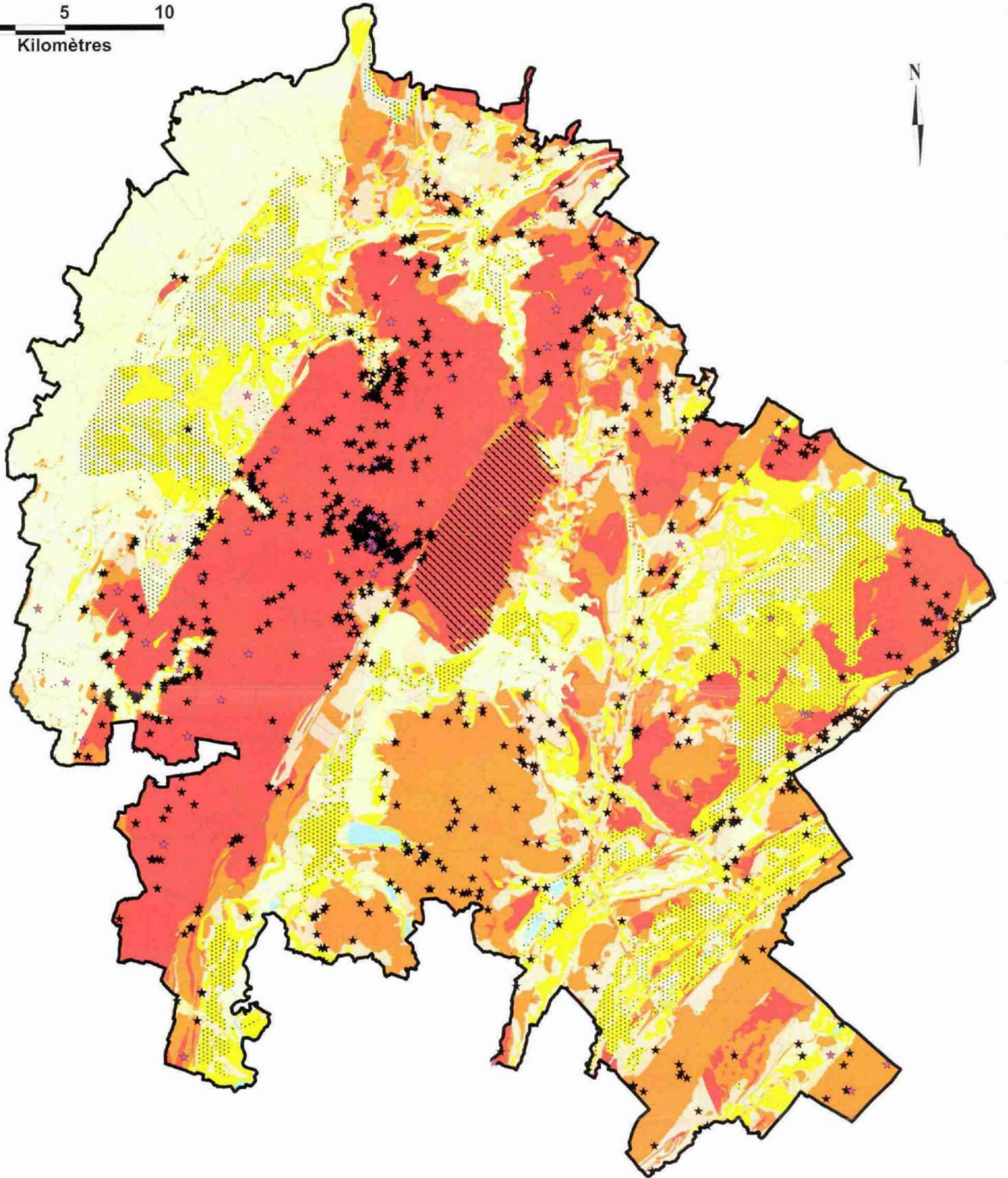
Annexe 7

Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle



SUSCEPTIBILITE D'APPARITION DE DESORDRES EN SURFACE LIES A UNE CAVITE NATURELLE

0 5 10
Kilomètres



Département du JURA. Zone Pilote. Echelle 1/20000

Niveau de susceptibilité



Incertitude pouvant diminuer le niveau

- liée à l'absence de cavité recensée
- liée à l'épaisseur des terrains de recouvrement

