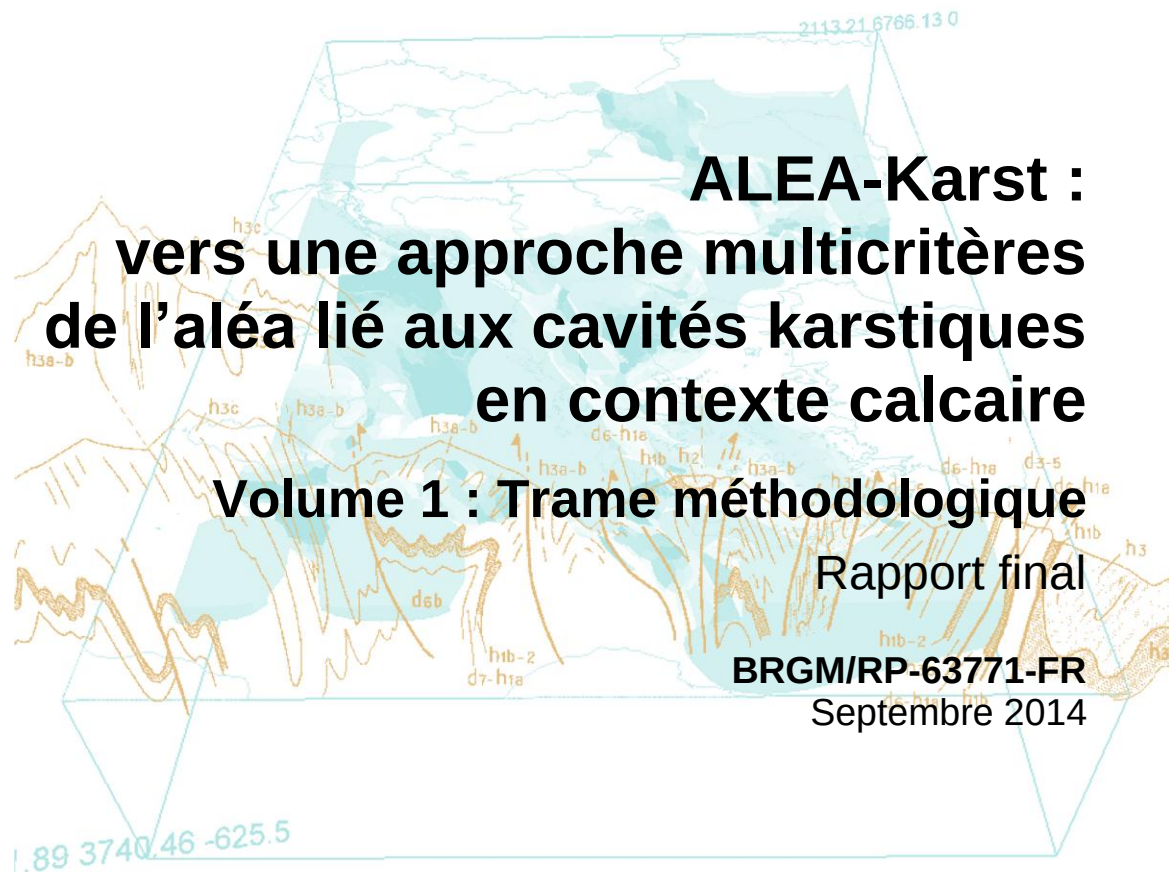




ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire

Volume 1 : Trame méthodologique

Rapport final

BRGM/RP-63771-FR
Septembre 2014

Etude réalisée dans le cadre de l'action R & D du Plan cavités, Direction générale de la
prévention des risques, MEDDE

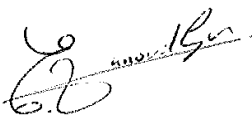
J. PERRIN, G. NOURY, C. CARTANNAZ
Avec la collaboration de
S. Pinson, T. Dewez, T. Gutierrez

Vérificateur :

Nom : E. Vanoudheusden

Date : 12/11/2014

Signature :

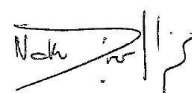


Approbateur :

Nom : N. Dörfliger

Date : 11/12/2014

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : karst, calcaire, cavités, désordres, aléa, approche multicritères, susceptibilité, effondrement, bibliographie, Loiret, Lorraine, Franche-Comté, Landes, Aquitaine

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

Perrin J., Noury G., Cartannaz C. 2014, ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1 : Trame méthodologique – Rapport BRGM/RP-63771-FR, 77 pages.

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'action « Recherche et Développement » initiée par le Plan National Cavités. Ce module a pour objectif de mener à bien des études destinées à faire progresser les connaissances dans le domaine du « risque cavités », notamment celles requises pour des diagnostics précis sur les risques d'instabilités liés à la présence de cavités.

Sur la base d'une étude bibliographique (détails dans Perrin *et al.* 2013) et d'étude de sites (présentés dans le volume 2 de ce rapport), une trame méthodologique pour l'évaluation de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire est proposée. Cette trame propose dans un premier temps de délimiter les différentes typologies de karst présentes (karst nu, de contact, sous couverture) puis pour chaque typologie de cartographier des critères explicatifs de la présence de désordres. La liste de ces critères est basée sur l'analyse des données des différents sites étudiés :

- distance aux failles/fractures, cours d'eau et occupation du sol pour le karst nu,
- pente pour le karst de contact,
- distance aux failles et aux cours d'eau et typologie de la couverture (lithologie, position de la nappe, épaisseur de la couverture peu perméable) pour le karst sous couverture.

Le croisement de ces critères permet d'aboutir à une carte de susceptibilité à l'effondrement. Dans la mesure où les désordres sont suffisamment bien décrits, il est ensuite possible de réaliser une carte de l'intensité de l'aléa (diamètre d'effondrement attendu ou mise en pente des terrains attendu dans le cas d'affaissements). Puisque en général la période de retour des désordres n'est pas connue, on se contente ensuite de croiser la carte de susceptibilité et la carte d'intensité pour constituer la carte d'aléa. Les limites de la caractérisation de l'intensité sont discutées et de nouvelles pistes de recherche pour l'améliorer sont proposées.

Cette méthodologie se veut pragmatique et opérationnelle : elle nécessite une cartographie géologique à 1/50 000 ou à une échelle plus fine, un MNT (25 ou 30 m de résolution spatiale), les BD nationales Carthage (pour les cours d'eau) et CORINE (pour l'occupation du sol) et un logiciel SIG. Il est également recommandé d'utiliser les données du sous-sol (BSS) pour préciser le contexte hydrogéologique et les BD cavités et BD MVT pour préciser les contours des secteurs karstifiés et vérifier à posteriori les cartes de susceptibilité et d'aléa.

Elle se veut applicable aux différents contextes géologiques à l'échelle nationale et a pu être testée avec succès sur quatre sites ayant des géologies et des contextes contrastés : Loiret, Meuse, Franche-Comté et Landes. Des valeurs seuils des critères telles que l'épaisseur de couverture peu perméable au-delà de laquelle la susceptibilité à l'effondrement devient très faible et le critère aggravant de la pente en contexte de karst de contact peuvent varier d'un site à l'autre et nécessitent d'être ajustées au cas par cas.

A la différence d'autres approches mises en œuvre, cette trame méthodologique ne nécessite pas un inventaire représentatif des désordres qui peut être relativement difficile à constituer de manière exhaustive (données fragmentaires, campagnes de terrain fastidieuses).

Un des intérêts de l'approche retenue est son caractère multi-échelles avec une approche régionale basée essentiellement sur la typologie des karsts (croisement de la carte géologique et du MNT) et une approche locale où les différents critères sont appliqués.

Cette trame méthodologique pourrait être adaptée à d'autres contextes géologiques tels que la craie où les processus restent certainement en bonne partie valide. Le test sur d'autres sites permettrait de consolider l'approche et d'aboutir à une méthodologie robuste qui pourrait être présentée sous la forme d'un guide méthodologique pour la cartographie de cet aléa géologique.

Il est recommandé d'encourager les services de l'état à améliorer la bancarisation des phénomènes d'effondrement qui se produisent afin de disposer à terme d'une base de données fiable répertoriant à la fois la localisation, les dimensions (nécessaires pour qualifier l'intensité de l'aléa) et la date d'apparition. Ces données devraient alimenter la BD MVT. De telles données permettront de vérifier les cartes d'aléa et également de progresser dans la compréhension des phénomènes.

Enfin, l'exploitation des données LIDAR semble très prometteuse pour à la fois améliorer la précision des localisations des différents désordres, en obtenir un inventaire exhaustif et mettre à la lumière des formes karstiques invisibles à l'œil nu de l'expert sur le terrain. Le traitement et l'interprétation de ces données demandent encore à être développés.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Le karst et les désordres en contexte karstique	11
2.1. INTRODUCTION	11
2.1.1. Définitions retenues dans le cadre de cette étude	11
2.1.2. Le karst	14
2.2. LES DÉSORDRES LIÉS AUX CAVITÉS KARSTIQUES	16
2.3. MÉTHODOLOGIES D'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ /ALEA EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES	18
2.3.1. Méthodologies d'évaluation de la susceptibilité	18
2.3.2. Méthodologies de qualification et d'évaluation de l'intensité	22
2.3.3. Méthodologies d'évaluation de l'aléa	28
3. Cadre conceptuel d'approche de l'aléa	31
3.1. TYPOLOGIE DES KARSTS	31
3.2. DESORDRES ET TYPOLOGIE DES KARSTS	32
3.3. CARACTERISATION DE L'ALEA ET CRITERES EXPLICATIFS A EVALUER	33
4. Trame méthodologique pour l'évaluation de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques.....	37
4.1. DELIMITATION DE LA ZONE KARSTIFIEE	38
4.2. CARTOGRAPHIE DE LA TYPOLOGIE DES KARSTS	40
4.3. CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE	40
4.3.1. Karst nu	41
4.3.2. Karst de contact	41
4.3.3. Karst sous couverture	42
4.4. CARTOGRAPHIE DE L'INTENSITE	44
4.5. CROISEMENT SUSCEPTIBILITE ET INTENSITE – CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	46
4.5.1. Karst nu	46
4.5.2. Karst de contact	47
4.5.3. Karst sous couverture	47
4.6. VERIFICATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE/ALEA	50
4.7. APPROCHE REGIONALE	50
5. Synthèse et conclusions.....	53
6. Bibliographie	55

Liste des figures

Figure 1 : Carte géomorphologique des karsts de France (Nicod in Audra 2010).....	15
Figure 2 : Classification des différents types de dolines se développant en contexte de roches solubles.	17
Figure 3 : cartographie de la susceptibilité d'occurrence de dolines utilisant différentes méthodes : A- plus proche voisin, B-densité, C-heuristique, D-probabiliste. Application à la région de Saragosse (d'après Galve et al. 2009)	19
Figure 4 : Tableau synthétisant les différents critères explicatifs envisagés dans les études existantes sur la cartographie de la susceptibilité de désordres d'origine karstique. Les critères sont d'ordre géologique (encaissant & couverture), géomorphologique, hydrologique et hydrogéologique, hydrochimique, climatique et anthropique.....	21
Figure 5 : Diamètre initial d'un fontis à son arrivée à la surface du sol (Sowers, 1996) : a) Sol cohésif - b) Sol peu cohésif	25
Figure 6 : Abaque d'évaluation de la stabilité des terrains de recouvrement d'une cavité karstique (Drumm et al., 2009)	27
Figure 7 : Mode de hiérarchisation des classes d'aléa (guide méthodologique PPR cavités souterraines abandonnées, 2012)	29
Figure 8 : Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour les affaissements, effondrements localisés et effondrements généralisés (guide méthodologique PPR cavités souterraines abandonnées, 2012)	30
Figure 9 : Les karsts de contact peuvent se rencontrer dans trois contextes géologiques différents	31
Figure 10 : Typologie du karst : 1) karst nu, 2) karst de contact, 3) karst sous couverture perméable, 4) karst sous couverture peu perméable. En noir : conduits karstiques (fissures élargies par dissolution) ; pointillés bleus : niveau piézométrique de la nappe calcaire	32
Figure 11 : Suite à une analyse bibliographique, 825 désordres décrits sur le territoire métropolitain peuvent être rattachés aux quatre typologies de karst. Une large majorité des désordres sont rencontrés en contexte de karst sous couverture perméable et karst de contact	33
Figure 12 : Synthèse des processus menant à l'apparition de désordres, formes karstiques associées, évolution temporelle des désordres, fréquences d'apparition et caractérisation de l'aléa. (qq=quelques ; pls=plusieurs). Erosion interne = suffosion/soutirage	34
Figure 13 : Tableau de synthèse récapitulant les processus menant à des désordres en fonction de la typologie du karst et les critères explicatifs potentiels à l'apparition de désordres	36
Figure 14 : Trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa effondrement lié à la présence de karst.....	37
Figure 15 : délimitation de la zone karstifiée (traitillés oranges) pour le cas d'étude théorique basée sur la carte géologique et l'inventaire des formes karstiques (points noirs)	38
Figure 16 : Modèle Numérique de Surface.....	39
Figure 17 : Critères explicatifs pour chacune des typologies de karst et indices de susceptibilité :S1 (très faible), S2 (faible), S3 (moyen), S4 (fort)S5 (très élevé)	41
Figure 18 : Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement pour le karst de contact : seul le critère pente est utilisé comme critère protecteur avec une susceptibilité qui passe d'un indice fort (S4) à moyen (S3) dans le cas de pentes faibles (<4° pour le site d'étude de Vau-Vauthier, Lorraine)	42
Figure 19 : Typologie de la couverture coiffant des calcaires karstifiés.....	43

Figure 20 : Carte de susceptibilité aux désordres pour le cas d'étude théorique. Points gris	44
Figure 21 : Comparaison des classifications d'intensité suivant la méthode PPR et la méthode sud-africaine.....	45
Figure 22 : Karst nu : débouillage – hiérarchisation des classes d'aléa (en vert aléa faible, en orange aléa moyen)	46
Figure 23 : Karst sous couverture, effondrement par soutirage + débouillage (couverture cohésive) – Hiérarchisation des classes d'aléa.....	47
Figure 24 : Carte de l'intensité des désordres pour le cas d'étude théorique ; la classification PPR Cavités souterraines est retenue pour les classes d'intensité	49
Figure 25 : Carte d'aléa pour le cas d'étude théorique	49
Figure 26 : Approche régionale de la cartographie de la susceptibilité à l'effondrement	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un affaissement (PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)	23
Tableau 2 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement (PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)	24
Tableau 3 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement généralisé (PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)	24
Tableau 4 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un fontis (Buttrick et al., 2001)	26

Liste des annexes

Annexe 1 Classification des dolines et paramètres décrivant leurs spécificités et schémas de l'évolution de dolines de soutirage, de fontis, et de dolines d'effondrement (Waltham et al. 2005)	57
Annexe 2 Exemples de désordres pour différentes typologies de karst (Département du Doubs)	61
Annexe 3 Cartographie semi-automatique des zones potentielles de karsts de contact - Méthode	65
Annexe 4 Synthèse de l'analyse bibliographique des désordres décrits en territoire métropolitain	71

Note : *cette étude a bénéficié des informations et échanges avec les personnes suivantes que nous tenons à remercier : Bernard Collet (DDT70), Marie-Ange Dubois (DDT25), Guy Forestier (CG70), Dominique Harmand (Université de Lorraine), Mathieu Liniger (CG25), Benoît Losson (Université de Lorraine) David Mathon (CEREMA-Blois), Jacques Mudry (Université de Franche-Comté), Pascal Reilé (Cabinet Reilé, Besançon), Nejema Zergaoui (CEREMA-Autun).*

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'action « Recherche et Développement » initiée par le Plan National Cavitité. Ce module a pour objectif de mener à bien des études destinées à faire progresser les connaissances dans le domaine du « risque cavités », notamment celles requises pour des diagnostics précis sur les risques d'instabilités liés aux cavités.

Dans ce cadre, l'action a pour objectif de proposer une approche multicritères d'évaluation de l'aléa lié à la présence et à l'effondrement de cavités karstiques en contexte calcaire. L'étude s'est déclinée en deux phases : La phase 1 (Perrin *et al.* 2013) a consisté en une étude bibliographique et une étude de terrain sur 3 sites représentatifs avec pour objectifs de définir les critères explicatifs à prendre en compte et les hiérarchiser puis la phase 2, objet de ce rapport, s'est focalisée sur le développement d'une trame méthodologique de cartographie multicritères de la susceptibilité/aléa effondrement et sa validation en s'appuyant sur les résultats des travaux de la phase 1 et l'étude d'un site additionnel.

L'étude se focalise sur le contexte calcaire ; les karsts de la craie, les karsts évaporitiques et à fortiori les contextes de pseudo-karsts ne sont pas traités dans le cadre de ce travail. Toutefois la trame méthodologique proposée pourrait être adaptée à ces autres contextes géologiques.

Le présent rapport, qui finalise la phase 2, est constitué de deux volumes :

- Le **volume 1**, après une introduction sur le karst et les instabilités de terrain en contexte karstique, présente la trame méthodologique élaborée.
- Le **volume 2** présente les études de site réalisées dans le cadre du projet et qui servent d'appui à la trame méthodologique.

Le rapport final de la phase 1 (Perrin *et al.* 2013) présente l'analyse bibliographique réalisée et donne des informations additionnelles sur les sites d'étude.

2. Le karst et les désordres en contexte karstique

2.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est essentiellement basé sur une revue bibliographique des différentes études traitant de la problématique des instabilités liées à la présence de karst. La présentation se veut synthétique et des informations plus complètes peuvent être consultées dans le rapport final de l'année 1 du projet (Perrin *et al.* 2013).

L'étude du karst est une science pluridisciplinaire et peut être typiquement abordée avec l'œil du géographe, du géologue, de l'hydrogéologue ou de l'ingénieur géotechnicien. De fait la bibliographie traitant du karst est abondante et la terminologie utilisée variée et parfois ambiguë. La première étape consiste donc à proposer une définition des termes utilisés dans le cadre de l'étude.

2.1.1. Définitions retenues dans le cadre de cette étude

Affaissement : déformation souple et progressive des terrains sus-jacents à une cavité qui se traduit en surface par une dépression en forme de cuvette.

Aléa : l'aléa est la probabilité d'occurrence au cours d'un laps de temps, en un lieu donné, d'un phénomène d'intensité donnée.

Cavité : vide karstique (par exemple grotte ou gouffre).

Carbonate : minéral caractérisé par l'ion $(\text{CO}_3)^{2-}$. La calcite qui compose essentiellement les calcaires est un carbonate de calcium. Dolomie : carbonate de magnésium.

Conduit : élément linéaire de cavité.

Crypto-karst : karst qui se développe sous une couverture qui masque les formes karstiques (pas ou peu d'indices exokarstiques dans ce contexte).

Crypto-doline : doline qui se développe sous une couverture meuble et qui ne se manifeste pas morphologiquement en surface. Aussi dénommée doline enfouie.

Débourrage : éboulement soudain des matériaux de comblement d'une cavité, souvent causé par des circulations massives d'eau.

Décolmatage : synonyme de débourrage.

Dépression fermée : forme topographique en creux à la surface d'un karst, de dimensions métriques à kilométriques ; forme endoréique typique du contexte karstique avec drainage interne par le karst.

Désordre : en contexte karstique, un désordre sera surtout entendu comme une modification de la géométrie de la surface des terrains surmontant une cavité karstique dont la date d'apparition est inférieure à 100 ans (horizon temporel pour caractériser l'aléa). De tels désordres peuvent engendrer des dommages aux aménagements réalisés à proximité. Ces désordres sont soit des effondrements, soit des affaissements, soit des tassements.