★ Cavité naturelle recensée

★ Effondrement recensé

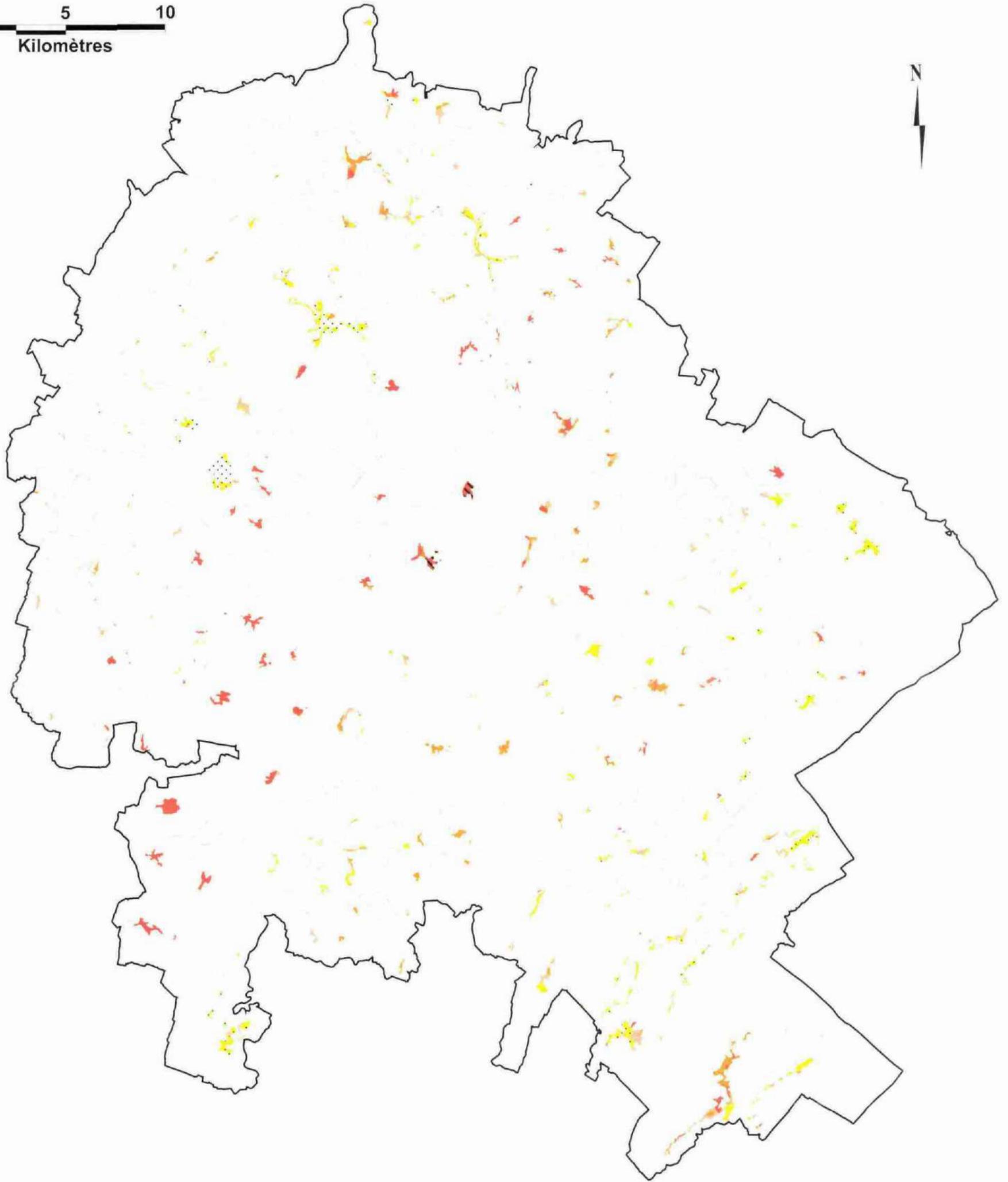


Annexe 8

Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle sur les zones bâties

SUSCEPTIBILITE DES ZONES D'ENJEUX (zones bâties)

0 5 10
Kilomètres

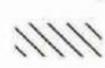


Département du JURA. Zone Pilote. Echelle 1/20000

Niveau de susceptibilité



Incertitude pouvant diminuer le niveau

-  liée à l'absence de cavité recensée
-  liée à l'épaisseur des terrains de recouvrement





Annexe 9

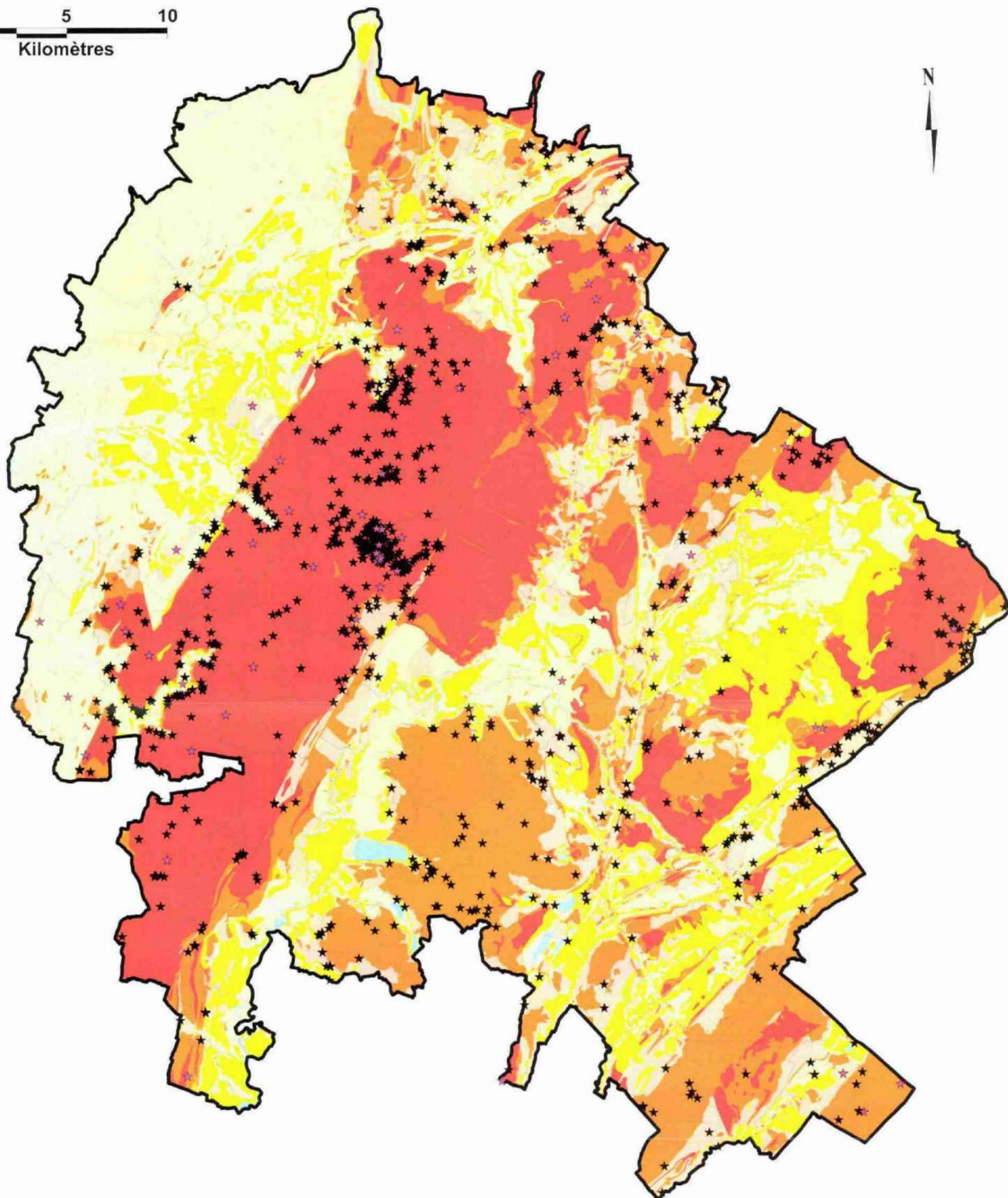
Carte de susceptibilité d'apparition de désordre lié à une cavité naturelle

(Version simplifiée)



SUSCEPTIBILITE D'APPARITION DE DESORDRES EN SURFACE LIES A UNE CAVITE NATURELLE

0 5 10
Kilomètres



Département du JURA. Zone Pilote. Echelle 1/20000

Niveau de susceptibilité



- ★ Cavité naturelle recensée
- ★ Effondrement recensé

Critères utilisés

- Sensibilité à la dissolution du substratum
- Epaisseur des formations du recouvrement
- Capacité d'infiltration des eaux



Annexe 10

Exposition de chaque commune, en termes d'emprise surfacique et de nombre d'habitants