Doline : dépression fermée, de dimensions métriques à hectométriques ; au fond, les pentes du remplissage sont orientées vers le ou les points de disparition des eaux. Dans la littérature anglo-saxonne, deux vocables sont utilisés en fonction du type d'étude : « doline » (géomorphologie) et « sinkhole » (géotechnique, ingénierie). Les types de doline peuvent être classés selon des critères soit morphologiques (doline en entonnoir, en cuvette, en baquet, à fond plat, etc.) soit génétiques (doline de dissolution, d'effondrement, de soutirage, etc.).

Dans la présente étude, une classification morphologique des dolines a été faite : doline fermée, doline trou, doline gouffre, doline perte, doline émergence perte, cf. Annexe 1) puis deux classes de dolines ont été déterminées en fonction de leur stabilité : dolines actives (mouvement de terrain visible) et dolines colmatées.

Effondrement : déformation rapide (brutale) et cassante des terrains sus-jacents à une cavité qui se traduit en surface par une dépression marquée par des parois verticales (cratère).

Endokarst : désigne les formes karstiques qui se développent à l'intérieur du massif rocheux karstifiable (conduits, vides, etc.).

Entonnoir absorbant : dépression fermée de forme conique dans laquelle se perd une circulation superficielle.

Epikarst : zone épidermique du karst plus fissurée que l'encaissant pouvant contenir une nappe perchée et retarder l'infiltration.

Exokarst : désigne les formes karstiques qui se développent à la surface du karst (dolines, pertes, entrées de grottes & gouffres, aven, vallées sèches, etc.) ; synonyme de karst superficiel.

Fontis : Expression en surface d'un effondrement brutal et localisé, généralement pseudo-circulaire et pouvant atteindre quelques mètres de diamètre. Il est provoqué par la rupture du toit d'une cavité suite à la montée d'une voûte (ou cloche de fontis) qui progresse plus ou moins lentement vers la surface jusqu'à laisser une tranche de terrain suffisamment fragile pour rompre brutalement et développer un cratère à la surface.

Fluvio-karst : région dont la morphologie résulterait d'actions fluviales et karstiques, successives ou simultanées, telles qu'une proportion majoritaire de formes soient fluvio-karstiques.

Glacio-karst : région dont la morphologie résulterait d'actions glaciaires et karstiques, successives ou simultanées, telles qu'une proportion majoritaire de formes soient glacio-karstiques.

Gouffre : puits s'ouvrant en surface ; ou cavité pénétrable débutant par un orifice vertical.

Grotte : cavité pénétrable débutant par un conduit peu penté.

Inversac : conduit vertical souvent noyé pouvant fonctionner à la fois en perte ou en émergence en fonction de la charge hydraulique dans l'aquifère karstique (synonyme : estavelle).

Karst : ensemble des phénomènes et des vides spécifiques des roches susceptibles d'être mises en solution tout en conservant une tenue telle que ces vides soient durables ; également utilisé pour désigner une région où existent de tels phénomènes.

Niveau de base : correspond au niveau où les écoulements d'eau passent d'une dominante verticale (zone vadose) à une dominante horizontale. Le niveau de base peut soit être déterminé par un horizon géologique imperméable sous-jacent ou par l'altitude des points bas topographiques en surface (fond de vallée) qui constituent les zones d'émergence des écoulements.

Ouvala : terme d'origine croate désignant une vaste dépression résultant de la coalescence de plusieurs dolines.

Paléo-karst : ensemble de formes karstiques fossilisées au sens géologique du terme.

Perte : enfouissement d'une circulation, et par extension lieu où se produit cet enfouissement.

Poljé : terme d'origine croate décrivant une vaste dépression à fond plat généralement large de quelques centaines de mètres et longue de plusieurs kilomètres, souvent parcouru par une rivière se perdant dans une perte (ponor).

Pseudo-karst : ensemble des formes ressemblant à celles résultant du karst, d'ordinaire dans des roches non ou peu solubles.

Risque : le risque résulte de la combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité des enjeux exposés à l'aléa. Pour une intensité du phénomène donnée, les dommages et donc le risque seront d'autant plus élevés que la vulnérabilité des enjeux exposés est grande.

Roches carbonatées : Une roche carbonatée est une roche sédimentaire contenant plus de 50 % de carbonates. Les plus répandues sont le **calcaire**, constitué principalement de calcite et/ou d'aragonite, la **craie** et la **dolomie**.

Roches évaporitiques : Les principales roches évaporitiques sont formées principalement de **gypse**, d'**anhydrite**, de **sel gemme** (halite) et de sel de potasse (sylvite). Ces roches sont majoritairement monominérales (formées d'un seul minéral) et résultent de la précipitation chimique de substances dissoutes dans l'eau de mer ou les eaux continentales (lacs, sources thermales) lors de l'évaporation de celles-ci.

Solifluxion : Descente, sur un versant, de matériaux « boueux » ramollis par l'augmentation de leur teneur en eau liquide.

Soutirage : Action gravitaire, avec ou sans eau, d'entraînement de particules solides vers des vides sous-jacent (processus non limité au karst).

Suffosion : Erosion interne et progressive de la fraction fine (argile, silt, etc.) d'un sol par l'action de l'eau (processus non limité au karst). En contexte karstique, il s'agit de l'évacuation des particules fines sous l'action des eaux d'infiltration. Il n'y a pas d'accumulation car les particules sont emportées dans l'endokarst (Jaillet 2005).

Vallée sèche : vallée abandonnée par la circulation qui l'a creusée.

Zone vadose : zone du karst non saturée comprise entre la surface et le sommet de la zone saturée. L'épaisseur de la zone vadose est fonction des fluctuations des niveaux piézométriques.

Terminologie régionale

Bétoire : perte (terme en usage en Normandie).

Bême : fontis en région Centre, aussi appelé « gouffre ».

Mardelle : petite dépression ubiquiste dans les terrains argileux et marneux du Bassin Parisien (Nicod 1994).

Folletières (Saône et Loire) : dépression superficielle.

Enfonçure : terme utilisé en Franche-Comté pour désigner une dépression en surface de petit diamètre (désordre généralement d'origine karstique au vu du contexte géologique).

Tertre : monticule d'argile créé par le fonctionnement temporaire en émergence d'un conduit karstique (terme utilisé en Lorraine).

2.1.2. Le karst

Les formes karstiques sont d'ampleur et d'extension maximales dans des contextes de roches solubles compétentes (massives) et fracturées, qui sont essentiellement les calcaires voire les dolomies. Les calcaires moins compétents tels que la craie et d'autres roches carbonatées peu lithifiées vont par contre présenter des formes karstiques de taille et d'extension plus réduites. Les karsts dans le gypse peuvent présenter des similitudes avec les karsts carbonatés avec des spécificités qui lui sont propres : karst en interstrates, breccia pipes (Waltham & Fookes 2003). Le sel, de par sa mise en solution extrêmement rapide, développe des formes de dissolution spécifique et doit donc être traité séparément.

Sur le territoire métropolitain, environ deux cinquièmes de la superficie peut être considérée comme karstique (Audra 2010, Figure 1) ; cependant l'intensité de la karstification est très variable (grande diversité des karsts). On distingue les karsts des chaînes plissées des karsts de plateaux et plaines, plus étendus et souvent sous couverture.

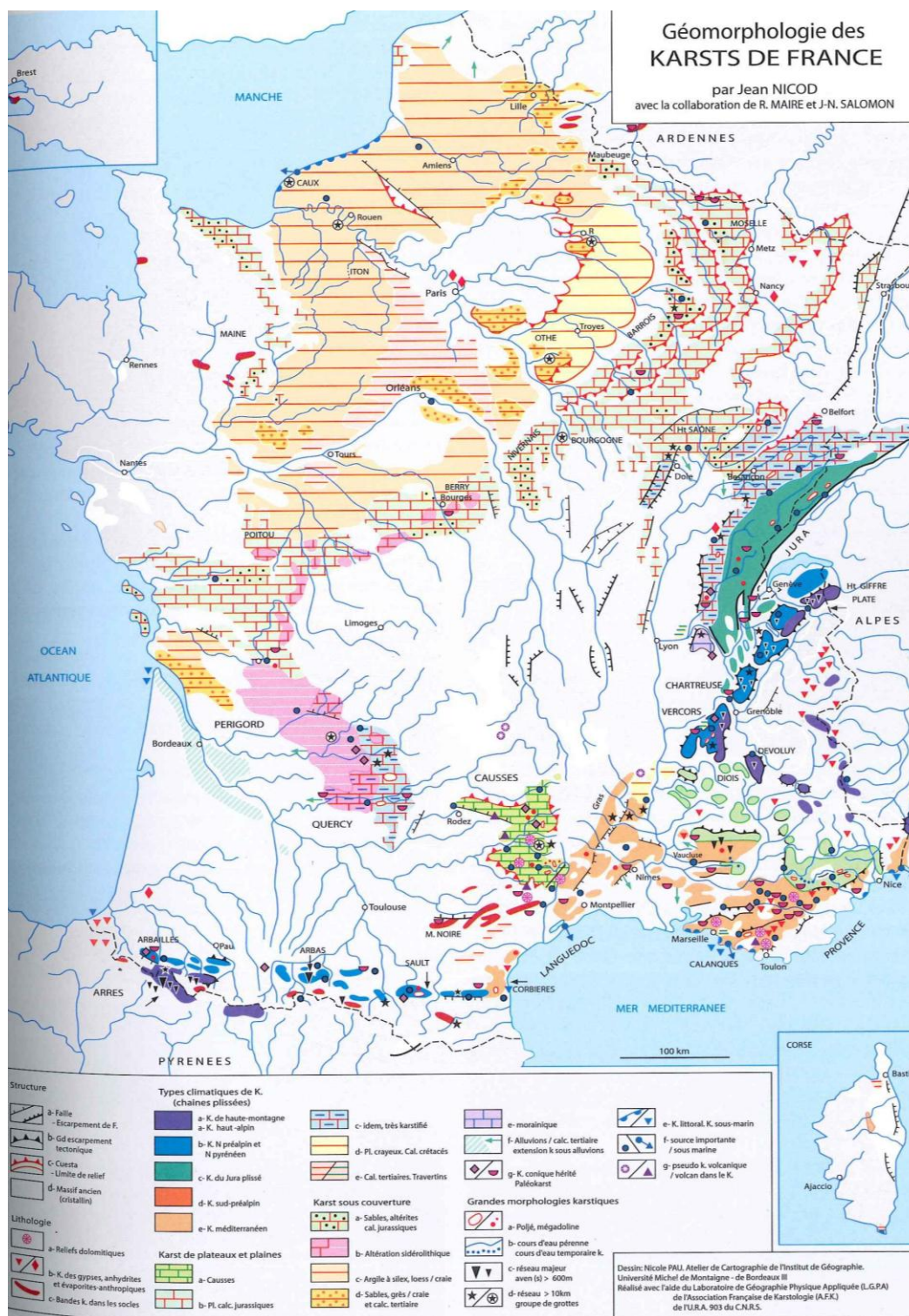


Figure 1 : Carte géomorphologique des karsts de France (Nicod in Audra 2010)

2.2. LES DÉSORDRES LIÉS AUX CAVITÉS KARSTIQUES

Les formes karstiques observées en surface (exokarst) doivent être classées en deux catégories dans le cadre d'études sur l'aléa affaissement/effondrement:

- Les formes stables telles les dolines colmatées, les gouffres, les grottes, les vallées sèches qui ne présentent pas un risque sur une période centennale.
- Les formes instables qui constituent des désordres en surface : dolines actives, fontis, pertes, inversacs.

Ce chapitre est essentiellement consacré à ce deuxième type de formes.

En contexte calcaire, les désordres en surface sont causés par l'instabilité des terrains sus-jacents aux vides karstiques préexistants¹. La création de désordres par des nouveaux vides dans les calcaires est peu probable car les vitesses de dissolution du calcaire sont trop faibles pour développer de nouveaux vides à l'échelle de la garantie centennale demandée pour une carte d'aléa. Les vides karstiques constituent naturellement un point de faiblesse mécanique des terrains. Ces vides peuvent soit se manifester en surface (dolines, pertes, émergences, inversacs, gouffres, avens, puits, grottes, etc.) soit sous le toit du calcaire (cavité, conduit, galerie). Dans le premier cas, les vides sont directement observables en cas d'absence de couverture coiffant le karst, dans le second cas les vides ne peuvent être reconnus que par des investigations spéléologiques, géophysiques ou géotechniques.

Les désordres les plus fréquents sont les dolines qui peuvent avoir des origines et des formes variées. La classification des dolines la plus utilisée est celle proposée par Williams (1993), Waltham *et al.* (2005), Waltham (2008). Elle comprend six types de dolines différenciées sur la base des processus de formation et du contexte géologique (Figure 2) :

En contexte de karst nu :

- doline de dissolution (solution sinkhole en anglais),
- doline d'effondrement ou effondrement généralisé (collapse sinkhole).

En contexte de karst sous couverture :

- doline enfouie (buried sinkhole),
- doline d'effondrement sous couverture compétente ou fontis localisé (caprock sinkhole),
- doline de soutirage (subsidence suffosion sinkhole),
- doline de soutirage avec débouillage ou fontis localisé (subsidence dropout sinkhole).

A chaque type de dolines est associé des spécificités telles que vitesse de formation, tailles maximales, nature de l'aléa (Annexe 1).

¹ La présence et l'évolution des vides karstiques sont abordés dans le rapport final de l'année 1 du projet (Perrin *et al.* 2013) dans le chapitre 2.2 : présence et répartition des vides karstiques (spéléogenèse & karstification proche de la surface).

En plus des dolines, les autres désordres à prendre en considération sont les pertes, dolines-pertes et les inversacs qui constituent des points très actifs d'un point de vue hydrologique et propices aux instabilités, et les gouffres : conduits verticaux qui peuvent être colmatés et représenter un désordre potentiel s'ils débourent.

Les désordres se produisant en contexte de karst nu ou de karst sous couverture se distinguent grandement par leur échelle, leur fréquence, les processus en jeu et doivent donc être abordés séparément (Waltham 2008, Annexe 1).

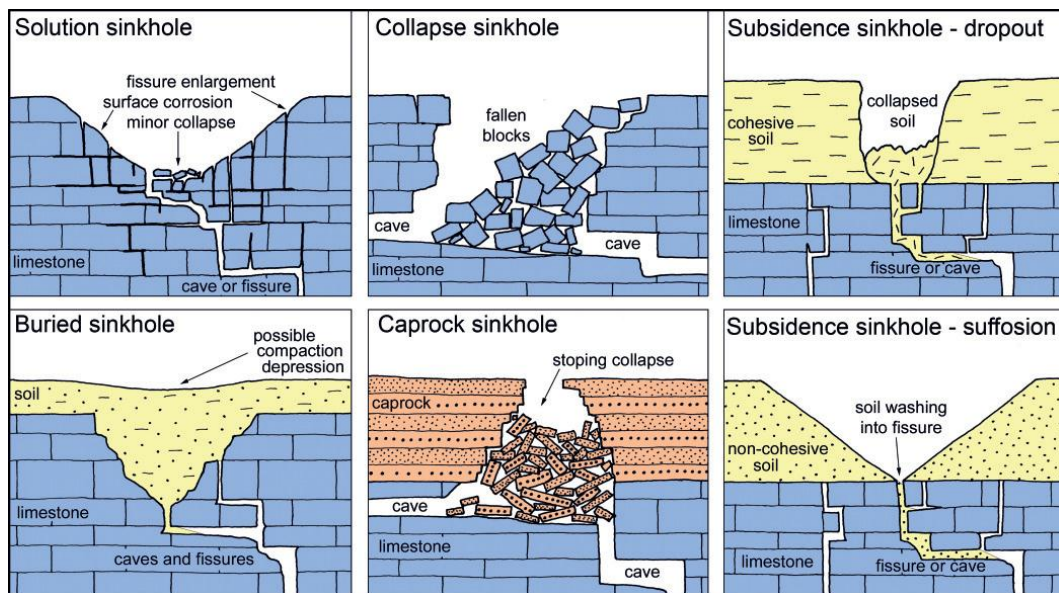


Figure 2 : Classification des différents types de dolines se développant en contexte de roches solubles.

La majorité des dolines ont des dimensions comprises entre 2 et 50 m à la fois en largeur et en profondeur (Williams 1993, Waltham 2008). Solution sinkhole=doline de dissolution ; collapse sinkhole=doline d'effondrement ; subs. sinkhole-dropout=fontis ; buried sinkhole=doline enfouie ; caprock sinkhole=doline d'effondrement ; sub. sinkhole-suffosion=doline de soutirage

Des exemples de désordres rencontrés pour les contextes de karst nu et karst sous couverture, les aspects géotechniques des désordres et les processus déclencheurs de désordres sont abordés en détail dans le chapitre 2.3 du rapport final de l'année 1 du projet (Perrin et al. 2013). Quelques exemples additionnels sont présentés en Annexe 2 du présent rapport.

En résumé, deux grandes classes de désordres peuvent être différenciées : les dolines de soutirage incluant les fontis (contexte de couverture meuble) et les dolines d'effondrement (contexte de roche compétente), le premier étant beaucoup plus fréquent que le second (de plusieurs ordres de grandeur, Waltham 2008 et Sowers 1996). En contexte calcaire, la fréquence de l'apparition de fontis, variable en fonction du site, est de l'ordre de 1-100 fontis/km²/100 ans alors que la fréquence d'un effondrement est de l'ordre de 0.0001 effondrement/ km²/100 ans (évaluation basée sur des observations spéléologiques, Waltham et al. 2005) La prédisposition de cavités karstiques à s'effondrer apparaît donc fortement contrôlée par la présence ou non d'une couverture meuble.

Les caractéristiques géomécaniques (RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski 1989), RQD (Rock Quality Design), fracturation, cohésion, etc.) conditionnent également la probabilité d'apparition des désordres. Le degré d'évolution (maturité) du karst va également contrôler la fréquence des désordres : un karst extrême ou polyphasé aura proportionnellement plus de vides dans la masse calcaire qu'un karst juvénile.

Les caractéristiques géométriques (épaisseur des horizons lithologiques, épaisseur totale de la couverture, etc.) vont influencer la morphologie des désordres (base de mesure de l'intensité de l'aléa).

Enfin, il convient de distinguer les critères déclencheurs des effondrements/affaissements qui peuvent être d'origine naturelle (intenses précipitations, tremblements de terre) ou anthropiques (rabattement des niveaux piézométriques, modification des gradients hydrauliques, ré-infiltration des eaux, surcharge du sol).

2.3. MÉTHODOLOGIES D'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ /ALEA EFFONDREMENT DE CAVITES KARSTIQUES

2.3.1. Méthodologies d'évaluation de la susceptibilité

Les méthodologies existantes dans la littérature visent en général à l'établissement de carte de susceptibilité/aléa de dolines (sinkholes) et d'effondrements. La susceptibilité se définit comme la probabilité d'occurrence d'un effondrement en un point alors que l'aléa correspond à cette probabilité en termes quantitatifs associée à une durée (par exemple fréquence d'effondrement par km² par an). Galve *et al.* (2009) présentent une synthèse des différentes approches méthodologiques qui ont été appliquées pour évaluer la susceptibilité de formation de dolines ; ils en dénombrent cinq grandes classes :

- L'approche **déterministe** basée sur des modèles numériques ou de l'analyse de stabilité. Elle est lourde à mettre en œuvre et ne peut être mise en application qu'à l'échelle locale.
- L'approche par **zonation** basée sur des jugements d'experts qui est subjective et requiert des experts ayant une forte expérience du secteur à cartographier.
- L'approche utilisant la **distribution spatiale** des dolines existantes. Elle se base sur l'hypothèse que la probabilité d'occurrence d'une nouvelle doline est plus élevée à proximité des dolines existantes. La cartographie peut se baser sur la densité des dolines ou la distance au plus proche voisin (Figure 3). Cette approche peut s'avérer moins efficace lorsque les dolines s'alignent sur des structures linéaires (alignements). Elle nécessite également un inventaire exhaustif des désordres.
- L'approche **multicritères** (heuristique) qui sélectionne arbitrairement un certain nombre de critères explicatifs, les pondère de manière subjective pour les combiner en une carte de susceptibilité.
- Et finalement l'approche **statistique** (ou probabiliste) qui se base sur les relations statistiques entre la distribution spatiale des dolines existantes et les critères contributifs (« Favourability Functions approach » par Galve *et al.* (2008), « Logistic regression » par Lamelas *et al.* 2008).