	Surface (km2)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4,1	87%	1%	5%	3%	4%
Abergement-le-Petit	1,6	81%	17%	2%	0%	0%
Abergement-lès-Thésy	4,6	0%	0%	5%	15%	80%
Aiglepierre	7,1	13%	11%	48%	25%	3%
Andelot-en-Montagne	12,7	0%	4%	20%	28%	48%
Arbois	45,5	26%	20%	3%	4%	48%
Ardon	5,1	6%	1%	10%	27%	56%
Aresches	4,8	3%	0%	0%	2%	95%
Arsure-Arsurette	12,8	4%	39%	18%	20%	19%
Aumont	8,1	98%	0%	2%	0%	0%
Barretaine	9,1	0%	4%	0%	0%	96%
Bellefontaine	24,3	6%	18%	26%	50%	0%
Bersaillin	14,0	93%	1%	5%	1%	0%
Besain	13,0	0%	1%	18%	8%	73%
Bief-des-Maisons	5,8	41%	49%	7%	1%	2%
Bief-du-Fourg	10,2	20%	35%	13%	30%	2%
Billecul	4,3	0%	92%	3%	1%	3%
Blois-sur-Seille	5,4	24%	9%	6%	12%	49%
Blye	10,9	17%	49%	17%	17%	1%
Bonnefontaine	8,9	0%	0%	16%	8%	77%
Bourg-de-Sirod	4,4	0%	24%	43%	32%	0%
Bracon	6,4	55%	17%	10%	14%	5%
Brainans	7,0	87%	8%	5%	0%	0%
Bréry	4,9	78%	0%	17%	5%	0%
Buvilly	6,0	25%	21%	53%	1%	0%
Censeau	9,8	7%	56%	8%	6%	24%
Cernans	5,6	1%	0%	14%	26%	60%
Cerniébaud	10,4	1%	26%	7%	14%	53%
Chamblay	14,0	100%	0%	0%	0%	0%
Chamole	5,7	0%	0%	0%	3%	97%
Champagne-sur-Loue	3,8	52%	34%	14%	0%	0%
Champagnole	20,2	43%	27%	9%	15%	5%
Chapois	10,1	0%	9%	44%	14%	33%
Charcier	13,0	6%	15%	22%	57%	0%
Charency	2,8	11%	63%	24%	1%	0%
Château-Chalon	10,2	11%	2%	1%	2%	85%
Châtelneuf	13,2	5%	9%	32%	51%	3%
Châtillon	16,9	27%	10%	13%	27%	23%
Chausseuans	4,3	0%	0%	0%	0%	100%
Chaux-Champagny	7,5	10%	5%	5%	3%	77%
Chaux-des-Crotenay	11,6	8%	35%	28%	15%	15%
Chevrotaine	5,3	0%	4%	2%	89%	5%
Chilly-sur-Salins	12,0	0%	0%	0%	0%	100%

Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
	négligeable	faible	moyen	fort	très fort
60	55	0	0	5	0
40	20	15	5	0	0
60	0	0	0	13	47
405	4	25	179	197	0
544	0	0	48	156	340
3487	1857	1373	78	120	59
118	15	11	50	37	4
44	0	0	0	0	44
89	0	89	0	0	0
405	405	0	0	0	0
198	0	0	0	0	198
540	47	337	106	50	0
360	316	0	43	1	0
169	0	0	26	43	100
65	30	35	0	0	0
154	20	133	1	0	0
30	0	30	0	0	0
100	39	26	0	0	36
145	97	48	0	0	0
93	0	0	0	11	82
98	1	12	7	77	0
290	136	31	105	18	0
172	160	0	12	0	0
236	149	0	87	0	0
357	1	36	320	0	0
301	3	220	67	11	0
135	0	0	4	0	131
64	0	13	0	0	51
409	409	0	0	0	0
159	0	0	0	0	159
129	24	66	40	0	0
8133	5737	780	915	557	143
203	0	1	115	64	23
117	0	1	59	57	0
52	0	51	1	0	0
167	1	0	0	3	163
141	0	0	77	62	2
122	51	64	6	0	0
110	0	0	0	0	110
66	15	3	0	2	46
406	102	143	135	1	25
33	0	0	0	33	0
108	0	0	0	0	108

	Surface (km2)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4.1	87%	1%	5%	3%	4%
Cize	4.2	25%	16%	21%	15%	22%
Glucy	5.1	5%	4%	26%	46%	20%
Communailles-en-Montagne	4.1	53%	45%	1%	1%	0%
Conte	3.3	13%	38%	29%	19%	1%
Cramans	8.2	80%	0%	4%	14%	2%
Cranètot	14.6	0%	0%	0%	3%	96%
Crans	9.1	0%	2%	1%	39%	58%
Crotenay	12.0	45%	16%	27%	11%	1%
Cuvier	10.6	0%	13%	3%	40%	43%
Darboigny	4.5	94%	0%	4%	2%	0%
Denezières	6.5	3%	1%	18%	78%	0%
Domblans	9.9	81%	0%	9%	10%	0%
Doucier	12.6	24%	29%	28%	19%	0%
Dournon	6.6	0%	0%	11%	39%	50%
Doye	3.7	4%	27%	68%	1%	0%
Ecleux	6.2	100%	0%	0%	0%	0%
Entre-deux-Monts	5.4	37%	23%	27%	13%	1%
Equevillon	4.8	38%	20%	24%	8%	9%
Esserval-Combe	1.8	4%	63%	32%	1%	0%
Esserval-Tartre	12.1	0%	15%	14%	22%	49%
Fay-en-Montagne	6.3	0%	0%	0%	0%	100%
Foncine-le-Bas	9.2	9%	38%	29%	24%	1%
Foncine-le-Haut	29.1	9%	36%	23%	27%	4%
Fontenu	9.3	25%	7%	6%	62%	0%
Fort-du-Plasne	13.1	8%	41%	19%	22%	11%
Fraroz	6.2	12%	49%	23%	11%	5%
Frontenay	8.1	37%	7%	9%	16%	30%
Geraise	6.1	29%	1%	52%	10%	9%
Gillois	9.8	1%	54%	7%	5%	33%
Grange-de-Vaivre	1.8	13%	22%	33%	27%	4%
Granges-sur-Baume	7.9	0%	0%	0%	0%	100%
Grozon	14.1	51%	42%	7%	1%	0%
Ivroy	9.3	3%	0%	7%	12%	78%
Ivrey	6.8	17%	9%	26%	27%	21%
La Chapelle-sur-Furieuse	9.0	0%	11%	43%	31%	16%
La Châtelaine	13.0	0%	1%	0%	0%	99%
La Chaumusse	10.8	6%	32%	46%	17%	0%
La Chaux-du-Dombief	21.6	11%	32%	30%	23%	5%
La Favière	2.7	0%	94%	0%	0%	6%
La Ferté	11.9	100%	0%	0%	0%	0%
La Latette	5.9	5%	55%	4%	3%	33%
La Marre	10.7	0%	0%	0%	0%	100%

Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
	négligeable	faible	moyen	fort	très fort
60	55	0	0	5	0
821	604	98	89	23	6
72	0	0	0	10	62
50	50	0	0	0	0
62	0	0	5	50	7
473	473	0	0	0	0
481	0	0	0	0	481
69	0	0	0	0	69
635	448	56	131	0	0
215	0	0	0	0	215
83	83	0	0	0	0
78	0	0	2	76	0
911	911	0	0	0	0
285	19	128	72	65	0
118	0	0	17	49	52
79	0	0	79	0	0
183	183	0	0	0	0
151	115	26	9	1	0
587	534	0	53	0	0
14	5	4	5	1	0
79	0	4	75	0	0
74	0	0	0	0	74
221	26	95	93	5	2
1024	117	575	225	33	74
48	0	16	5	26	0
424	16	264	127	6	10
50	5	45	0	0	0
159	99	0	34	18	8
40	0	0	36	4	0
145	0	8	0	1	136
55	1	47	7	0	0
134	0	0	0	0	134
472	210	208	53	0	0
83	7	0	24	48	3
55	35	6	12	1	1
316	0	44	192	76	4
134	0	0	0	0	134
337	30	238	60	9	0
531	20	218	208	85	0
32	0	32	0	0	0
187	187	0	0	0	0
65	0	5	0	6	53
328	0	0	0	0	328

	Surface (km2)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4,1	87%	1%	5%	3%	4%
Lac-des-Rouges-Truites	19,6	10%	27%	20%	41%	2%
Ladoye-sur-Seille	3,7	11%	6%	6%	8%	69%
Lavigny	5,5	43%	0%	0%	22%	34%
Le Fied	8,4	0%	0%	0%	0%	100%
Le Frasnois	14,7	11%	12%	27%	39%	12%
Le Larderet	6,2	0%	4%	29%	51%	16%
Le Latet	4,3	0%	13%	18%	25%	43%
Le Louverot	1,8	91%	0%	6%	3%	0%
Le Pasquier	7,9	4%	4%	18%	12%	61%
Le Vaudioux	6,1	23%	33%	22%	19%	3%
Le Vernois	1,1	100%	0%	0%	0%	0%
Lemuy	21,4	0%	5%	34%	38%	23%
Lent	4,2	2%	38%	52%	8%	0%
Les Arsures	4,4	71%	10%	13%	6%	0%
Les Chalesmes	9,4	7%	29%	10%	29%	25%
Les Nans	8,4	28%	10%	23%	28%	11%
Les Planches-en-Montagne	13,5	9%	26%	24%	12%	30%
Les Planches-près-Arbois	1,4	50%	11%	13%	20%	7%
Longcochon	3,6	57%	40%	2%	0%	0%
Loulie	10,8	0%	0%	12%	88%	0%
Marigny	11,9	27%	49%	10%	14%	0%
Marnoz	4,7	25%	32%	25%	18%	0%
Mathenay	3,5	83%	0%	4%	3%	10%
Menétru-le-Vignoble	5,8	19%	2%	9%	7%	64%
Mesnay	8,3	18%	5%	5%	12%	60%
Mesnois	11,5	19%	21%	15%	35%	10%
Mièges	3,3	5%	52%	37%	7%	0%
Miéry	7,8	64%	13%	22%	1%	0%
Mignovillard	49,9	16%	22%	3%	9%	50%
Mirebel	17,1	7%	2%	17%	20%	55%
Molain	11,6	0%	0%	0%	0%	100%
Molamboz	7,1	96%	0%	2%	2%	0%
Molpré	2,7	47%	46%	5%	1%	0%
Monay	2,5	80%	0%	17%	2%	0%
Monnet-la-Ville	6,2	48%	15%	18%	19%	0%
Montholier	8,1	84%	11%	3%	1%	0%
Montigny-lès-Arsures	10,7	57%	22%	2%	11%	3%
Montigny-sur-l'Ain	8,0	38%	23%	13%	26%	1%
Montmarlon	3,4	0%	4%	42%	28%	26%
Montrond	25,8	3%	0%	3%	7%	87%
Mont-sur-Monnet	20,3	0%	3%	6%	91%	0%
Morbier	42,6	0%	4%	21%	60%	14%

Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
	négligeable	faible	moyen	fort	très fort
60	55	0	0	5	0
349	29	250	45	24	0
61	17	14	0	0	30
361	297	0	0	0	64
206	0	0	0	0	206
154	1	95	30	21	7
67	0	0	26	41	0
75	0	0	3	40	32
270	225	0	35	10	0
249	0	4	98	88	60
162	24	87	42	7	2
270	270	0	0	0	0
245	0	38	139	61	7
125	0	104	21	0	0
231	57	58	70	44	2
85	11	56	0	0	17
89	80	0	9	0	0
150	13	100	29	6	1
93	64	26	1	3	0
37	37	0	0	0	0
171	0	0	0	171	0
180	123	34	20	3	0
380	61	151	145	23	0
113	75	0	36	2	0
151	47	9	71	15	10
548	292	247	0	4	5
193	69	89	35	0	0
95	0	59	36	0	0
135	2	6	127	0	0
629	81	546	1	2	0
230	0	0	51	0	179
122	0	0	0	0	122
94	76	0	11	7	0
29	29	0	0	0	0
149	146	0	3	0	0
372	351	19	2	0	0
313	256	27	22	9	0
272	194	69	0	6	2
193	179	14	0	0	0
29	0	0	4	13	12
441	0	0	0	56	375
194	0	12	6	176	0
2248	0	262	589	972	425

	Surface (km ²)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4,1	87%	1%	5%	3%	4%
Mouchard	6,2	57%	4%	5%	29%	5%
Mourmans-Charbonny	5,3	25%	17%	16%	31%	11%
Moutoux	4,3	10%	2%	5%	44%	39%
Neuvilley	4,1	100%	0%	0%	0%	0%
Nevy-sur-Seille	6,5	46%	7%	6%	11%	30%
Ney	7,5	50%	7%	18%	25%	0%
Nozeroy	3,7	41%	50%	5%	4%	0%
Onglières	9,0	3%	7%	39%	16%	35%
Pagnoz	3,3	0%	7%	28%	49%	15%
Passenans	4,9	43%	5%	29%	20%	2%
Patornay	1,8	17%	68%	10%	6%	0%
Picarreau	9,0	0%	0%	1%	0%	98%
Pillemoine	4,8	12%	21%	50%	17%	0%
Plasne	7,7	7%	4%	0%	1%	87%
Plénise	5,1	1%	15%	28%	32%	24%
Plérisette	2,9	0%	18%	29%	38%	15%
Poligny	51,2	17%	19%	3%	1%	60%
Pont-de-Poitte	7,7	13%	62%	17%	6%	2%
Pont-d'Héry	13,6	21%	5%	2%	18%	54%
Pont-du-Navoy	9,7	20%	12%	47%	20%	0%
Port-Lesnéy	10,9	16%	5%	19%	49%	11%
Prétin	5,4	14%	3%	6%	18%	59%
Publy	15,3	1%	0%	1%	21%	77%
Pupillin	6,6	16%	22%	15%	5%	43%
Rix	5,4	33%	65%	2%	0%	0%
Saïfloz	8,8	0%	0%	1%	99%	0%
Saint-Cyr-Montmalin	10,3	83%	12%	4%	0%	0%
Saint-Germain-en-Montagne	5,4	29%	0%	16%	31%	25%
Saint-Lamain	4,2	91%	1%	7%	1%	0%
Saint-Laurent-en-Grandvaux	17,5	4%	25%	32%	35%	4%
Saint-Lothain	12,3	78%	6%	11%	5%	0%
Saint-Thiébaud	8,0	22%	5%	62%	8%	2%
Saizenay	4,9	66%	12%	9%	11%	2%
Sains-les-Bains	25,1	39%	12%	17%	20%	11%
Sapois	3,5	2%	41%	46%	11%	0%
Sirod	16,1	3%	19%	30%	39%	10%
Songeson	8,5	0%	0%	1%	99%	0%
Supl	14,0	0%	9%	36%	32%	23%
Syam	7,0	3%	25%	42%	22%	8%
Thésy	5,0	0%	1%	0%	3%	96%
Toulouse-le-Château	4,1	86%	0%	8%	5%	1%

Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
	négligeable	faible	moyen	fort	très fort
60	55	0	0	5	0
1188	148	22	66	722	231
85	55	6	0	22	2
58	0	0	0	58	0
62	62	0	0	0	0
238	221	11	5	1	0
587	444	1	46	96	0
399	98	295	6	0	0
74	0	8	66	0	0
239	0	8	97	111	22
305	176	0	45	83	0
140	33	89	18	0	0
85	0	0	0	0	85
62	62	0	0	0	0
254	54	7	0	0	193
53	0	0	53	0	0
37	0	12	25	0	0
4279	3318	778	72	39	72
643	142	373	127	0	0
258	59	9	5	23	162
244	8	4	124	108	0
517	121	26	94	114	163
60	24	25	2	8	1
286	1	0	0	0	285
256	51	0	24	2	179
67	50	17	0	0	0
93	0	0	0	93	0
174	85	53	36	0	0
401	6	0	0	11	384
121	108	4	9	0	0
1736	0	949	660	46	62
421	371	0	50	0	0
64	16	0	48	0	0
110	110	0	0	0	0
3045	1219	1224	333	221	49
324	0	316	8	0	0
553	3	2	123	365	60
71	0	0	0	71	0
96	0	0	45	36	15
209	0	20	22	113	54
66	0	14	0	0	52
209	170	0	27	6	7

	Surface (km2)	Pourcentage de la commune occupé par chaque niveau de susceptibilité				
		négligeable	faible	moyen	fort	très fort
Abergement-le-Grand	4,1	87%	1%	5%	3%	4%
Tourmont	9,7	53%	47%	0%	0%	0%
Vadans	11,3	79%	18%	2%	2%	0%
Valempoulières	16,2	0%	0%	0%	3%	97%
Vannoz	5,8	30%	35%	31%	4%	0%
Vaux-sur-Poligny	1,4	70%	0%	1%	12%	17%
Verges	6,4	0%	0%	0%	14%	86%
Vers-en-Montagne	8,5	0%	1%	22%	21%	56%
Vevey	9,8	0%	0%	0%	1%	99%
Vileneuve-d'Aval	4,0	92%	7%	1%	0%	0%
Villerserine	3,0	50%	50%	0%	0%	0%
Villers-Farlay	10,0	99%	1%	0%	0%	0%
Villette-lès-Arbois	5,4	77%	19%	4%	0%	0%
Voiteur	9,5	81%	0%	1%	8%	10%

Population (2007)	Nombre d'habitant exposé à chaque niveau de susceptibilité				
	négligeable	faible	moyen	fort	très fort
60	55	0	0	5	0
490	252	222	4	7	5
272	196	2	14	60	0
203	0	0	0	10	193
205	33	17	140	9	6
98	98	0	0	0	0
172	0	0	0	0	172
198	0	0	74	36	88
250	0	0	0	0	250
80	65	0	6	9	0
35	23	12	0	0	0
491	491	0	0	0	0
387	93	240	54	0	0
777	769	0	0	3	5

Annexe 11

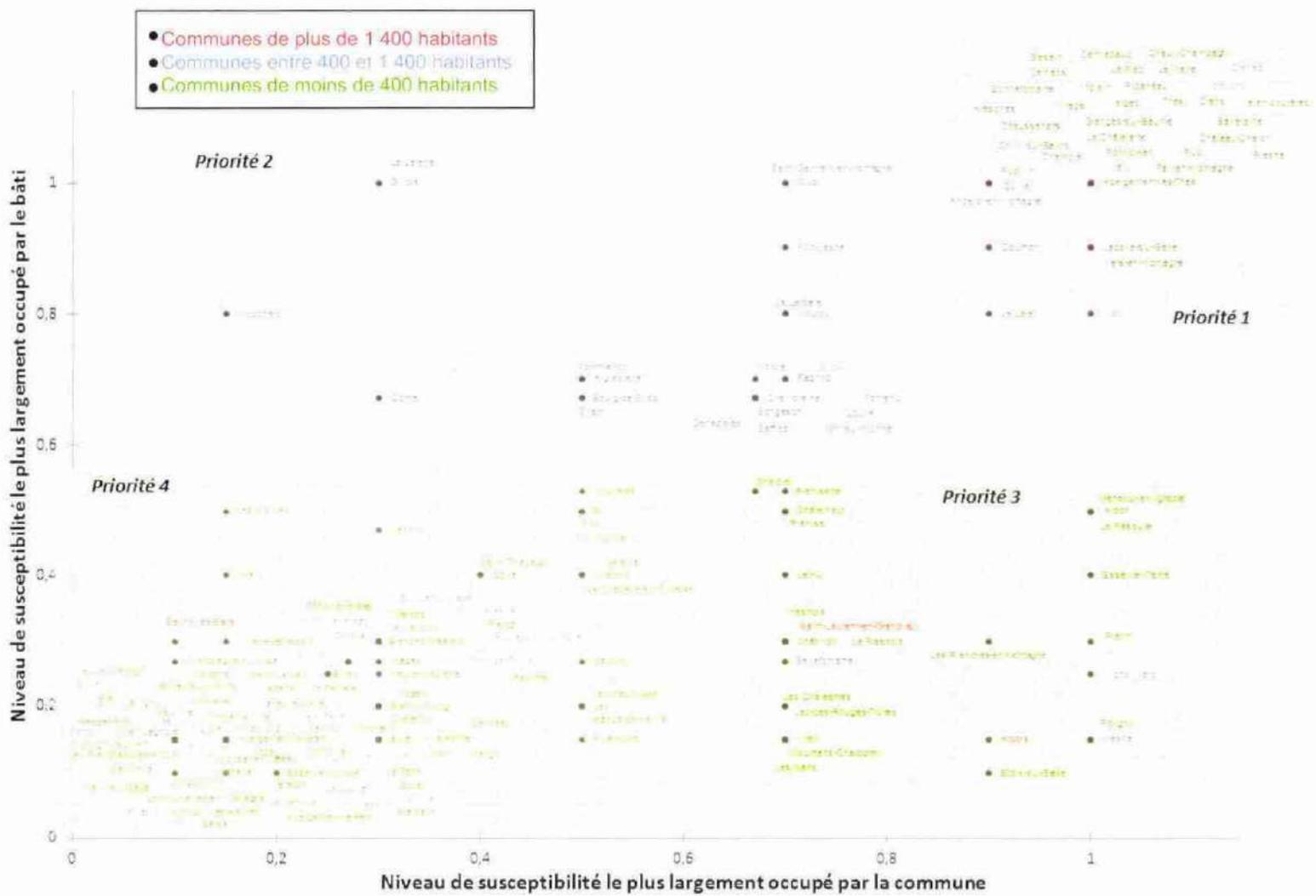
Classement des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles



Annexe 12

Proposition de classement des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles





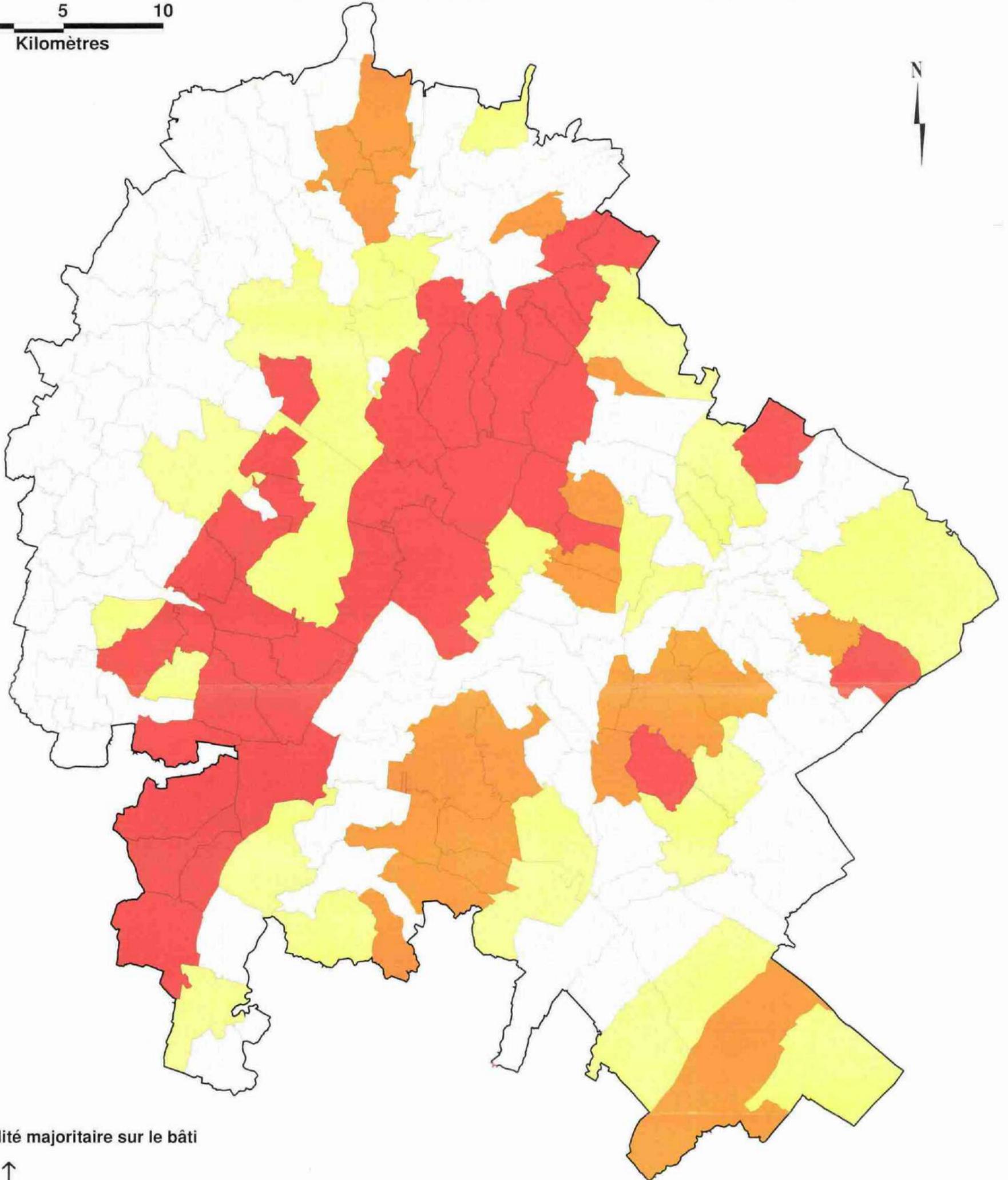
Annexe 13

Carte de hiérarchisation des communes vis-à-vis de leur exposition au risque de mouvements de terrain liés à des cavités naturelles