En pratique, pour la cartographie à l'échelle de territoires, seules les trois dernières approches sont mises en œuvre (Figure 3). L'étude de Galve *et al.* (2009) compare le pouvoir prédictif de ces trois approches en comparant les cartes de susceptibilité finale avec une distribution spatiale de dolines non utilisée lors de l'analyse : il apparaît que l'approche utilisant uniquement la distribution spatiale des dolines est la meilleure en termes de prédiction cependant elle ne donne aucune information sur les critères les plus prépondérants pour la formation de nouvelles dolines et ne peut pas être utilisée pour prédire l'effet d'une modification sur un des facteurs (par exemple l'infiltration qui serait modifiée). Il convient également de relever que cette étude porte sur des petites zones (10-40 km²) en contexte d'évaporites avec une forte densité d'occurrence de dolines (jusqu'à 45 dolines par km² par an).

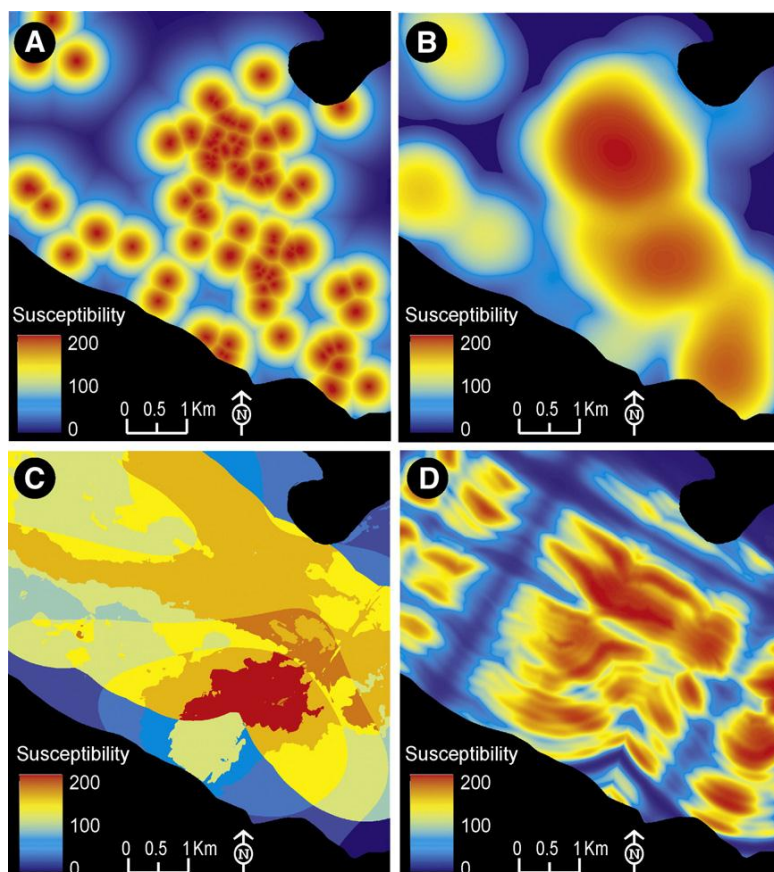


Figure 3 : cartographie de la susceptibilité d'occurrence de dolines utilisant différentes méthodes :
 A-plus proche voisin, B-densité, C-heuristique, D-probabiliste.
 Application à la région de Saragosse (d'après Galve *et al.* 2009)

Une analyse bibliographique des méthodologies existantes a été réalisée en année 1 du projet (Perrin *et al.* 2013, chapitre 2.4). Sur cette base, on constate la variété de critères explicatifs envisagés (Figure 4). Le choix des critères explicatifs est rarement explicité et seules quelques études utilisent une approche quantitative pour évaluer la pertinence des critères sélectionnés (analyse bivariable, régression logistique, Geographically Weighted Regression, Favourability Functions approach). Il convient également de noter que toutes les approches nécessitent l'existence d'un inventaire des désordres représentatifs (pas forcément exhaustifs). En outre, les critères doivent pouvoir être cartographiables. Cette contrainte peut entraîner l'abandon d'un critère par manque d'information géographiquement référencée.

Plusieurs remarques méritent d'être formulées :

- Certains critères seront fonction du contexte (par exemple indice de saturation en gypse dans les eaux souterraines dans un contexte de gypse).
- L'échelle de l'étude va conditionner en partie le choix des critères et la précision/incertitudes des cartes de susceptibilité : critère uniforme à une échelle locale (1-100 km²) n'ayant aucun pouvoir discriminant ou au contraire critère ne pouvant pas être appliqué à une échelle régionale car difficilement cartographiable.
- Seules quelques approches développées en France découplent susceptibilité de présence et susceptibilité d'effondrement (Fontaine *et al.* 2008).

Il apparaît donc opportun d'axer la réflexion sur le choix des critères explicatifs, leur évaluation, puis leur hiérarchisation (attribution de poids respectifs en fonction de leur importance relative en vue d'une cartographie de la susceptibilité).

Royaume-Uni	Espagne	Espagne	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	France	France
Farrant & Cooper 2008	Galve et al. (2009)	Lamelas et al. (2008)	Hyland et al. 2006	Orndorf et al. 2000	Doobr & Doctor (2012)	Bayle et al (2010)	Donsimoni et al (2008)
nature lithologique	gradient géologique	lithologie	lithologie	lithologie		lithologie	lithologie
bordure de couverture		stratigraphie	distance aux fractures	géologie structurale	distance aux failles	intercalations de niveaux élanches	épaisseur de la formation karstique
		fracturation			axe des plis	fracturation	intensité de la fracturation
					trace des fractures		
épaisseur de la couverture	épaisseur des alluvions		épaisseur de la couverture			épaisseur de la couverture	épaisseur de la couverture
perméabilité de la couverture	minéralogie des alluvions					prop. géotechn. couverture	prop. géotechn. couverture
topographie	topographie	pente		pente			
géomorphologie	géomorphologie						
zone aval d'une formation peu perméable	variations piézométriques	vitesse d'écoulement	distance aux cours d'eau	profondeur de nappe	profondeur de nappe	conditions d'infiltration	sens d'écoulement nappe-rivière
		position de la nappe		mares			balancement de nappe
		variation de la nappe		cours d'eau	cours d'eau		perméabilité des formations
		infiltration		sources	sources		
	conductivité électrique						
	indice de saturation du gypse					acidité des sols	
limite glaciations		événements pluvieux					
		fortes températures					
irrigation	irrigation	irrigation			carrières		
occupation du sol	occupation du sol	pompage/constructions					

Figure 4 : Tableau synthétisant les différents critères explicatifs envisagés dans les études existantes sur la cartographie de la susceptibilité de désordres d'origine karstique. Les critères sont d'ordre géologique (encaissant & couverture), géomorphologique, hydrologique et hydrogéologique, hydrochimique, climatique et anthropique

2.3.2. Méthodologies de qualification et d'évaluation de l'intensité

Comme expliqué au paragraphe précédent, la majorité des méthodologies existantes évaluent seulement la probabilité de présence des effondrements karstiques. Elles n'intègrent pas l'aspect de l'intensité des phénomènes associés. Or l'approche réglementaire actuellement utilisée en France pour la prise en compte des risques naturels consiste à croiser la probabilité d'occurrence d'un phénomène avec son intensité attendue pour aboutir à un aléa.

Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques naturels (PPR) de mouvements de terrain (1999)

Etant général à l'ensemble des mouvements de terrain, le guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques naturels (PPR) de mouvements de terrain publié en 1999 par le MEDDE propose d'évaluer l'intensité de manière représentative à l'ensemble des phénomènes *« en fonction de l'importance et de l'ordre de grandeur du coût des mesures qu'il pourrait être nécessaire de mettre en œuvre pour s'en prémunir. Des classes d'intensité croissantes peuvent être identifiées selon que ces mesures sont du ressort d'un propriétaire individuel, d'un groupement de propriétaires, d'un promoteur ou d'un aménageur, ou qu'elles débordent largement le cadre parcellaire et qu'elles nécessitent une intervention et un investissement collectifs »*. Le tableau suivant, extrait de ce guide, propose un exemple de classification d'intensité :

Niveau d'intensité	Niveau d'importance des parades	Exemples de mesures de prévention
Faible	Supportables financièrement par un propriétaire individuel.	Purge de quelques blocs instables en falaise, confortement d'une petite galerie par pilier maçonné.
Moyenne	Supportables financièrement par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif, petit lotissement).	Comblement d'une cavité souterraine, drainage d'une zone instable.
Forte	Intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire et/ou d'un coût très important et/ou techniquement difficile.	Stabilisation d'un glissement de terrain important, confortement d'un pan de falaise instable.
Majeure	Pas de parade technique.	Phénomène de grande ampleur tel que les glissements de Séchilienne ou La Clapière.

Guide méthodologique PPR cavités souterraines abandonnées (2012)

Le guide méthodologique pour l'établissement de PPR cavités souterraines abandonnées publié en 2012 par le MEDDE s'intéresse surtout aux cavités abandonnées d'origine anthropique à l'exclusion des mines (carrières, sapes de guerre, habitats troglodytiques, souterrains, refuges, etc.) mais précise que ses recommandations sont également valables pour les cavités d'origine naturelle (karst, dissolutions d'évaporites). Il demande néanmoins à être adapté pour les cavités d'origine naturelle, en particulier car les connaissances et la cinétique des phénomènes sont très différentes pour ce type de cavités. Les principes et règles qui y sont développés sont toutefois en partie applicables pour la problématique des karsts. Il est donc intéressant de les rappeler.

La définition des phénomènes est un prérequis nécessaire à la compréhension de la suite du guide. Elle est bien expliquée dans le guide. Nous ne la reprendrons pas car les phénomènes karstiques, bien différents, ont déjà été détaillés dans ce rapport (§ 2.2).

Le guide précise ainsi que « *la caractérisation d'un aléa repose [...] sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence* ».

Il définit également la « *période de référence pour identifier le niveau d'aléa* », à savoir le « *long terme correspondant à l'échelle centennale* ».

Il reprend la « *notion d'aléa de référence* » : il s'agit de « *l'aléa correspondant au plus important événement historique connu dans le site étudié, sauf si l'analyse du site conduit à considérer comme vraisemblable à échelle centennale un événement d'encore plus grande ampleur* ». Cet aléa de référence correspondra ainsi au « *niveau d'aléa le plus élevé sur le site* ».

Les principes de qualification de l'intensité sont également précisés. L'intensité caractérise « *l'ampleur des répercussions attendues* » à travers plusieurs classes d'intensité (généralement au nombre de trois : limitée / modérée / élevée et définies par des valeurs seuils) de manière à hiérarchiser les conséquences. C'est pourquoi il convient tout d'abord « *d'identifier [pour chaque phénomène redouté] la grandeur physique la plus représentative permettant de caractériser les conséquences* ». L'expert évalue ensuite « *la valeur prévisible de cette grandeur pour le site concerné* » et la « *classe d'intensité* » correspondante.

L'identification de la grandeur physique et la classification des intensités correspondantes est ainsi proposée pour chaque phénomène redouté :

- Pour les affaissements, le guide 2012 indique que les effets de mise en pente du sol sont les plus dommageables. Les valeurs seuils pour les pentes de 1, 3 et 6 % définissent 4 classes d'intensité : très limitée / limitée / modérée / élevée (Tableau 1).

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

Tableau 1 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un affaissement (PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)

Ce phénomène est en première approche similaire à plusieurs phénomènes karstiques : celui de la subsidence générée par le soutirage des matériaux d'une couverture non cohésive, celui de la subsidence générée par la consolidation des matériaux d'une doline masquée et enfin celui de la dissolution du massif rocheux (karst nu).

- Pour les effondrements, le guide 2012 indique que le diamètre influera le plus sur la sécurité des biens et des personnes. Les valeurs seuils pour les diamètres de 3 et 10 m définissent 3 classes d'intensité : limitée / modérée / élevée. Une quatrième classe est également définie pour les faibles déformations. La classification de l'intensité est ainsi la suivante (Tableau 2) :

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (flache de profondeur centimétrique)
Limitée	$\varnothing < 3 \text{ m}$
Modérée	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Elevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Tableau 2 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement
(PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)

Ce phénomène est relativement similaire à plusieurs phénomènes karstiques : celui d'effondrement du toit rocheux pour un karst nu ou un karst sous couverture, celui d'effondrement d'une cavité créée dans une couverture cohésive (= soutirage + débouillage) et enfin celui de débouillage d'un conduit karstique colmaté. Seule la classe « très limitée » pourrait être écartée. Cette dernière correspond en effet dans le guide de 2012 au phénomène d'auto comblement d'une cavité par foisonnement des matériaux effondrés. Or ce phénomène est bien moins probable dans le cas d'un karst, les matériaux effondrés étant a priori évacués petit à petit par les écoulements souterrains.

Pour les effondrements généralisés, l'évènement étant dans tous les cas de grande ampleur, le guide 2012 indique que l'intensité est d'office élevée à très élevée (aucune valeur seuil n'est proposée pour distinguer ces deux niveaux de susceptibilité, Tableau 3).

Classe d'intensité	Description
Elevée à très élevée	Effondrement en masse de la surface

Tableau 3 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un effondrement généralisé
(PPR Cavités souterraines abandonnées, 2012)

Bien qu'a priori très rare, il n'est pas exclu que ce phénomène (doline d'effondrement : collapse sinkhole, Figure 2) puisse se produire en domaine karstique. Cette possibilité devra donc être analysée et éventuellement prise en compte dans l'évaluation de l'aléa.

Autres approches d'évaluation de l'intensité

Rappel du rapport de la phase 1

Le rapport de la phase 1 de l'étude (Perrin *et al.* 2013) présente un certain nombre de méthodes géotechniques d'évaluation de la stabilité des vides (§2.3.3). On rappellera simplement ici la méthode empirique de Sowers (1996) pour les effondrements engendrés par le soutirage des terrains de recouvrement (Figure 5) : le diamètre généré en surface est proportionnel à l'épaisseur des terrains de recouvrement, le coefficient de proportionnalité dépendant uniquement de la cohésion de ces terrains.

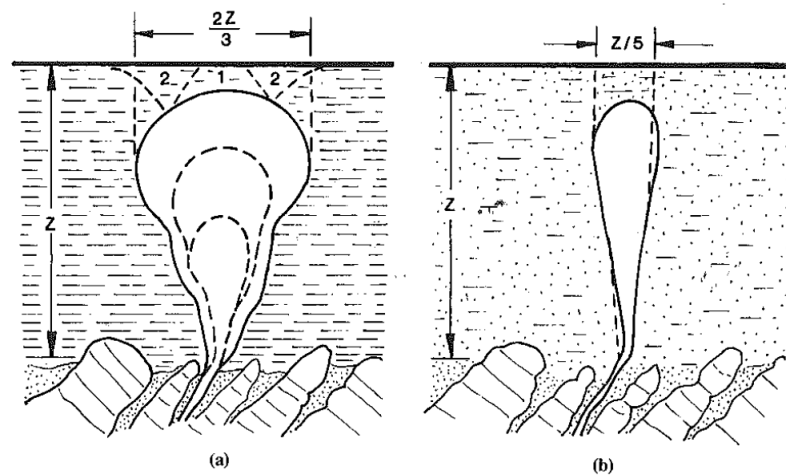


Figure 5 : Diamètre initial d'un fontis à son arrivée à la surface du sol (Sowers, 1996) :
a) Sol cohésif - b) Sol peu cohésif

Méthode utilisée en Afrique-du-Sud

Non évoquée dans le rapport de la phase 1, la méthodologie développée en Afrique-du-Sud par Buttrick *et al.* (2001) est intéressante à plus d'un titre. Elle évalue non seulement l'intensité des désordres mais en propose également une classification. Cette méthodologie propose ainsi une approche complète et opérationnelle de la gestion du risque karstique en région dolomitique. Elle a été mise en œuvre par Oosthuizen (2013) dans la zone urbanisée de Centurion, près de Pretoria (surface du site de l'étude de l'ordre de 17 km²).

Même si les termes utilisés sont légèrement différents, cette méthodologie est très similaire à ce qui est développé dans les guides français pour l'établissement de PPR. Le risque y est ainsi défini comme le croisement triple d'une probabilité d'occurrence, d'une intensité attendue pour les désordres et des enjeux possibles. Elle aboutit ainsi à un arbre décisionnel directement utilisable pour l'aménagement du territoire. Elle est enfin complétée par des recommandations en termes d'adaptations constructives à mettre en œuvre pour faire face au risque karstique. Elle est en revanche adaptée pour un seul type d'environnement karstique (karst sous couverture) et deux phénomènes : d'une part les fontis générés par l'effondrement d'une cavité créée dans la couverture (soutirage + débouillage) ou par l'effondrement d'une cavité créée dans la dolomie et d'autre part les dolines de soutirage générées par subsidence de la couverture. Mais il faut toutefois rappeler que ce type d'environnement karstique est le plus destructeur, non seulement en Afrique-du-Sud, mais aussi dans les autres régions du monde, y compris en France.

Les aspects « susceptibilité » et ceux aboutissant à la définition du risque ne sont pas détaillés ici. Pour plus de détail, nous renvoyons à l'article de Buttrick *et al.* (2001) et à l'application qu'en a fait Oosthuizen (2013). Seul l'aspect intensité (au sens français du terme) est ici présenté.

L'intensité d'un fontis pour une coupe géologique donnée est définie comme étant le diamètre maximal qu'il peut atteindre. Ce diamètre dépend des paramètres suivants :

- Profondeur des cavités pouvant générer le fontis. Deux cas peuvent être rencontrés : cavité dans la dolomie ou cavité dans la couverture.
- Angle de frottement interne des matériaux de la couverture. Des valeurs usuelles dépendant du type de matériaux peuvent être retenues.

La valeur obtenue est ensuite classée de la manière suivante (Tableau 4) :

Diamètre maximal	Terminologie proposée
< 2 m	Petit fontis
2 m < Ø ≤ 5 m	Fontis de taille moyenne
5 m < Ø ≤ 15 m	Grand fontis
Ø > 15 m	Très grand fontis

Tableau 4 : Hiérarchisation des classes d'intensité pour un fontis (Buttrick *et al.*, 2001)

Pour ce qui concerne l'intensité d'une doline de soutirage générée par la subsidence de la couverture, Buttrick *et al.* (2001), affirme que les dimensions sont bien plus difficiles à prévoir que pour un fontis. Comme elles sont dans tous les cas de grande taille, l'intensité proposée est d'office l'équivalent de celle d'un grand fontis ou d'un très grand fontis.

Méthode utilisée aux Etats-Unis (Tennessee)

Drumm *et al.* (2009) ont développé, à travers une série de modélisations numériques, un abaque évaluant la stabilité des terrains de recouvrement d'une cavité karstique. La stabilité y est estimée en fonction de la coupe de sol (épaisseur des terrains de recouvrement, diamètre de la cavité) et des paramètres géotechniques des terrains de recouvrement (angle de frottement interne, perte de cohésion des terrains proches de la cavité) (Figure 6).

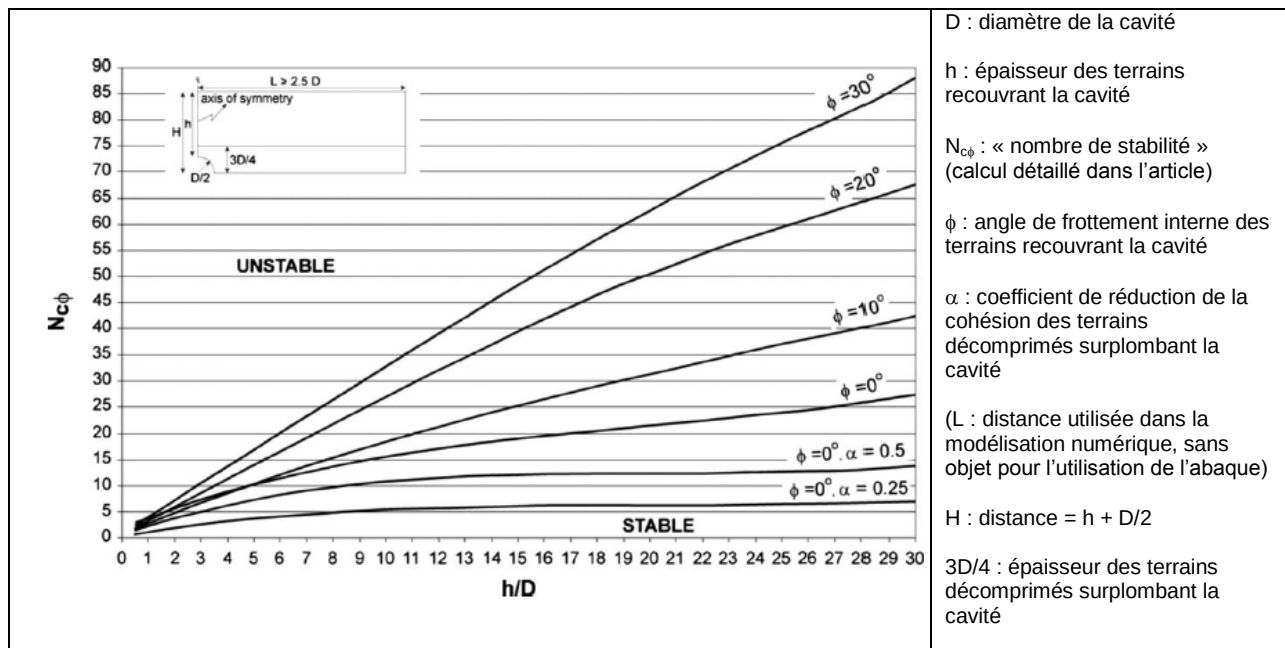


Figure 6 : Abaque d'évaluation de la stabilité des terrains de recouvrement d'une cavité karstique (Drumm *et al.*, 2009)

La principale difficulté de cette méthode consiste, selon nous, à estimer correctement le diamètre D de la cavité karstique. Cette donnée nécessite en effet, soit d'avoir un accès direct au karst, soit de réaliser des investigations de type géophysique ou géotechnique.

En outre, cette modélisation concerne uniquement les contextes de doline de soutirage avec fontis (Subsidence sinkhole - dropout figure 2), de doline d'effondrement sous couverture compétente ou fontis (caprock sinkhole, figure 2), et n'est pas adaptable aux dolines d'effondrement, ainsi qu'aux dolines de soutirage.

Synthèse

Pour être cohérent avec les méthodologies existantes et afin d'être le plus précis possible dans la gestion du risque, l'évaluation de l'intensité mérite d'être conservée pour la problématique karsts. Les principes proposés dans les guides méthodologiques des PPR français peuvent en première approche être conservés. Les règles pourraient en revanche être adaptées et s'inspirer par exemple des méthodologies sud-africaines pour ce qui concerne la classification de l'intensité des fontis et dolines.

En pratique, l'évaluation de l'intensité n'est pas si facile. Les points sensibles sont les suivants :

- Compréhension des phénomènes : Alors que l'attribution d'un type de karst à un site d'étude est relativement simple, la prévision des phénomènes aboutissant à des désordres nécessite une analyse approfondie des événements passés. Pour le site d'étude du val d'Orléans (cf. volume 2 du présent rapport), cette analyse a montré que tous les fontis n'étaient vraisemblablement pas liés à un seul et unique phénomène. Comme prévu, l'effondrement de cavités créées dans la couverture par soutirage reste la cause la plus fréquente de fontis, mais il apparaît que les fontis les plus grands, bien que rares, sont vraisemblablement liés à l'effondrement d'une cavité recoupant non seulement la couverture, mais aussi le substratum rocheux (cf. § 2.2.5 du volume 2 du rapport). La prévision de ces événements, rares mais destructeurs, doit pouvoir se dissocier de celle des événements les plus courants sous peine de surestimer le niveau d'intensité, et donc le niveau d'aléa.
- Prévision de l'intensité : De la même manière que pour la compréhension des processus, la prévision de l'intensité des phénomènes impose une analyse détaillée des événements passés.

La détermination d'une période de retour des événements n'est pas évidente car les observations ne sont pas toujours suffisamment précises ou ne balayent pas une assez longue période de temps. Pour rappel, la période de prise en compte du risque est de 100 ans.

La définition d'un aléa de référence est a priori relativement simple, à condition encore de pouvoir dissocier les phénomènes.

Lorsque les données sont nombreuses, l'évaluation de l'aléa peut être affinée. Dans ce cas, les règles existantes, empiriques (Sowers, 1996) ou déterministes (Buttrick *et al.*, 2001 – Drumm *et al.*, 2009), doivent être confrontées à la réalité pour les adapter si nécessaire. Pour cela, les données géologiques et géotechniques doivent être suffisamment nombreuses et de bonne qualité pour fournir une coupe géotechnique des terrains jusqu'à l'horizon karstique. Pour le site d'étude du val d'Orléans, les dimensions disponibles pour les fontis ont permis de proposer une règle simple pour l'évaluation de l'intensité.

2.3.3. Méthodologies d'évaluation de l'aléa

L'aléa effondrement est déterminé par le croisement de la susceptibilité (probabilité d'occurrence spatiale), de l'intensité du phénomène (dimensions) et de la probabilité d'occurrence temporelle (période de retour). La période de retour est généralement très difficile à évaluer, les méthodologies classiquement utilisées en France dans les guides méthodologiques pour l'établissement des PPR préconisent de se limiter au croisement de la susceptibilité et l'intensité afin de déterminer le niveau d'aléa.

Les principes et propositions du guide pour les cavités souterraines abandonnées (2012) sont présentés ci-dessous, celui-ci étant plus appliqué à la problématique karst que celui plus général traitant des mouvements de terrain (1999).

Le principe de ce croisement est résumé par la matrice suivante (Figure 7) :

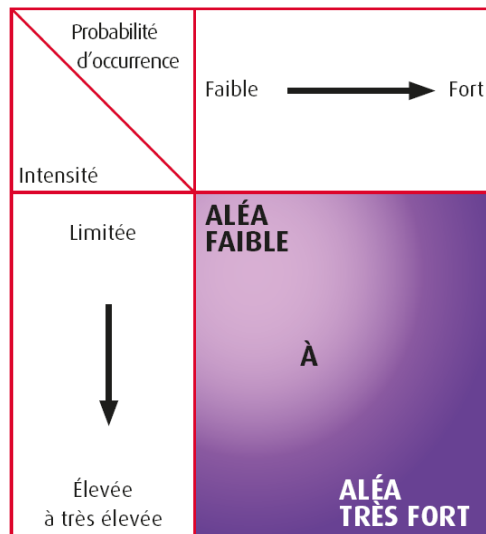


Figure 7 : Mode de hiérarchisation des classes d'aléa
(guide méthodologique PPR cavités souterraines abandonnées, 2012)

Comme précisé dans le guide, « *chaque site étant spécifique, ce type de tableau devra être adapté au contexte qui le caractérise* ». Les combinaisons possibles peuvent être nombreuses. Avec, par exemple, 4 niveaux de susceptibilité (ou probabilité d'occurrence) et 3 niveaux d'intensité, 12 combinaisons sont possibles. La méthodologie demande de regrouper ces combinaisons de manière à obtenir à 3 ou 4 niveaux d'aléa (faible, moyen, fort, très fort).

Pour les phénomènes d'affaissement, d'effondrements localisés et d'effondrement généralisés, la grille de hiérarchisation suivante est proposée (Figure 8). Il convient de rappeler que les phénomènes karstiques les plus courants sont justement similaires à ces trois phénomènes (cf. § 2.3.2).

Probabilité d'occurrence Intensité	faible	moyenne	forte
Très limitée (affaissements et effondrements autorembloyés)	faible	faible	moyen
Limitée (affaissements nets et petits fontis)	faible	moyen	moyen
Modérée (effondrements localisés)	moyen	moyen	fort
Élevée à très élevée (fontis importants et effondrement généralisé)	moyen	fort	très fort

Figure 8 : Grille de hiérarchisation des classes d'aléa pour les affaissements, effondrements localisés et effondrements généralisés (guide méthodologique PPR cavités souterraines abandonnées, 2012)

Pour le cas de cavités de dissolution liées à la présence de gypse, l'INERIS dans une étude récente utilise l'approche PPR cavités souterraines abandonnées pour proposer des cartes d'aléa (INERIS 2011) : pour les deux types de désordres (fontis et affaissements), les cartes de probabilité d'occurrence (i.e., prédisposition ou susceptibilité d'occurrence) et d'intensité de l'aléa sont croisées pour aboutir à une carte d'aléa pour les effondrements de type fontis et à une deuxième carte d'aléa pour les affaissements. L'intensité pour les effondrements est caractérisée par le paramètre diamètre (retour d'expérience et considérations théoriques) alors que l'intensité pour les affaissements est caractérisée par la mise en pente des terrains (information tirée du retour d'expérience).

En Afrique-du-Sud, le principe proposé par Buttrick *et al.* (2001) est le même mais est moins facile à comprendre à la première lecture. Il n'est pas présenté dans le détail ici. En résumé, le croisement de la susceptibilité avec l'intensité aboutit à 8 classes d'aléa numérotées de 1 à 8. Chacune de ces classes est liée à une série de recommandations pour l'aménagement urbain. Sans que cela soit explicité par Buttrick *et al.*, Oosthuizen (2013) regroupe ces huit classes en trois niveaux d'aléa : faible / moyen / fort.

3. Cadre conceptuel d'approche de l'aléa

En s'appuyant sur l'analyse bibliographique et les retours d'expérience, un cadre conceptuel est proposé ci-dessous afin de classer les karsts (plus précisément l'exokarst) dans un premier temps, puis de montrer comment ces typologies de karst influent sur l'occurrence des désordres et leur nature et **permettent d'orienter la cartographie multicritères de l'aléa**.

3.1. TYPOLOGIE DES KARSTS

Au chapitre précédent, deux grands types de karst sont distingués : les karsts nus et les karsts sous couverture. Afin de préciser la typologie des karsts sous couverture, il est proposé de définir les **karsts de contact** qui se démarquent des karsts sous couverture *sensu stricto*.

Ces karsts de contact matérialisent la transition entre un karst nu et un karst sous couverture (ou un calcaire non karstifié sous couverture peu perméable). Ils constituent les secteurs les plus propices aux pertes (Figure 9).

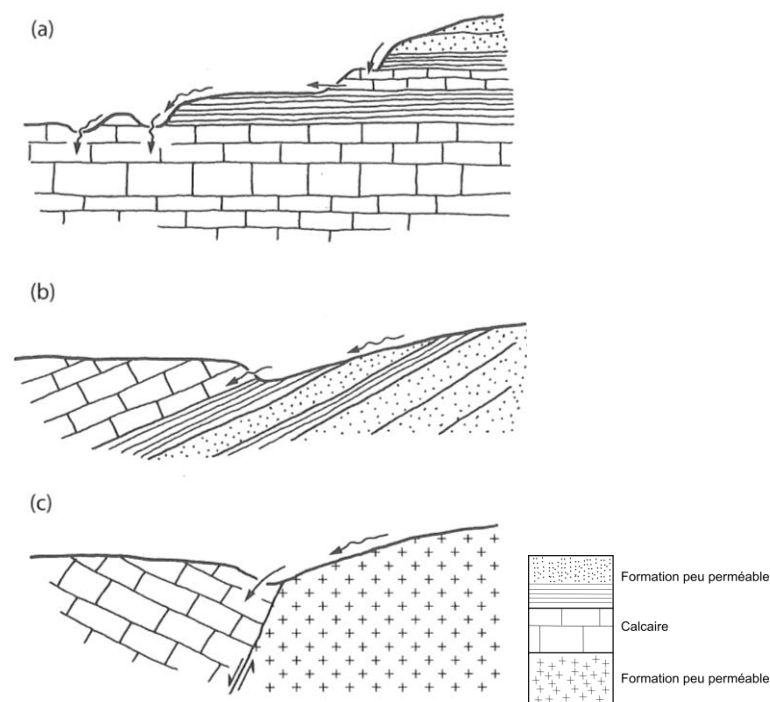


Figure 9 : Les karsts de contact peuvent se rencontrer dans trois contextes géologiques différents :
 a) contact lithostratigraphique avec calcaire en dessous des formations peu perméables (par exemple liserés karstiques de Lorraine),
 b) zones plissées mettant en relief les roches imperméables au mur du calcaire qui est au dessus dans la pile lithologique (par exemple Haut Jura),
 c) contact tectonique (par exemple plateaux de Haute-Saône) (d'après Ford & Williams 2007)

Pour toutes les régions dans lesquelles des formes karstiques en domaine carbonaté s'observent en surface, il est possible de définir quatre typologies de karst (Figure 10) :

- (1) Le karst nu caractérisé par une absence de couverture au sens lithologique du terme (ce type de karst peut être couvert de sols et/ou d'argiles de décalcification).
- (2) Le karst de contact (parfois appelé karst d'introduction) définit ci-dessus.
- (3) Le karst sous couverture perméable (par exemple alluvions).
- (4) Le karst sous couverture peu perméable (par exemple marnes ou argiles).

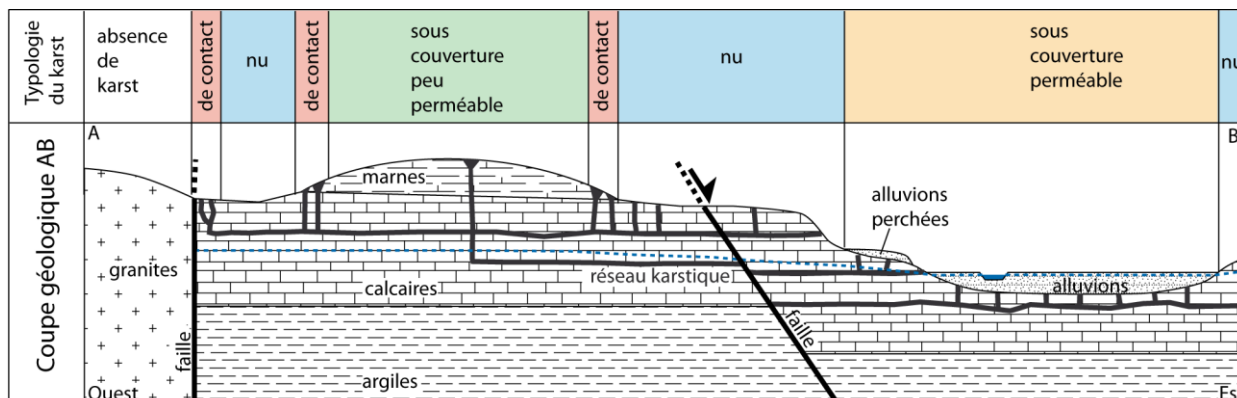


Figure 10 : Typologie du karst : 1) karst nu, 2) karst de contact, 3) karst sous couverture perméable, 4) karst sous couverture peu perméable. En noir : conduits karstiques (fissures élargies par dissolution) ; pointillés bleus : niveau piézométrique de la nappe calcaire

3.2. DESORDRES ET TYPOLOGIE DES KARSTS

Les différentes typologies de karst vont toutes présenter des formes karstiques en surface (exokarst). Il convient de bien distinguer les formes karstiques stables (grottes, gouffres, dolines de dissolution sur karst nu) des formes karstiques instables ou désordres (pertes, fontis, cône de soutirage, cuvette d'affaissement).

Une analyse bibliographique au niveau national permet d'illustrer le lien fort qui existe entre typologies et occurrence de désordres (Figure 11 et Annexe 4). Cette analyse montre la prédominance des désordres en contexte de karst sous couverture perméable (épaisseur inférieure à 30-40 m) et de karst de contact. Il convient également d'indiquer que sur les 29 désordres apparus en contexte de karst nu, au moins 10 désordres ont été déclenchés par l'activité humaine (ruissellement induit, ré-infiltration, surcharge du terrain, remblayage intempestif).

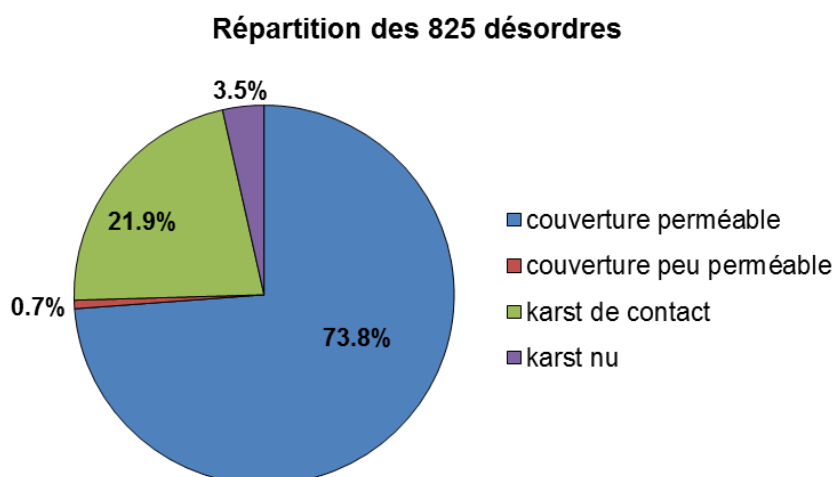


Figure 11 : Suite à une analyse bibliographique, 825 désordres décrits sur le territoire métropolitain peuvent être rattachés aux quatre typologies de karst. Une large majorité des désordres sont rencontrés en contexte de karst sous couverture perméable et karst de contact

3.3. CARACTERISATION DE L'ALEA ET CRITERES EXPLICATIFS A EVALUER

Avant d'envisager l'évaluation de l'aléa lié au karst, il s'agit de récapituler les processus conduisant à des désordres (effondrements, affaissements), définir quels processus peuvent ou nécessitent d'être évalués en terme d'aléa puis, pour les processus retenus, définir quels sont les critères potentiellement explicatifs de l'occurrence de désordres en fonction du type de karst.

Sur la base de l'étude bibliographique, la Figure 12 synthétise pour les différents processus physiques menant à l'apparition de désordres les différentes caractéristiques des désordres : mouvement de terrain, forme associée, durée du phénomène, fréquence d'apparition. Sur cette base, un aléa pourra être évalué d'une part s'il se produit à une échelle de temps humaine (100 ans), dans le cas contraire la notion d'aléa devient caduque, et d'autre part s'il peut être caractérisé (fréquence d'apparition suffisamment élevée).