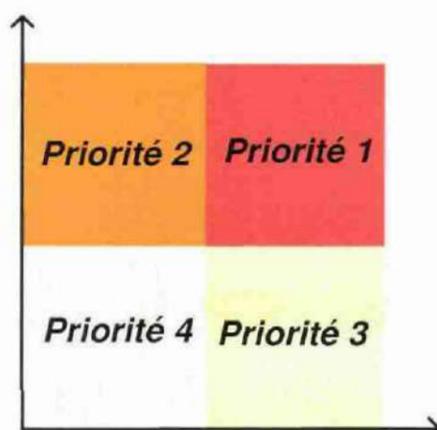


HIERARCHISATION DES COMMUNES VIS A VIS DE LEUR NIVEAU D'EXPOSITION AU RISQUE LIE AUX CAVITES NATURELLES

0 5 10
Kilomètres



Susceptibilité majoritaire sur le bâti



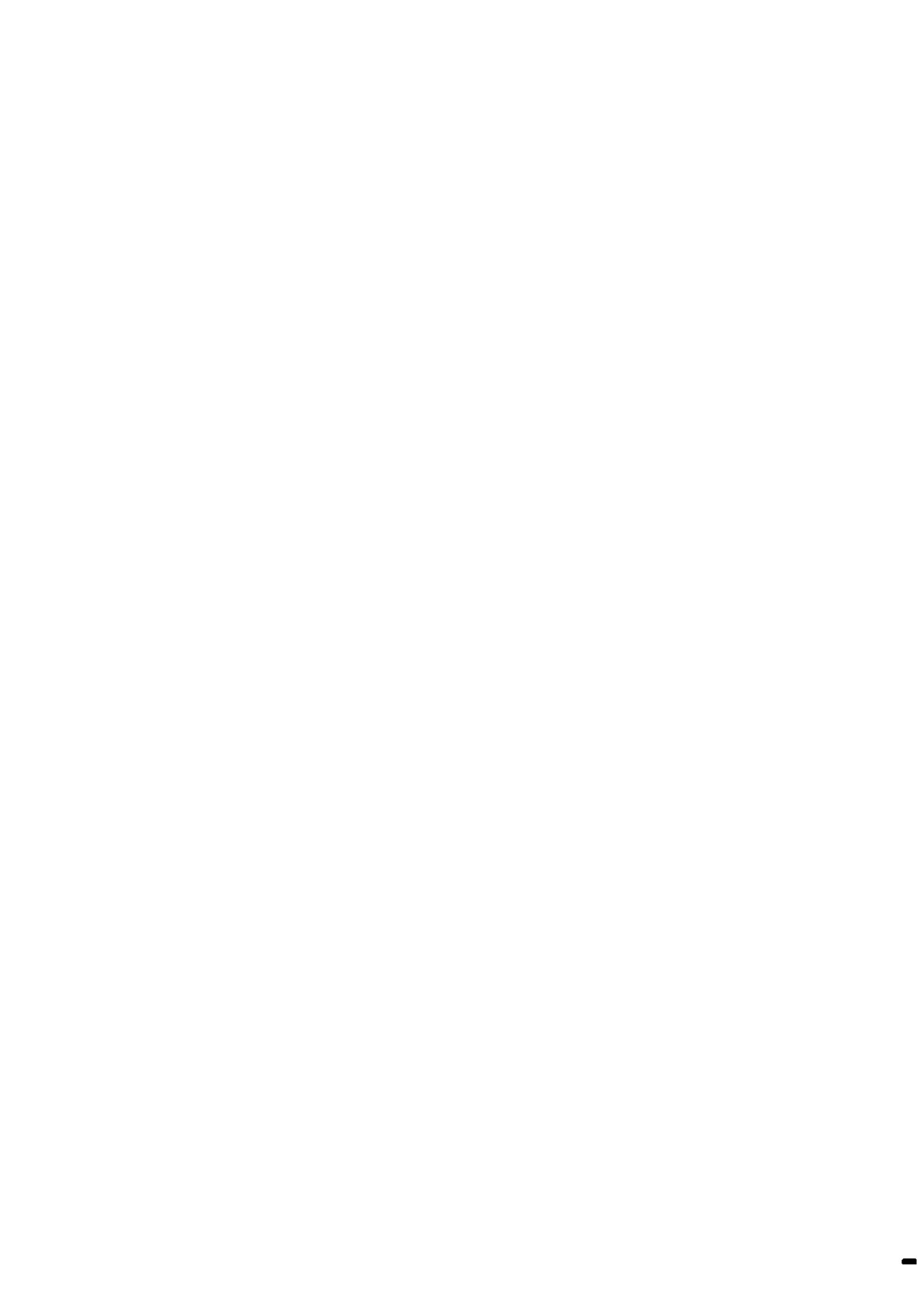
Susceptibilité majoritaire sur la commune

Département du JURA. Zone Pilote.
Echelle 1/20000



Annexe 14

Présentation des 181 communes constituant le site pilote



Risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura (39) – Zone pilote

Numéro INSEE	Communes	Surface (km ²)	Densité de population (hbts/km ²)	Population en 2007 (princ)	Logements en 2007 (princ)
39002	Abergement-le-Grand	4,1	14,6	60	34
39003	Abergement-le-Petit	1,6	25,0	40	19
39004	Abergement-lès-Thésy	4,6	13,0	60	23
39006	Aiglepierre	7,1	57,0	405	185
39009	Andelot-en-Montagne	12,7	42,8	544	268
39013	Arbois	45,5	76,6	3487	2035
39015	Ardon	5,1	23,1	118	58
39019	Les Arsures	4,4	52,5	231	107
39020	Arsure-Arsurette	12,8	7,0	89	65
39028	Aumont	8,1	50,0	405	218
39040	Barretaine	9,1	21,8	198	85
39047	Bellefontaine	24,3	22,2	540	337
39049	Bersaillin	14,0	25,7	360	176
39050	Besain	13,0	13,0	169	86
39052	Bief-des-Maisons	5,8	11,2	65	44
39053	Bief-du-Fourg	10,2	15,1	154	87
39055	Billecul	4,3	7,0	30	26
39057	Blois-sur-Seille	5,4	18,5	100	80
39058	Blye	10,9	13,3	145	76
39065	Bonnefontaine	8,9	10,4	93	55
39070	Bourg-de-Sirod	4,4	22,3	98	54
39072	Bracon	6,4	45,3	290	160
39073	Brainans	7,0	24,6	172	94
39075	Bréry	4,9	48,2	236	121
39081	Buvilly	6,0	59,5	357	183
39083	Censeau	9,8	30,7	301	159
39084	Cernans	5,6	24,1	135	70
39085	Cerniébaud	10,4	6,2	64	77
39091	Les Chalesmes	9,4	9,0	85	48
39093	Chamblay	14,0	29,2	409	183
39094	Chamole	5,7	27,9	159	75
39095	Champagne-sur-Loue	3,8	33,9	129	76
39097	Champagnole	20,2	402,6	8133	4496
39103	La Chapelle-sur-Furieuse	9,0	35,1	316	154
39105	Chapois	10,1	20,1	203	126
39107	Charcier	13,0	9,0	117	77
39108	Charency	2,8	18,6	52	23
39114	Château-Chalon	10,2	16,4	167	114
39116	La Châtelaine	13,0	10,3	134	71
39120	Châtelneuf	13,2	10,7	141	85
39122	Châtillon	16,9	7,2	122	119
39126	La Chaumusse	10,8	31,2	337	171
39127	Chausseuans	4,3	25,6	110	44
39129	Chaux-des-Crottenay	11,6	35,0	406	279
39131	La Chaux-du-Dombief	21,6	24,6	531	270
39133	Chaux-Champagny	7,5	8,8	66	34
39143	Chevrotaine	5,3	6,2	33	18
39147	Chilly-sur-Salins	12,0	9,0	108	48
39153	Cize	4,2	195,5	821	374
39155	Clucy	5,1	14,1	72	41
39161	Communailles-en-Montagne	4,1	12,2	50	31
39165	Conte	3,3	18,8	62	36

Numéro INSEE	Communes	Surface (km2)	Densité de population (hbts/km2)	Population en 2007 (princ)	Logements en 2007 (princ)
39176	Cramans	8,2	57,7	473	242
39177	Crançot	14,6	32,9	481	233
39178	Crans	9,1	7,6	69	46
39183	Crotenay	12,0	52,9	635	303
39187	Cuvier	10,6	20,3	215	105
39191	Darboigny	4,5	18,4	83	37
39192	Denezières	6,5	12,0	78	59
39199	Domblans	9,9	92,0	911	408
39201	Doucier	12,6	22,6	285	243
39202	Dournon	6,6	17,9	118	48
39203	Doye	3,7	21,4	79	44
39206	Écleux	6,2	29,5	183	88
39208	Entre-deux-Monts	5,4	28,0	151	81
39210	Équevillon	4,8	122,3	587	225
39213	Esserval-Combe	1,8	7,8	14	9
39214	Esserval-Tartre	12,1	6,5	79	46
39221	La Favière	2,7	11,9	32	23
39222	Fay-en-Montagne	6,3	11,7	74	56
39223	La Ferté	11,9	15,7	187	89
39225	Le Fied	8,4	24,5	206	95
39227	Foncine-le-Bas	9,2	24,0	221	194
39228	Foncine-le-Haut	29,1	35,2	1024	643
39230	Fontenu	9,3	5,2	48	36
39232	Fort-du-Plasne	13,1	32,4	424	207
39237	Fraroz	6,2	8,1	50	36
39240	Le Frasnois	14,7	10,5	154	134
39244	Frontenay	8,1	19,6	159	122
39248	Geraise	6,1	6,6	40	21
39254	Gillois	9,8	14,8	145	68
39259	Grange-de-Vaivre	1,8	30,6	55	24
39260	Granges-sur-Baume	7,9	17,0	134	75
39263	Grozon	14,1	33,5	472	195
39267	Ivory	9,3	8,9	83	47
39268	Ivrey	6,8	8,1	55	46
39271	Lac-des-Rouges-Truites	19,6	17,8	349	208
39272	Ladoye-sur-Seille	3,7	16,5	61	39
39277	Le Larderet	6,2	10,8	67	35
39281	Le Latet	4,3	17,4	75	34
39282	La Latette	5,9	11,0	65	37
39288	Lavigny	5,5	65,6	361	178
39291	Lemuy	21,4	11,4	245	145
39292	Lent	4,2	29,8	125	78
39298	Longcochon	3,6	10,3	37	26
39301	Loulle	10,8	15,8	171	93
39304	Le Louverot	1,8	150,0	270	113
39313	Marigny	11,9	15,1	180	161
39315	Marnoz	4,7	80,9	380	193
39317	La Marre	10,7	30,7	328	151
39319	Mathenay	3,5	32,3	113	53
39321	Menétru-le-Vignoble	5,8	26,0	151	88
39325	Mesnay	8,3	66,0	548	280
39326	Mesnois	11,5	16,8	193	104

Risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura (39) – Zone pilote

Numéro INSEE	Communes	Surface (km ²)	Densité de population (hbts/km ²)	Population en 2007 (princ)	Logements en 2007 (princ)
39329	Mièges	3,3	28,8	95	49
39330	Miéry	7,8	17,3	135	71
39331	Mignovillard	49,9	12,6	629	364
39332	Mirebel	17,1	13,5	230	129
39336	Molain	11,6	10,5	122	57
39337	Molamboz	7,1	13,2	94	57
39340	Molpré	2,7	10,7	29	16
39342	Monay	2,5	59,6	149	76
39344	Monnet-la-Ville	6,2	60,0	372	172
39354	Montholier	8,1	38,6	313	156
39355	Montigny-lès-Arsures	10,7	25,4	272	155
39356	Montigny-sur-l'Ain	8,0	24,1	193	96
39359	Montmarlon	3,4	8,5	29	12
39364	Montrond	25,8	17,1	441	203
39366	Mont-sur-Monnet	20,3	9,6	194	100
39367	Morbier	42,6	52,8	2248	1180
39370	Mouchard	6,2	191,6	1188	542
39372	Mournans-Charbonny	5,3	16,0	85	42
39376	Moutoux	4,3	13,5	58	37
39381	Les Nans	8,4	10,6	89	59
39386	Neuville	4,1	15,1	62	34
39388	Nevy-sur-Seille	6,5	36,6	238	138
39389	Ney	7,5	78,3	587	288
39391	Nozeroy	3,7	107,8	399	201
39393	Onglières	9,0	8,2	74	41
39403	Pagnoz	3,3	72,4	239	113
39406	Le Pasquier	7,9	31,5	249	120
39407	Passenans	4,9	62,2	305	187
39408	Patornay	1,8	77,8	140	86
39418	Picarreau	9,0	9,4	85	47
39419	Pillemoine	4,8	12,9	62	29
39424	Les Planches-en-Montagne	13,5	11,1	150	136
39425	Les Planches-près-Arbois	1,4	66,4	93	54
39426	Plasne	7,7	33,0	254	130
39427	Plénise	5,1	10,4	53	30
39428	Plénisette	2,9	12,8	37	15
39434	Poligny	51,2	83,6	4279	2410
39435	Pont-de-Poitte	7,7	83,5	643	412
39436	Pont-d'Héry	13,6	19,0	258	106
39437	Pont-du-Navoy	9,7	25,2	244	151
39439	Port-Lesney	10,9	47,4	517	320
39444	Pretin	5,4	11,1	60	44
39445	Publy	15,3	18,7	286	130
39446	Pupillin	6,6	38,8	256	120
39461	Rix	5,4	12,4	67	28
39473	Saffloz	8,8	10,6	93	56
39479	Saint-Cyr-Montmalin	10,3	16,9	174	99
39481	Saint-Germain-en-Montagne	5,4	74,3	401	195
39486	Saint-Lamain	4,2	28,8	121	66
39487	Saint-Laurent-en-Grandvaux	17,5	99,2	1736	850
39489	Saint-Lothain	12,3	34,2	421	255
39495	Saint-Thiébaud	8,0	8,0	64	40

Numéro INSEE	Communes	Surface (km2)	Densité de population (hbts/km2)	Population en 2007 (princ)	Logements en 2007 (princ)
39497	Saizenay	4,9	22,4	110	49
39500	Salins-les-Bains	25,1	121,3	3045	1729
39503	Sapois	3,5	92,6	324	144
39517	Sirod	16,1	34,3	553	306
39518	Songeson	8,5	8,4	71	54
39522	Supt	14,0	6,9	96	62
39523	Syam	7,0	29,9	209	116
39529	Thésy	5,0	13,2	66	31
39533	Toulouse-le-Château	4,1	51,0	209	135
39535	Tourmont	9,7	50,5	490	201
39539	Vadans	11,3	24,1	272	146
39540	Valempoulières	16,2	12,5	203	93
39543	Vannoz	5,8	35,3	205	81
39545	Le Vaudioux	6,1	26,6	162	92
39548	Vaux-sur-Poligny	1,4	70,0	98	45
39550	Verges	6,4	26,9	172	108
39553	Le Vernois	1,1	245,5	270	122
39554	Vers-en-Montagne	8,5	23,3	198	102
39558	Vevey	9,8	25,5	250	127
39565	Villeneuve-d'Aval	4,0	20,0	80	49
39568	Villerserine	3,0	11,7	35	25
39569	Villers-Farlay	10,0	49,1	491	231
39572	Villette-lès-Arbois	5,4	71,7	387	181
39582	Voiteur	9,5	81,8	777	431
39586	Aresches	4,8	9,2	44	24



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

**Service géologique régional Bourgogne
et Franche-Comté**
Parc Technologique – 27 rue Louis de Broglie
21000 – Dijon – France
Tél. : 03.80.72.90.40