- Les processus de dissolution dans les formations calcaires sont lents (>>100 ans) et donc ne constituent pas un aléa.
- Les processus de consolidation dans le cas de karst enfoui sont très imprévisibles et très peu documentés, la probabilité d'occurrence et donc l'aléa de ce processus ne peuvent pas être évalués.
- Le processus de rupture du massif rocheux est très rare et de fait la probabilité d'occurrence ne peut pas être qualifiée. L'aléa ne peut pas être évalué.

Ces deux cas (consolidation et rupture) sont supplantés par les processus de débouffage et suffosion/soutirage qui constituent l'aléa effondrement pour les différentes typologies de karst.

Processus	Mouvement de terrain engendré	Forme karstique associée	Durées (ordres de grandeur)			Fréquence d'apparition (ordres de grandeur)	Aléa	Typologie de karst
			Maturation	Apparition	Evolution			
Dissolution du calcaire	Subsidence	Doline de dissolution	Plusieurs milliers d'années			Impossible à caractériser sur 100 ans	Non caractérisable	Karst nu
Consolidation du sol de couverture (réarrangement interne des grains)	Subsidence (tassement)	Doline enfouie	Plusieurs milliers d'années	Courte à moyenne: qqs années à pls dizaines d'années		Impossible à caractériser sur 100 ans	Non caractérisable	Karst sous couverture
Erosion interne du sol non cohésif de la couverture	Affaissement	Doline de soutirage	Très courte à moyenne: qqs mois à pls dizaines d'années			10-100 dolines/km2/100 ans	Caractérisable	Karst de contact & karst sous couverture
Erosion interne du sol cohésif de la couverture	Effondrement	Fontis	Très courte à moyenne: qqs mois à pls dizaines d'années	Brutale (qqs secondes)	Très courte (qqs jours) puis ralentissant (pls dizaines d'années)	1-100 fontis/km2/100 ans	Caractérisable	Karst sous couverture
Erosion interne des terrains de remplissage du conduit karstique	Débouillage	Gouffre, perte, fontis	Plusieurs milliers d'années	Brutale (qqs secondes)	Très courte (qqs jours) jusqu'à s'arrêter aux murs du conduit	1-10 gouffres/km2/100 ans	Caractérisable	Tous mais processus dominant en karst nu
Rupture du massif rocheux (montée de voute, rupture brutale)	Effondrement	Doline d'effondrement	Plusieurs milliers d'années	Brutale (qqs secondes)	Très courte (qqs jours) puis ralentissant (pls dizaines d'années)	Impossible à caractériser sur 100 ans	Non caractérisable	Tous

Figure 12 : Synthèse des processus menant à l'apparition de désordres, formes karstiques associées, évolution temporelle des désordres, fréquences d'apparition et caractérisation de l'aléa. (qqs=quelques ; pls=plusieurs). Erosion interne = suffosion/soutirage

La Figure 13 présente les différents processus déclencheurs identifiés conduisant à l'apparition de désordres en fonction de la typologie du karst et pour lesquels une évaluation de l'aléa est possible. Cette synthèse est réalisée sur la base de l'étude bibliographique et des observations et analyses faites sur les sites tests. Ne sont traités que les désordres apparaissant en conditions naturelles (dans la perspective de la caractérisation de l'aléa) ; le facteur humain peut accélérer les processus par modifications des contraintes en surface (lors de constructions) ou modifications des écoulements en surface voire dans le karst.

En contexte de karst nu, le phénomène pouvant entraîner un désordre est le débouillage soit par infiltration d'eau en surface, soit par remontée de nappe lors d'une crue karstique. En conditions naturelles, le processus est extrêmement rare, toutefois une intervention humaine peut l'accélérer (réinjection d'eau pluviale dans une doline par exemple).

En contexte de karst de contact et de karst sous couverture, les processus de suffosion/soutirage sont prépondérants dans l'apparition des désordres qui prennent la forme de dolines de soutirage ou de fontis (effondrements localisés suite à la remontée d'une cloche de fontis créée par soutirage/suffosion) en fonction des propriétés géomécaniques de la couverture. Le débouillage par fluctuations de nappe peut aussi se produire mais est beaucoup moins fréquent.

Il s'avère donc qu'un mouvement de terrain pour lequel l'aléa peut être caractérisé domine pour chaque typologie de karst : débouillage en contexte de karst nu, affaissement en contexte de karst de contact et effondrement en contexte de karst sous couverture. De fait, une seule carte d'aléa doit en principe permettre de caractériser les mouvements de terrain d'origine karstique (i.e., si plusieurs phénomènes étaient dominants dans une typologie de karst, il faudrait élaborer une carte par phénomène).

Une liste de critères explicatifs potentiels de l'apparition de désordres est proposée pour chaque processus. Cette liste et l'indice de susceptibilité attribué aux critères ont été déterminés lors du développement et de la validation de l'approche sur les sites expérimentaux (cf. volume 2 du rapport). Au final les critères retenus sont :

- Pour le karst nu, il s'agit de secteurs où l'infiltration des eaux de surface se concentre : zones construites, bords de route, proximité de cours d'eau, dépressions et la proximité de discontinuités géologiques (failles, fractures) qui constituent également des points d'infiltration. Dans le cas de débouillage par remontée de nappe, le critère profondeur de la nappe karstique est prépondérant.
- Pour le karst de contact, les critères sont la pente (favorise le soutirage/suffosion), la nature lithologique de la couverture et son épaisseur.
- Pour le karst sous couverture, les critères sont la typologie de la couverture (perméabilité, position de la nappe), l'épaisseur de la couverture, la distance aux cours d'eau et aux discontinuités géologiques qui constituent des secteurs favorisant l'infiltration.

Typologie Karst	Mouvement de terrain	Processus déclencheurs	Morphologie des désordres	Paramètres qui conditionnent l'apparition	Critères explicatifs potentiels
Karst nu	Débourrage	Infiltration	Doline de dissolution, doline perte, gouffre	Diamètre & épaisseur du bouchon argileux (1)	Distance aux failles/fractures, secteurs à infiltration concentrée (routes, zones construites, cours d'eau, dépressions)
		Fluctuations de nappe	Inversac	(1) & nappe peu profonde	Profondeur de la nappe
Karst de contact	Affaissement	Infiltration / Gravié	Doline de soufrage, doline perte, perte, gouffre	Epaisseur de la couverture et caractéristiques mécaniques des terrains meubles (3)	Pente, épaisseur de la couverture, lithologie de la couverture
Karst sous couverture	Efondrement	Infiltration / Gravié; variations pression hydrostatique	Doline de soufrage, doline enfouie, fontis, doline perte, perte	(3)	Typologie de la couverture, épaisseur couverture, distance aux cours d'eau, distance aux failles/fractures
	Débourrage	Fluctuations de nappe	Inversac	(1)	Profondeur de la nappe

Figure 13 : Tableau de synthèse récapitulant les processus menant à des désordres en fonction de la typologie du karst et les critères explicatifs potentiels à l'apparition de désordres

4. Trame méthodologique pour l'évaluation de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques

La trame méthodologique proposée s'appuie sur le cadre conceptuel développé au chapitre précédent et sur les études de site présentées dans le volume 2 du rapport pour lesquelles les différentes typologies de karst sont représentées (Val d'Orléans, Lorraine, Franche-Comté, Landes). Pour chacun des sites, une analyse statistique a été réalisée afin de déterminer quels sont les critères explicatifs à retenir pour chaque typologie dans le cadre de l'approche multicritères. Le détail de ces analyses statistiques est également présenté dans le volume 2 du rapport.

L'approche se déroule en plusieurs étapes résumées par la Figure 14 : délimitation des zones karstiques (1.), cartographie des typologies de karst (2.), cartographie de la susceptibilité à l'effondrement par croisement et pondération de critères propres à chaque typologie de karst (3.-4.), carte d'aléa si une qualification de l'intensité des effondrements (5.) est possible, validation de la carte par comparaison avec la localisation des désordres connus. Pour illustrer ces étapes, un site d'étude théorique est utilisé (Figure 15). La coupe géologique de ce site est donnée à la Figure 10.

L'approche proposée peut être mise en œuvre **en utilisant essentiellement des informations existantes** : cartes géologiques, MNT, bases de données nationales (BD-cavités, BD-mvt, BSS), données bibliographiques. Toutefois il peut être nécessaire, surtout dans le cas d'une étude à l'échelle locale, d'inclure un travail de terrain comprenant la cartographie de la fracturation et des contacts géologiques (couverture) afin de préciser les contours des cartes existantes. L'observation des formes karstiques et des désordres peut en outre apporter des éléments de compréhension additionnels utiles à l'étude.

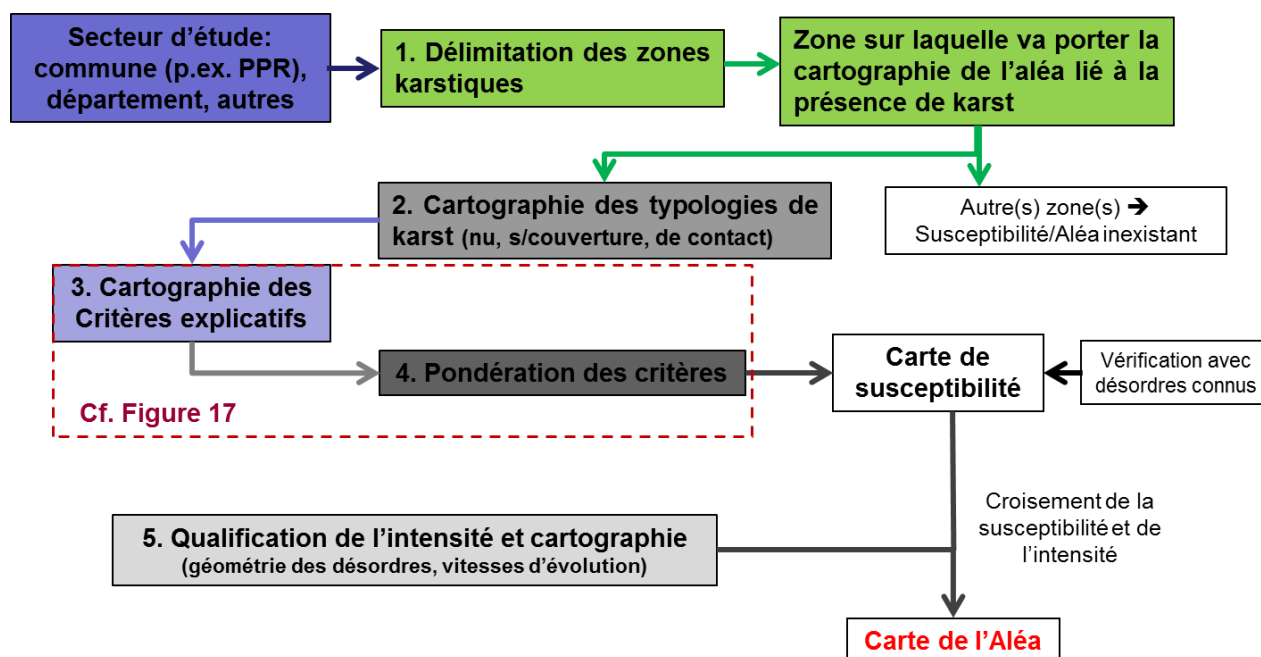


Figure 14 : Trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa effondrement lié à la présence de karst

4.1. DELIMITATION DE LA ZONE KARSTIFIEE

Au sein du secteur d'étude, il s'agit de délimiter la ou les zones karstifiées, c'est-à-dire pour lesquelles il existe des manifestations de formes karstiques en surface. Hors de cette zone, il est tout à fait possible que le massif soit karstifié en profondeur mais cette karstification profonde n'a pas d'impact en surface. Pour délimiter cette zone, il est recommandé de s'appuyer sur les bases de données nationales BD-Cavités et BD-MVT et d'en extraire tous les points correspondant à des cavités naturelles et des mouvements de terrain liés au karst. Les autres sources d'information sont les cartes topographiques IGN à 1/25 000 (dolines, bassins fermés, pertes), les cartes géologiques à 1/50 000 (dolines, pertes), les données des clubs de spéléologie (publications spéléologiques, inventaires), des publications scientifiques (thèses, rapports, etc.). La résolution et la précision des techniques actuelles de MNT Lidar permettent une cartographie exhaustive des dépressions (cf. encadré) qui peuvent ensuite être attribuées à des dolines stables ou actives par une reconnaissance de terrain. Une telle acquisition permet d'optimiser un travail de terrain. Le coût d'une acquisition Lidar devient relativement abordable (2-3 k€/km² et dégressif en fonction de la surface).

Toutes les formes karstiques inventoriées sont ensuite représentées cartographiquement pour tracer, en cohérence avec le contexte géologique, les polygones contenant l'intégralité de ces formes et qui constituera la zone karstifiée (approche par Système d'Information Géographique, SIG) (exemple Figure 15).

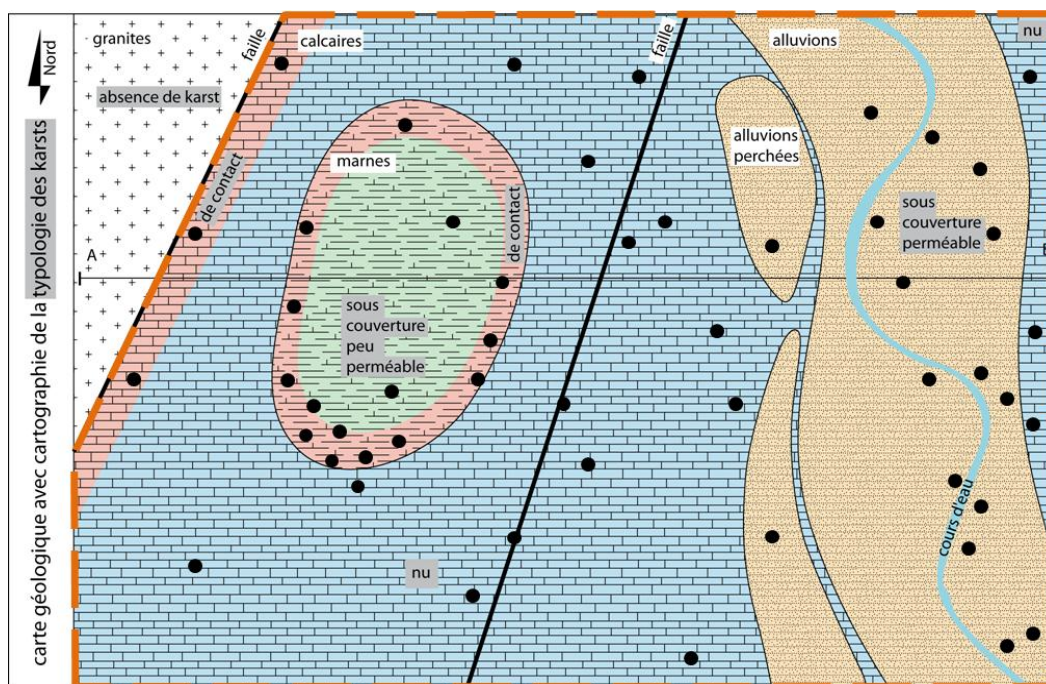


Figure 15 : délimitation de la zone karstifiée (traitillés oranges) pour le cas d'étude théorique basée sur la carte géologique et l'inventaire des formes karstiques (points noirs)

Reconnaissance de dolines dans des modèles numériques de terrain Lidar

Les modèles numériques de terrains à résolution métrique à infra-métriques, acquis par lidar aéroporté, sont suffisamment résolus et précis pour révéler les dépressions fermées (=dolines en contexte karstique) dans la topographie, y compris sous couvert forestier.

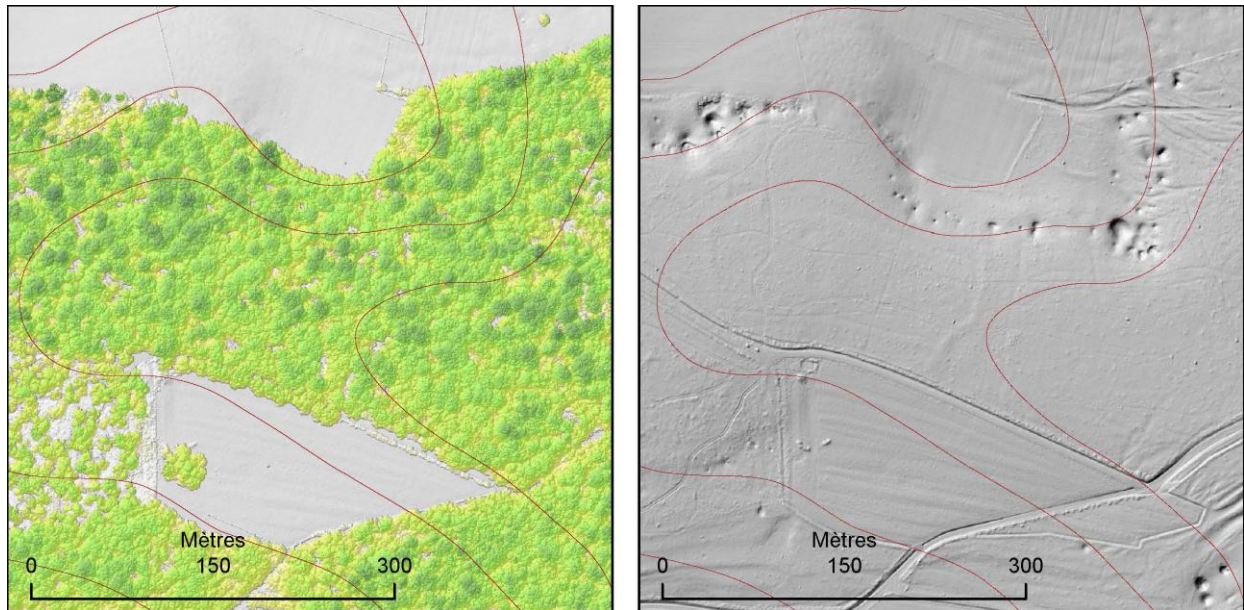


Figure 16 : Modèle Numérique de Surface – MNS (gauche – la forêt est colorée en nuances de jaune/vert) et Modèle Numérique de Terrain – MNT (droite) de la même zone à 50 cm de résolution. Les dépressions visibles dans la moitié nord du MNT sont des dolines de karst de contact. On distingue également deux chemins creux dans la partie sud du MNT. Ceux-ci sont en dépression par rapport à la topographie environnante mais ne sont clairement pas d'origine karstique. En rouge, les courbes de niveau du terrain équidistantes de 1m.

L'analyse géomatique des modèles numériques de terrain révèle la présence de dépressions fermées pouvant correspondre morphologiquement à des dolines. Au-delà de cette mise en exergue, l'analyse apporte également des mesures quantifiées de ces objets : localisation, dimension et relation spatiale avec d'autres indicateurs spatiaux comme la couche géologique, la distance à la limite entre deux formations, pente topographique du versant où elle apparaît...

Si le modèle numérique de terrain existe, l'analyse géomatique peut être conduite avant la visite de terrain du géologue. Elle sert à guider son investigation et à se focaliser sur les zones d'intérêt. L'analyse géomatique ne remplace pas le levé de terrain du géologue mais l'aide à cibler son investigation sur les zones où des indices morphologiques sont tangibles. Elle en augmente donc l'efficacité et réduit son intervention aux zones les plus utiles.

Il faut noter cependant que les dépressions fermées présentes dans le relief sont beaucoup plus nombreuses que les seules dolines : sillons et billons sur les parcelles labourées, mares et étangs artificiels, tranchées routières et chemins creux... L'œil d'un expert est donc toujours nécessaire pour trier le bon grain de l'ivraie.

4.2. CARTOGRAPHIE DE LA TYPOLOGIE DES KARSTS

A l'intérieur de la zone karstifiée définie en 4.1, les typologies de karsts doivent être cartographiées (Figure 15). Pour ce faire, la carte géologique à 1/50 000 est utilisée en reclassifiant les différentes unités géologiques en typologies de karst. Dans le cas d'une zone karstifiée relativement locale (par exemple une commune), il est vraisemblable que la cartographie géologique existante ne soit pas suffisamment précise, auquel cas des levés géologiques complémentaires pourront s'avérer nécessaires.

- La typologie « karst nu » va regrouper toutes les formations géologiques cartographiées en calcaire, voire calcaire sous faible couverture d'altérites ou de colluvions (maximum 2-3 mètres).
- La typologie « karst sous couverture perméable » va regrouper toutes les formations géologiques perméables recouvrant le calcaire karstifié.
- La typologie « karst sous couverture peu perméable » va regrouper toutes les formations peu perméables qui recouvrent le calcaire karstifié. La typologie « karst de contact » correspond aux zones de contact entre karst nu en aval et karst sous couverture peu perméable ou zones non karstiques en amont. Elle ne peut pas être dérivée de la carte géologique et sa cartographie nécessite une approche spécifique. A titre d'exemple une approche méthodologique pour la cartographie du karst de contact (outils SIG) est présentée en Annexe 3.

4.3. CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE

Pour chaque typologie de karst, les critères explicatifs de la susceptibilité/aléa vont varier puisque les processus d'apparition de désordres sont différents (Figure 13).

La Figure 17 synthétise les critères explicatifs pour chacune des typologies de karst et les indices de susceptibilité pour chaque configuration allant de S1 (susceptibilité à l'effondrement très faible) à S5 (susceptibilité très forte).

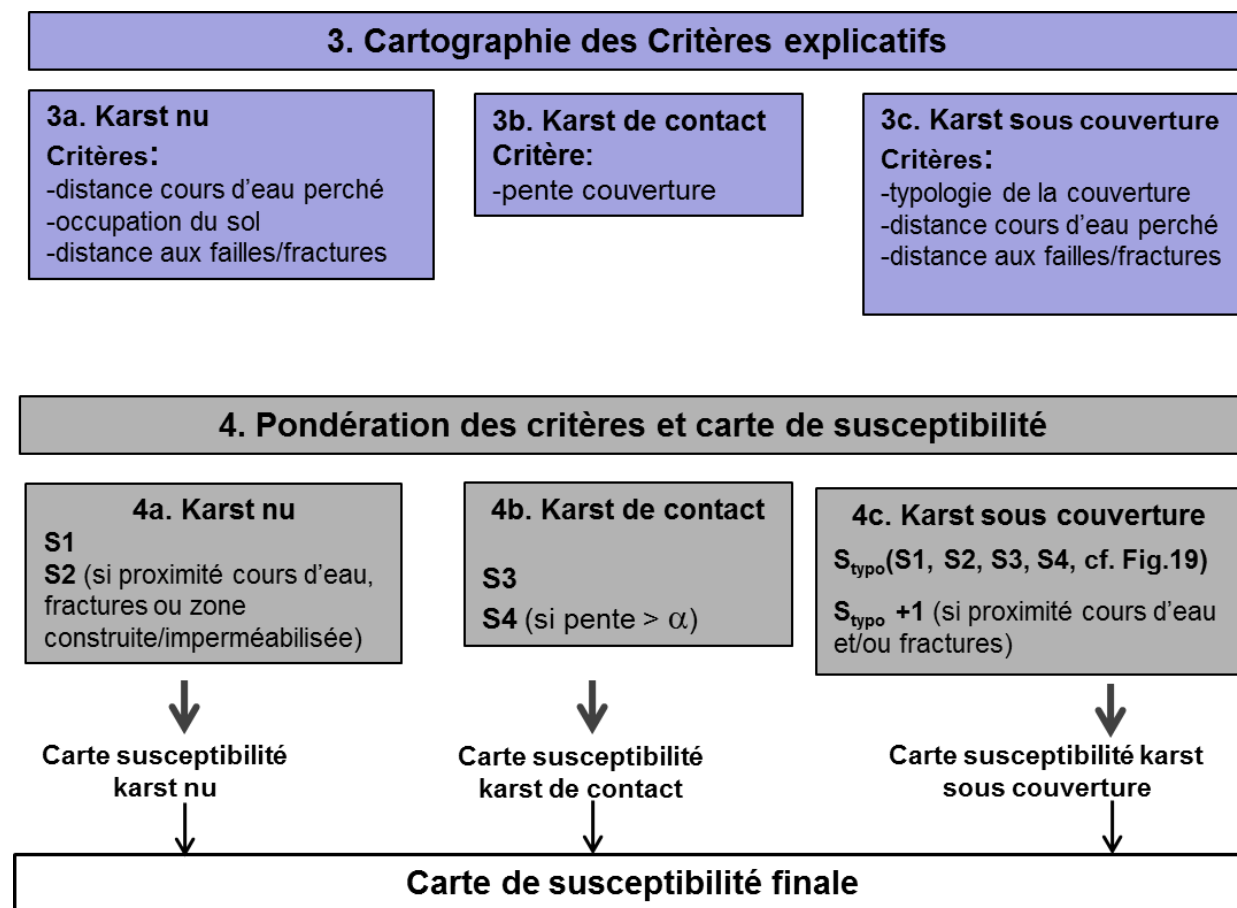


Figure 17 : Critères explicatifs pour chacune des typologies de karst et indices de susceptibilité : S1 (très faible), S2 (faible), S3 (moyen), S4 (fort) S5 (très élevé)

4.3.1. Karst nu

L'étude bibliographique et les études de sites ont montré que la susceptibilité d'apparition de nouveaux désordres est très faible en contexte de karst nu (S1).

Toutefois, la susceptibilité est majorée dans deux cas : à proximité immédiate de fractures majeures/failles qui correspondent à des zones plus karstifiées que l'encaissant et dans des secteurs où l'infiltration des eaux de ruissellement, directe ou induite, est concentrée : cours d'eau perchés, zones urbanisées, bassins fermés, terrains imperméabilisés.

Ces cas de figures sont considérés comme des critères aggravant la susceptibilité. De fait, les secteurs concernés par un ou plusieurs de ces critères seront cartographiés en susceptibilité faible (S2).

4.3.2. Karst de contact

L'étude bibliographique et les études de sites ont montré que la susceptibilité aux désordres est relativement élevée pour ce contexte avec prédominance de processus d'affaissement (dolines de soutirage). Un indice de susceptibilité S4 (susceptibilité forte) est proposé pour tous les secteurs en karst de contact ayant une pente marquée ($>\alpha$) et un indice S3 pour les secteurs à pente inexistante ou faible (Figure 18).

A titre d'exemple, l'angle α est de 4° pour l'étude de site de Lorraine (cf. Volume 2 du rapport). Il est possible que cet angle soit un peu différent sur d'autres sites. Le cas échéant, une carte des pentes combinées à une carte de la distribution des désordres doit permettre d'évaluer la pente seuil.

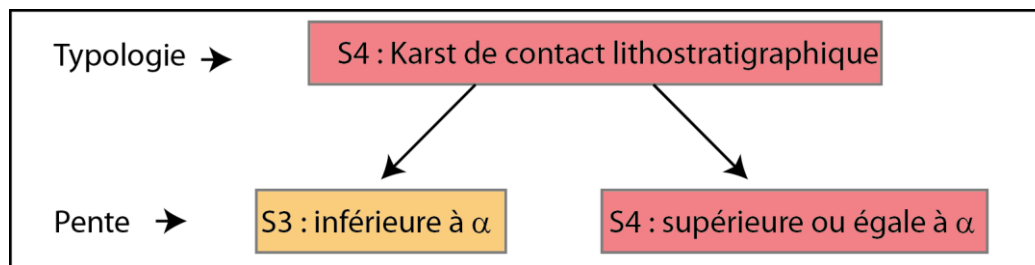


Figure 18 : Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement pour le karst de contact : seul le critère pente est utilisé comme critère protecteur avec une susceptibilité qui passe d'un indice fort (S4) à moyen (S3) dans le cas de pentes faibles ($<4^\circ$ pour le site d'étude de Vau-Vauthier, Lorraine)

4.3.3. Karst sous couverture

Suite aux études de site (Val d'Orléans (Loiret) & Roquefort (Landes)), il semble judicieux de définir une typologie des couvertures pouvant recouvrir le calcaire karstifié car les processus menant à un désordre et leur probabilité d'occurrence vont différer. Une telle approche avait déjà été proposée par Klimchouk (2005). Deux critères sont utilisés pour définir la typologie : la nature lithologique de la couverture (perméable ou peu perméable) et les conditions hydrogéologiques de la couverture et de la nappe karstique. Cela permet de distinguer (Figure 19) :

- Dans le cas d'une couverture perméable homogène, les typologies 1a : nappe dans le karst et 1b : nappe dans la couverture.
- Dans le cas d'une couverture perméable hétérogène, la typologie 2a : nappe karstique libre et 2b : nappe karstique captive.
- Dans le cas d'une couverture peu perméable, le cas Ba : avec nappe perchée et le cas Bb : sans nappe perchée.

Une susceptibilité aux désordres est associée à chacune des typologies de couverture en se basant sur les résultats des études de site : une couverture perméable présente un indice de susceptibilité plus élevé (S2-S4) qu'une couverture peu perméable (S1) car les terrains peu perméables empêchent le soutirage des particules de couverture vers les conduits karstiques.

La présence de la nappe karstique dans la couverture est un facteur aggravant car le battement de cette nappe favorise les processus de soutirage/suffosion (Cas 1b) ; au contraire la présence d'une formation peu perméable au sein de la couverture est un facteur protecteur puisque cette formation va limiter voire bloquer le flux de matière vers les conduits karstiques dû aux variations du niveau d'eau de la nappe karstique dans la couverture (cas 2a et 2b).

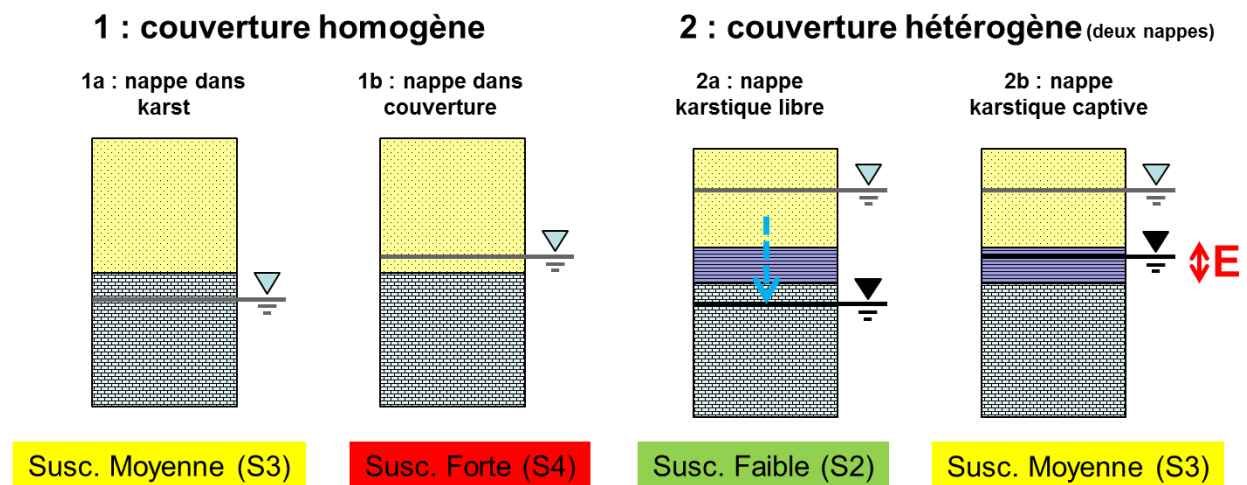
Le passage de la typologie 2a au « cas Ba » de la couverture peu perméable est transitionnel et est fonction de l'épaisseur (E) de la formation peu perméable. Le seuil d'épaisseur va dépendre du contexte local. Idem, lorsque cette épaisseur devient importante, le karst sous couverture peu perméable va passer progressivement à un contexte non karstique. Ainsi la susceptibilité est plus faible pour une couverture peu perméable (cas Ba et Bb). Le cas échéant, ces seuils d'épaisseur pourront être évalués sur la base du croisement d'une carte des épaisseurs de couverture peu perméable et d'une carte de la distribution des désordres.

Les deux autres critères à prendre en considération pour caractériser la susceptibilité à l'effondrement sont :

- la présence de cours d'eau perché qui vont favoriser le flux de matière en direction du karst,
- et la présence de fractures majeures / failles qui vont aussi créer des zones d'infiltration préférentielles pour l'eau et les matières en suspension (soutirage, suffosion) ; la présence de fractures peut par exemple annuler localement l'effet protecteur de la formation peu perméable.

Il est donc préconisé de définir des zones autour des linéaires de cours d'eau perché et des fractures majeures/failles pour lesquelles la susceptibilité à l'effondrement est majorée (critères aggravants). La largeur de ces zones peut typiquement être de 200-300 m (100-150 m de part et d'autre du linéaire).

A. Couverture perméable



B. Couverture peu perméable

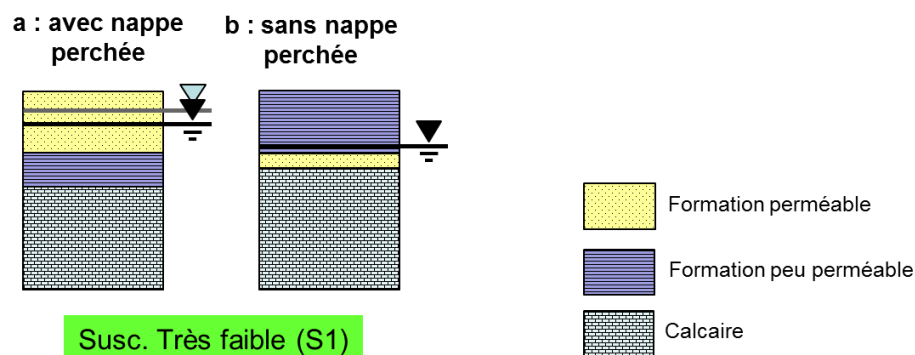


Figure 19 : Typologie de la couverture coiffant des calcaires karstifiés :

A. Couverture perméable ; B. Couverture peu perméable. Un seuil d'épaisseur (E) détermine le passage de la typologie 2b à la typologie couverture peu perméable (Ba) puis à un contexte non karstique lorsque E devient trop important

Les cartes de susceptibilité obtenues pour les différentes typologies de karst sont ensuite assemblées pour obtenir une carte finale de susceptibilité aux désordres (Figure 20).

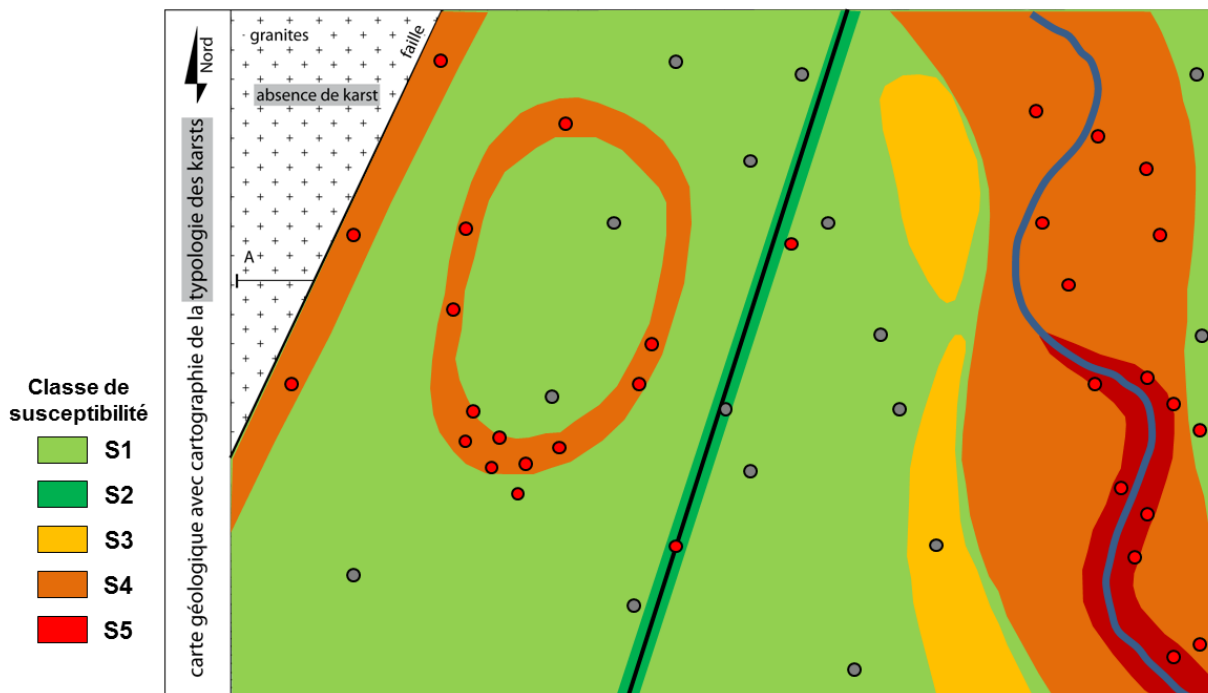


Figure 20 : Carte de susceptibilité aux désordres pour le cas d'étude théorique. Points gris : formes karstiques stables ; points rouges : désordres (dolines de soutirage, fontis, pertes). Les classes de susceptibilité vont de 1 (susceptibilité très faible) à 5 (susceptibilité très forte)

4.4. CARTOGRAPHIE DE L'INTENSITE

L'intensité d'un désordre dépend de la typologie du karst et du type de phénomène s'y produisant. Suivant la méthodologie pour l'établissement des PPR cavités souterraines abandonnées, l'intensité de chaque type de désordre doit être qualifiée en fonction de « la grandeur physique la plus représentative pour en caractériser les conséquences » puis quantifiée sur la zone d'étude et affectée d'un niveau d'intensité caractéristique. Les phénomènes karstiques étant pour partie proches de ceux décrits dans le guide PPR, on peut conserver les grandeurs physiques proposées dans le guide :

- Pour les effondrements (par soutirage + débouillage et par rupture du massif rocheux) : le diamètre.
- Pour les affaissements (doline enfouie et doline de soutirage) : la mise en pente des terrains.

Ces valeurs seront quantifiées de préférence au moment où les désordres sont les plus dommageables :

- Pour le phénomène d'effondrement, celui-ci survenant brutalement puis évoluant lentement, c'est son apparition qui est la plus dangereuse.
- Pour le phénomène d'affaissement, celui-ci durant relativement longtemps, on cherchera à évaluer son intensité maximale, atteinte au moment de sa stabilisation.

La quantification de ces valeurs (diamètres et/ou pentes) peut se faire selon trois approches différentes en fonction de la disponibilité des données et du contexte géologique et karstique :

- 1) de manière déterministe (méthodes présentées au § 2.3.2 : Buttrick *et al.* - 2001, Drumm *et al.* - 2009, etc.) nécessitant une analyse approfondie (géologie, géotechnique, etc.) pouvant être délicate à mettre en œuvre.
- 2) une approche empirique (Sowers, 1996). Dans ce cas il faut confronter l'intensité prédite aux désordres réellement observés sur la zone d'étude, et si nécessaire, adapter l'approche existante au contexte local. A titre d'exemple, on pourra se référer au § 2.2.5 du volume 2 du présent rapport (site test du val d'Orléans).
- 3) dans le cas où l'une des deux premières approches ne peut pas être mise en œuvre, en particulier par manque de données géologiques/géotechniques, un retour d'expérience basé sur les désordres observables en surface peut permettre de fixer l'aléa de référence et l'intensité correspondante. Afin de ne pas surévaluer l'aléa, on veillera à retracer l'historique de chaque désordre et à estimer ses dimensions au moment de son apparition.

La classification de l'intensité des désordres peut en première approche se faire suivant les méthodologies existantes. Pour rappel (Figure 21) :

	PPR Cavités souterraines abandonnées (2012)	Méthode sud-africaine (Buttrick <i>et al.</i>, 2001)
Effondrements	3-4 classes = très limitée, limitée, modérée, élevée avec les seuils suivants : 3 et 10 m de diamètre Cf. Tableau 2	4 classes = petit, moyen, grand et très grand fontis avec les seuils suivants : 2, 5 et 15 m de diamètre Cf. Tableau 4
Affaissements	4 classes = très limitée, limitée, modérée, élevée avec les seuils suivants : 1, 3 et 6 % de pente Cf. Tableau 1	2 classes = grande et très grande doline avec le seuil à 15 m de diamètre Cf. § 2.3.2

Figure 21 : Comparaison des classifications d'intensité suivant la méthode PPR et la méthode sud-africaine

La classification sud-africaine pour les effondrements semble plus représentative que celle du PPR car elle permet de mieux distinguer les niveaux de dommage. A titre d'illustration, un fontis de 2.5 m de diamètre correspond à une intensité faible pour le PPR alors qu'il paraît assez probable que le danger associé puisse aboutir à une victime corporelle. Avec la classification sud-africaine, un tel fontis correspond à une intensité moyenne, ce qui semble plus représentatif du danger attendu.

Suivant le même raisonnement, pour ce qui concerne les affaissements, c'est cette fois l'approche PPR qui semble plus représentative, avec d'une part une classification en quatre classes d'intensité plutôt que deux suivant l'approche sud-africaine et d'autre part, avec une approche basée sur la mise en pente des terrains, paramètre a priori le plus destructeur pour ce type de phénomène.

4.5. CROISEMENT SUSCEPTIBILITE ET INTENSITE – CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Suivant la méthodologie du PPR Cavités souterraines abandonnées, la cartographie de l'aléa consiste à croiser cartes de susceptibilité et d'intensité (§2.3.3). Cette opération aboutit à une carte d'aléa pour chaque phénomène. Puisqu'un phénomène domine pour chaque typologie de karst (Figure 13), en pratique une seule carte d'aléa sera nécessaire.

Comme expliqué au § 2.3.3, le croisement de la susceptibilité avec l'intensité aboutit à un grand nombre de combinaisons possibles, qu'il convient ensuite de regrouper pour obtenir 3 ou 4 niveaux d'aléa. L'exemple donné par le guide méthodologique PPR Cavités souterraines abandonnées (Figure 8) peut servir de base de raisonnement pour l'évaluation de l'aléa en contexte karstique.

Les tableaux suivants présentent des propositions de croisements. Elles prennent en compte les différents niveaux de susceptibilité établis au § 4.3 selon la typologie de karst et les différents niveaux d'intensité proposés au § 4.4.

4.5.1. Karst nu

Pour rappel :

- Deux niveaux de susceptibilité retenus : très faible et faible.
- Un seul phénomène retenu : le débouillage : les quelques informations obtenues lors des études de site et lors de l'analyse bibliographique montre que les diamètres des effondrements résultant d'un débouillage sont modestes, en général inférieurs à 5 m.

En synthèse, les deux propositions de croisement sont les suivantes (Figure 22) :

		Méthode PPR Cavités souterraines		Méthode Afrique-du-Sud	
		Intensité (valeur du diamètre Ø)		Intensité (valeur du diamètre Ø)	
		Ø < 3 m	3 ≤ Ø < 10 m	Ø < 2 m	2 ≤ Ø < 5 m
		limitée	modérée	petit	moyen
Susceptibilité	très faible	aléa faible	aléa faible	aléa faible	aléa faible
	faible	aléa faible	aléa moyen	aléa faible	aléa moyen

Figure 22 : Karst nu : débouillage – hiérarchisation des classes d'aléa
(en vert aléa faible, en orange aléa moyen)

4.5.2. Karst de contact

Pour rappel :

- Deux niveaux de susceptibilité retenus : moyen et fort.
- Un phénomène retenu : le soutirage dont l'intensité est essentiellement caractérisé par la mise en pente des terrains (i.e., l'évolution temporelle de la pente) et de manière secondaire par le diamètre (emprise du soutirage).

A ce stade, l'intensité du soutirage est mal contrainte car il n'existe à notre connaissance pas d'étude spécifique sur le sujet. Cependant, la formation d'un cône de soutirage peut s'effectuer très rapidement (en quelques années) et la mise en pente largement dépasser 6% et atteindre donc la classe d'intensité élevée (Tableau 1). Ainsi, le niveau d'aléa final sera celui de la susceptibilité incrémenté d'un niveau, soit un aléa très fort pour une susceptibilité forte et un aléa fort pour une susceptibilité moyenne.

4.5.3. Karst sous couverture

Pour rappel :

- Cinq niveaux de susceptibilité retenus : S1 (très faible) à 5 (forte).
- Un phénomène retenu pour l'évaluation de l'aléa : effondrement par suffosion/soutirage.

En synthèse, pour les effondrements, les propositions de croisement sont les suivantes (Figure 23).

			Méthode PPR Cavités souterraines			Méthode Afrique-du-Sud			
			Intensité (valeur du diamètre $\varnothing$)			Intensité (valeur du diamètre $\varnothing$)			
			$\varnothing < 3$ m	$3 \leq \varnothing < 10$ m	$\varnothing \geq 10$ m	$\varnothing < 2$ m	$2 \leq \varnothing < 5$ m	$5 \leq \varnothing < 15$ m	$\varnothing > 15$ m
			limitée	modérée	élevée	petit	moyen	grand	très grand
Susceptibilité	S1	très faible	aléa faible	aléa faible	aléa moyen	aléa faible	aléa faible	aléa moyen	aléa moyen
	S2	faible	aléa faible	aléa moyen	aléa moyen	aléa faible	aléa moyen	aléa moyen	aléa fort
	S3	moyenne	aléa moyen	aléa moyen	aléa fort	aléa moyen	aléa moyen	aléa fort	aléa fort
	S4	forte	aléa moyen	aléa fort	aléa fort	aléa moyen	aléa fort	aléa fort	aléa très fort
	S5	très forte	aléa fort	aléa fort	aléa très fort	aléa fort	aléa fort	aléa très fort	aléa très fort

Figure 23 : Karst sous couverture, effondrement par soutirage + débouillage (couverture cohésive) – Hiérarchisation des classes d'aléa

Comme on le voit, et comme expliqué au § 4.4, l'approche sud-africaine est vraisemblablement plus représentative que l'approche PPR (classification plus détaillée et plus « révélatrice » des désordres possibles).

En pratique cependant, la qualification de l'intensité est difficile à mettre en œuvre car les désordres sont rarement documentés au-delà de leur localisation. Pour apprécier l'intensité d'un effondrement de type fontis ou débouillage, il faut connaître son diamètre lors de son apparition et non pas un diamètre mesuré plus tard, lors d'une étude de terrain par exemple, qui ne correspondra plus forcément à l'intensité réelle. En ce qui concerne les affaissements, la mise en pente semble être l'élément le plus caractéristique de l'intensité, toutefois cette mise en pente est évolutive. Il faudrait donc être en mesure d'évaluer cette mise en pente sur une certaine durée (1 an, 10 ans, etc.) et pour ce faire, des suivis de site seraient nécessaires. De fait la carte de susceptibilité pourra *de facto* être assimilée à une carte d'aléa (c'est ce qui est proposé pour les sites d'étude de Vau Vauthier et Roquefort dans le volume 2).

Pour l'exemple théorique, il est cependant possible de procéder à l'exercice de qualification de l'intensité en faisant les hypothèses suivantes (Figure 24) :

- ⇒ Karst nu : débouillage avec intensité limitée (diamètre < 3 m.).
- ⇒ Karst de contact : forte activité de de soutirage et donc une incrémentation d'un niveau par rapport à la susceptibilité (comme proposé section 4.5.2).
- ⇒ Karst sous couverture : fontis d'intensité modérée (diamètre compris entre 3 et 10 m).

Puis en combinant les cartes de susceptibilité (Figure 20) et la carte d'intensité, il est possible de proposer une carte d'aléa pour le cas d'étude théorique (Figure 25).

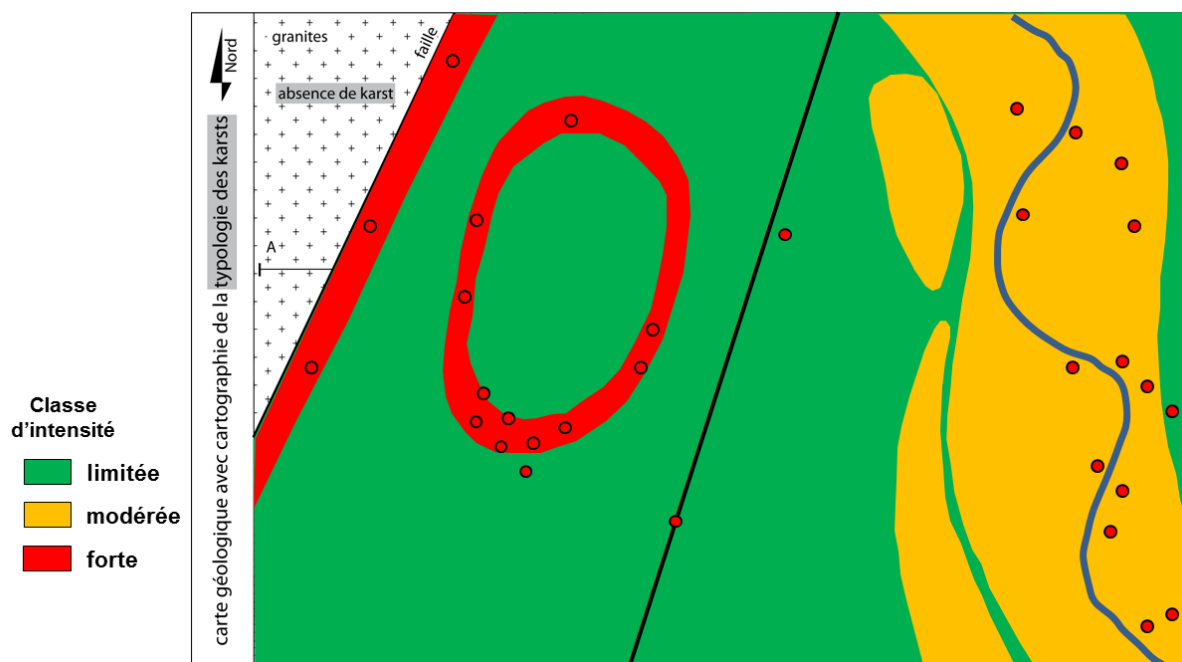


Figure 24 : Carte de l'intensité des désordres pour le cas d'étude théorique ; la classification PPR Cavités souterraines est retenue pour les classes d'intensité



Figure 25 : Carte d'aléa pour le cas d'étude théorique

4.6. VERIFICATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE/ALEA

Les cartes de susceptibilité et d'aléa méritent d'être confrontées à la localisation des désordres connus dans la zone d'étude (par exemple issu de la BD-MVT) afin de s'assurer de la cohérence de la cartographie (statistiques). A titre d'exemple, on voit pour le cas d'étude théorique (Figure 20) que la grande majorité des désordres sont situés dans les classes de susceptibilité élevées (3-4-5-6) : 30 désordres sur les 32 répertoriés et donc seul deux désordres sont situés en classe de susceptibilité faible (1-2).

Une acquisition MNT Lidar (cf. encadré, p. 39) peut permettre d'obtenir rapidement et à relativement bas coût une localisation exhaustive des dépressions sur le secteur d'étude. Cette connaissance peut ensuite permettre d'optimiser une campagne de terrain visant à extraire les désordres des autres formes en dépressions stables ou d'origine autre que karstique.

Dans la mesure où un inventaire représentatif de désordres a pu être constitué, une méthode robuste de validation de la carte de susceptibilité/aléa est la construction d'une courbe ROC qui permet de quantifier le degré prédictif de la carte. Plusieurs exemples d'application de cette méthode sont présentés dans le volume 2 du rapport.

4.7. APPROCHE REGIONALE

Sur la base de la trame méthodologique présentée, une approche simplifiée d'évaluation de la susceptibilité à l'effondrement peut être proposée à l'échelle régionale (département par exemple). Cette approche ne considère que la typologie des karsts (karst nu, de contact, sous couverture perméable, sous couverture peu perméable) qui présente chacun une susceptibilité différente (Figure 26). Un voire des critères aggravant/protecteur sont ensuite introduits pour prendre en compte différents paramètres qui peuvent influencer l'apparition des désordres tels que les caractéristiques géomécaniques du calcaire (ex. : degré de karstification, fracturation) et de la couverture, la proximité immédiate de cours d'eau perchés, des secteurs anthropisés avec de forts ruissellements induits, etc. En ce qui concerne le critère géomécanique, il est surtout applicable dans le cas où, au sein de la région d'étude, plusieurs calcaires de nature différente sont karstifiés (intensité de la karstification, calcaires massifs vs. calcaires en petits bancs ou intercalés de niveaux marneux, etc.) et/ou les lithologies des formations couvrant les karsts (nature plus ou moins perméable de la couverture, présence de nappes perchées, etc.), sont très contrastées. En principe cette approche régionale peut être mise en œuvre sur la seule base de cartes géologiques à 1/50 000, un MNT (30 m de résolution spatiale), et le cas échéant, des bases de données nationales BD-Carthage et Corine Land Cover.

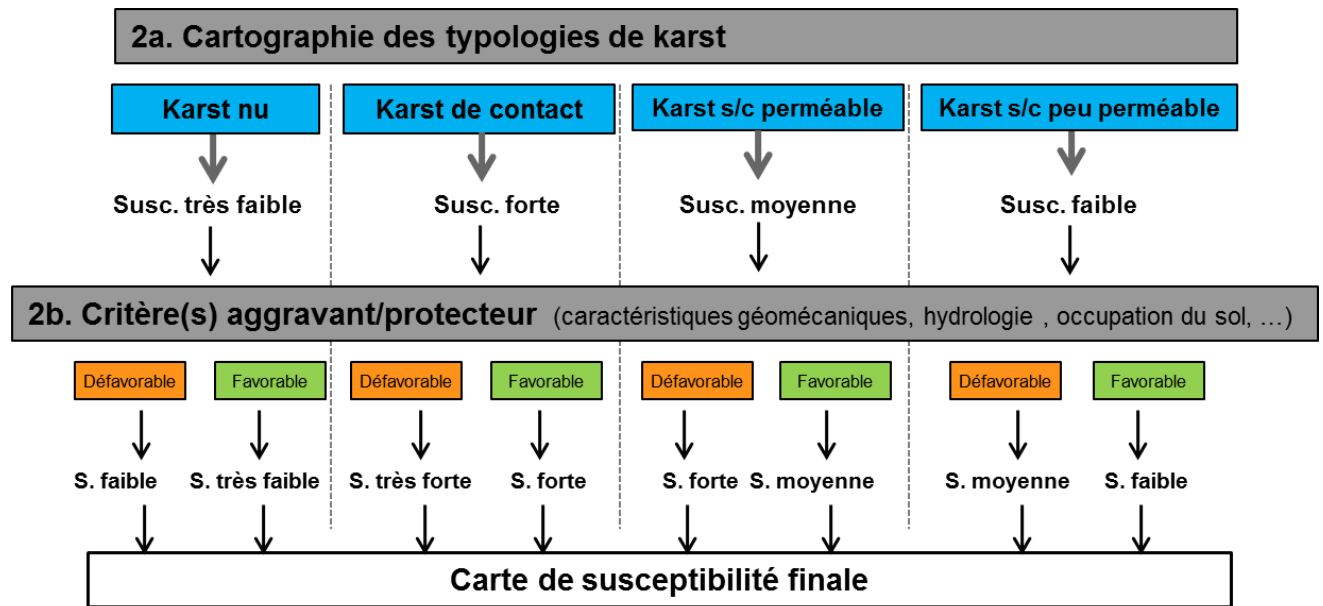


Figure 26 : Approche régionale de la cartographie de la susceptibilité à l'effondrement

5. Synthèse et conclusions

Sur la base d'une étude bibliographique (détails dans Perrin *et al.* 2013) et d'étude de sites (présentés dans le volume 2 du rapport), une trame méthodologique pour l'évaluation de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire est proposée. Cette trame propose dans un premier temps de délimiter les différentes typologies de karst présentes (karst nu, de contact, sous couverture) puis pour chaque typologie de cartographier des critères explicatifs de la présence de désordres :

- distance aux failles/fractures, cours d'eau et occupation du sol pour le karst nu,
- pente pour le karst de contact,
- distance aux failles et aux cours d'eau et typologie de la couverture (lithologie, position de la nappe) pour le karst sous couverture.

Cette méthodologie se veut pragmatique et opérationnelle : elle nécessite une cartographie géologique à 1/50 000, un MNT (25 ou 30 m de résolution spatiale²), les BD nationales Carthage³ (pour les cours d'eau) et CORINE⁴ (pour l'occupation du sol) et un logiciel SIG. Il est également recommandé d'utiliser les données du sous-sol (BSS⁵) pour préciser le contexte hydrogéologique et les BD cavités⁶ et BD MVT⁷ pour préciser les contours des secteurs karstifiés et vérifier à posteriori les cartes de susceptibilité et d'aléa.

Elle se veut applicable aux différents contextes géologiques à l'échelle nationale et a pu être élaborée avec succès sur quatre sites ayant des géologies et des contextes contrastés : Loiret, Meuse, Franche-Comté et Landes. Des valeurs seuils telles que l'épaisseur de couverture peu perméable au-delà de laquelle la susceptibilité à l'effondrement devient très faible et le critère aggravant de la pente en contexte de karst de contact peuvent varier d'un site à l'autre et nécessitent d'être ajustés au cas par cas.

A la différence d'autres approches mises en œuvre, cette trame méthodologique ne nécessite pas un inventaire représentatif des désordres qui peut être relativement difficile à constituer de manière exhaustive (données fragmentaires, campagnes de terrain fastidieuses). Un inventaire de désordres est toutefois nécessaire pour évaluer le seuil de paramètres tels que l'épaisseur de la couverture peu perméable en présence d'un karst sous couverture ou la pente critique dans le cas d'un karst de contact, et également à des fins de validation à posteriori de la carte de susceptibilité/aléa.

Un des intérêts de l'approche retenue est son caractère multi-échelles avec une approche régionale basée essentiellement sur la typologie des karsts (croisement de la carte géologique et du MNT) et une approche locale où les différents critères peuvent être appliqués permettant ainsi d'affiner le résultat final.

² ASTER 30m (gratuit : <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>), BD ALTI, IGN (payant)

³ Gratuit à l'ING : <http://professionnels.ign.fr/bdcarthage>

⁴ Gratuit au MEDDE : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

⁵ <http://infoterre.brgm.fr/dossiers-sur-le-sous-sol-bss>

⁶ <http://www.georisques.gouv.fr>

⁷ <http://www.georisques.gouv.fr>

Cette trame méthodologique pourrait être adaptée à d'autres contextes géologiques tels que la craie où les processus restent certainement en bonne partie valide. Le test sur d'autres sites permettrait de consolider l'approche et d'aboutir à une méthodologie robuste qui pourrait être présentée sous la forme d'un guide méthodologique pour la cartographie de cet aléa géologique.

Il est recommandé d'encourager les services de l'état à améliorer la bancarisation des phénomènes d'effondrement qui se produisent afin de disposer à terme d'une base de données fiable répertoriant à la fois la localisation, les dimensions (nécessaires pour qualifier l'intensité de l'aléa) et la date d'apparition. Ces données devraient alimenter la BD MVT. De telles données permettront de vérifier les cartes d'aléa et également de progresser dans la compréhension des phénomènes.

Enfin, l'exploitation des données LIDAR semble très prometteuse pour à la fois améliorer la précision des localisations des différents désordres, en obtenir un inventaire exhaustif et mettre à la lumière des formes karstiques invisibles à l'œil nu de l'expert sur le terrain. Le traitement et l'interprétation de ces données demandent encore à être développés.

6. Bibliographie

Audra P. (Dir.) 2010. Grottes et karsts de France. Association française de karstologie. Karstologia Mémoires 19: 360 p.

Bayle E., Nachbaur A., Vanoudheusden E. 2011. Evaluation de l'exposition aux risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura zone pilote (phase 1). Rapport Final. BRGM/RP-59386-F : 186 p. + annexes.

Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.

Buttrick, D.B., van Schalkwyk, A., Kleywegt, R.J. and Watermeyer, R.B. (2001) Proposed Method for Dolomite Land Hazard and Risk Assessment in South Africa, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, vol.43, no.2, pp.27-36.

Charmoille A. *et al.* 2011. Étude des processus de dissolution affectant le sous-sol du Bois de la Tussion (Seine-Saint-Denis). Évaluation de l'aléa et proposition de solutions d'aménagement adaptées. Rapport d'étude INERIS DRS-11-100905-02718A.

Doctor D.H., Doctor K.Z. 2012. Spatial analysis of geologic and hydrologic features relating to sinkhole occurrence in Jefferson County, West Virginia. Carbonates Evaporites. DOI 10.1007/s13146-012-0098-1.

Donsimoni M., Berthier H., Martin J-C., Nachbaur A. 2008. Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels. Rapport final BRGM RP-55711-FR : 179 p.+annexes.

Drumm, E. C., Aktürk, Ö., Akgün, H., & Tutluoğlu, L. 2009. Stability charts for the collapse of residual soil in karst. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 135(7), 925-931.

Farrant, A., Cooper, A. 2008 Karst geohazards in the UK : the use of digital data for hazard management. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41 (3). 339-356.

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-F : 167 p. + annexes.

Ford D., Williams P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons Ltd, England.

Galve, J.P., Gutiérrez, F., Lucha, P., Guerrero, J., Bonachea, J., Remondo, J., Cendrero, A., 2008. Probabilistic sinkhole modelling for hazard assessment. Earth Surface Processes and Landforms 34 (3), 437–452.

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 111: 160–172.

Jaillet S. 2005. Le Barrois et son karst couvert. Karstologia mémoires n°12 : 335 p.

Klimchouk A.B. 2005. Subsidence hazards in different types of karst: evolutionary and speleogenetic approach. *Environmental Geology* 48: 287-295.

Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A., de la Riva, J., 2008. Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain). *Environmental Geology* 54, 963–977.

Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie 1999. Plan de prévention des risques naturels (PPRN) : Risques de mouvement de terrain : guide méthodologique – La documentation française Paris 1999 ISBN 2-11-004354-7.

Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie 2012. Guide méthodologique Plan de prévention des risques naturels : Cavités souterraines abandonnées : 81 p.

Nicod J. 1994. Plateaux karstiques sous couverture en France. *Annales de Géographie* 103 (576) : 170-194.

Oosthuizen, AC 2013, The hazard of sinkholes formation in the Centurion CBD and surrounding areas : Pretoria, Gauteng, MSc dissertation, University of Pretoria, Pretoria, viewed 18/09/2014<<http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-05152013-162612/>>

Orndorff, R.C., Weary, D.J., Lagueux, K.M., 2000. Geographic information system analysis of geologic controls on the distribution of dolines in the Ozarks of South Central Missouri. *Acta Carsologica* 29, 161–175.

Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Van Laere A. 2013, ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques. Année 1 : bibliographie et étude de sites - Rapport BRGM/RP-62595-FR

Sowers G. F. 1996. Building on sinkholes. ASCE Press, New York.

Waltham, A.C. 2008. Sinkhole hazard case histories in karst terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 41: 291-300.

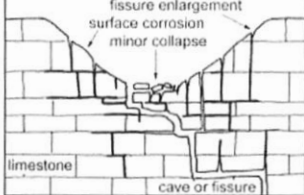
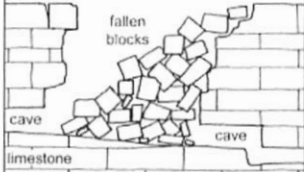
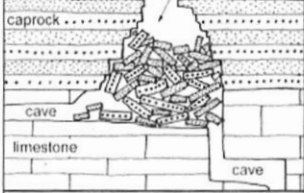
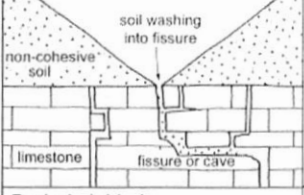
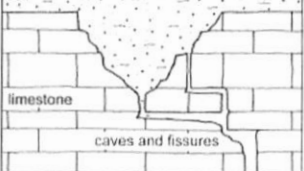
Waltham A.C., Fookes P.G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36: 101-118.

Waltham A.C., Bell F.G., Culshaw M.G. 2005. Sinkholes and Subsidence : karst and cavernous rocks in engineering and construction. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK : 382 p.

Williams, P.W. (ed). 1993. Karst terrains, environmental changes and human impacts. *Catena Supplement* 25: 268 p.

Annexe 1

Classification des dolines et paramètres décrivant leurs spécificités et schémas de l'évolution de dolines de soutirage, de fontis, et de dolines d'effondrement (Waltham et al. 2005)

 Solution sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Dissolutional lowering of surface Limestone, dolomite, gypsum, salt Stable landforms evolving over >20,000 years Up to 1,000 m across and 100 m deep Fissure and cave drains must exist beneath floor Dissolution s/h, cockpit, doline
 Collapse sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Rock roof failure into underlying cave Limestone, dolomite, gypsum, basalt Extremely rare, rapid failure events, into old cave Up to 300 m across and 100 m deep Unstable breakdown floor; failure of loaded cave roof Cave collapse s/h, cenote
 Caprock sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Failure of insoluble rock into cave in soluble rock below Any rock overlying limestone, dolomite, gypsum Rare failure events, evolve over >10,000 years Up to 300 m across and 100 m deep Unstable breakdown floor Subjacent collapse s/h, interstratal karst
 Dropout sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Soil collapse into soil void formed over bedrock fissure Cohesive soil overlying limestone, dolomite, gypsum In minutes, into soil void evolved over months or years Up to 50 m across and 10 m deep The main threat of instant failure in soil-covered karst Subsidence s/h, cover collapse s/h, alluvial s/h
 Suffosion sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Down-washing of soil into fissures in bedrock Non-cohesive soil over limestone, dolomite, gypsum Subsiding over months or years Up to 50 m across and 10 m deep Slow destructive subsidence over years Subsidence s/h, cover subsidence s/h, alluvial s/h
 Buried sinkhole	<i>Formation process</i> <i>Host rock types</i> <i>Formation speed</i> <i>Typical max size</i> <i>Engineering hazard</i> <i>Other names in use</i>	Sinkhole in rock, soil-filled after environmental change Rockhead depression in limestone, dolomite, gypsum Stable features of geology, evolved over >10,000 years Up to 300 m across and 100 m deep Local subsidence on soft fill surrounded by stable rock Filled s/h, compaction s/h, paleosinkhole

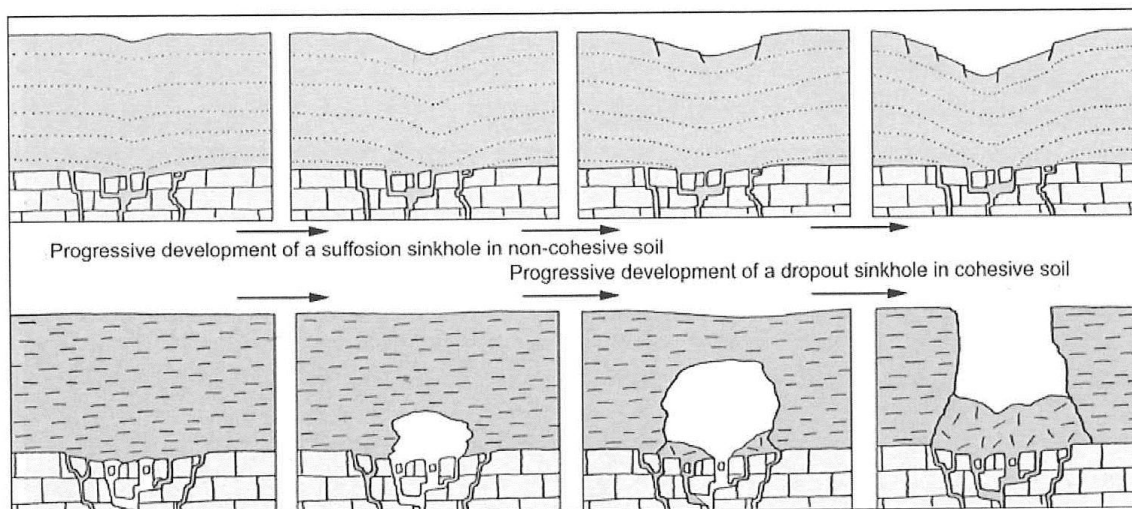


Figure 4.6. Sequences of progressive development of subsidence sinkholes, represented by stages in the two end members of morphologies, forming by perfect particulate suffosion in a non-cohesive sandy soil (above) and by dropout over an expanding soil cavity in a cohesive clay (below).

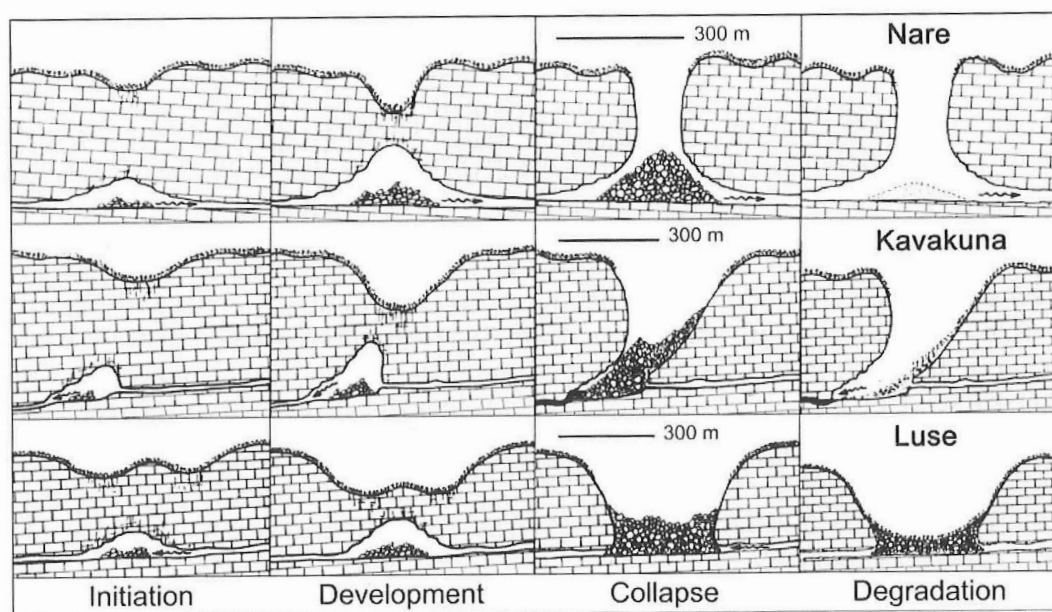
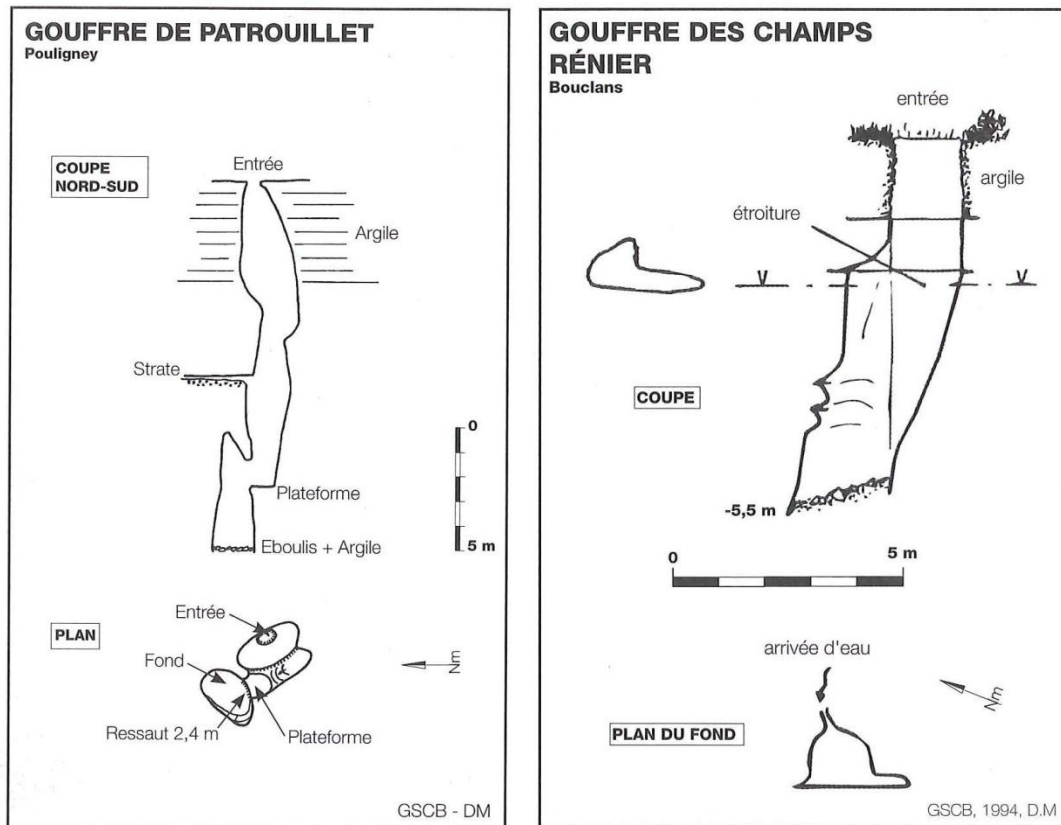


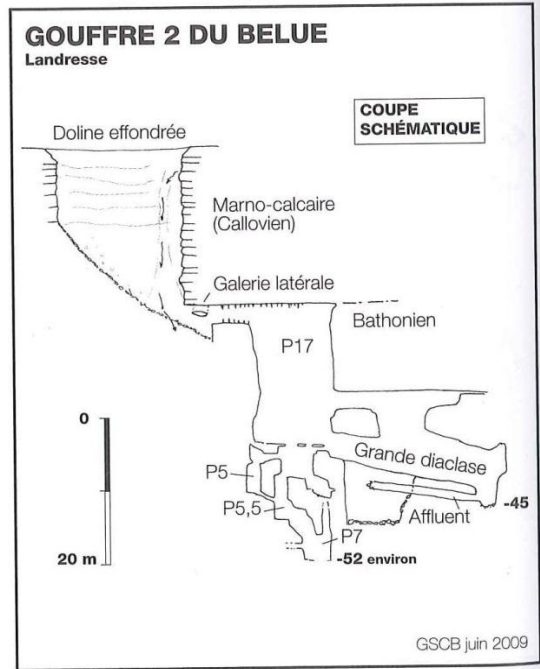
Figure 3.14. Four stages in the conceptual evolution of three of the tiankengs in the Nakanai karst of New Britain.
After Maire (1981).

Annexe 2

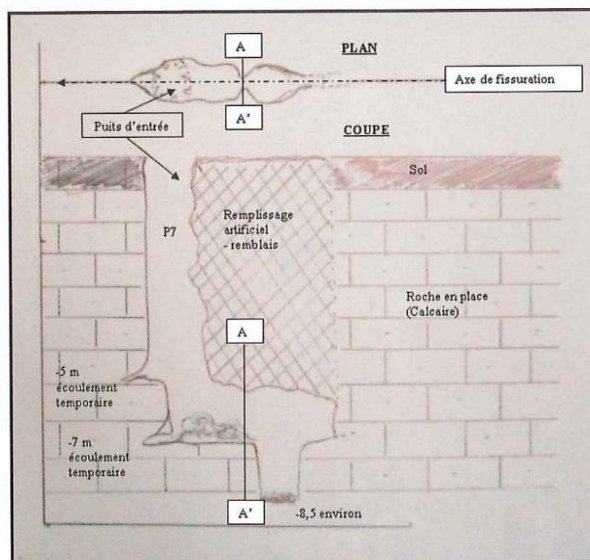
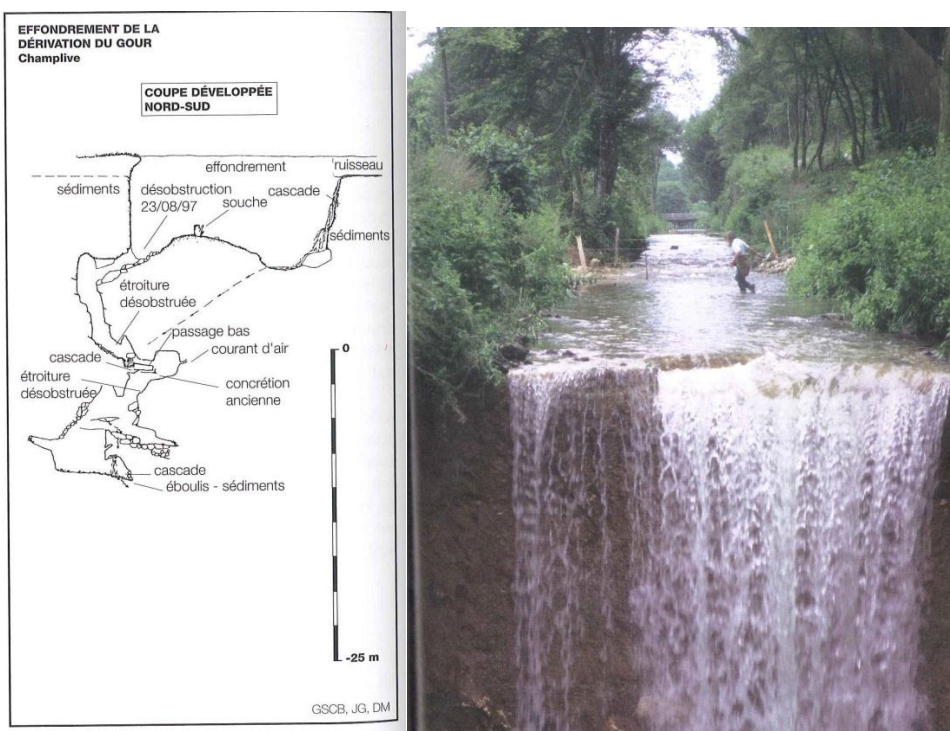
Exemples de désordres pour différentes typologies de karst (Département du Doubs)



*Exemples d'ouverture brutale de gouffres par déboufrage d'une couverture argileuse dans un contexte de karst de contact (gouffre de Patrouillet) et de karst nu (gouffre des Champs Rénier).
Source : Inventaire spéléologique du Doubs, T5, GIPEK*



Exemple d'un effondrement brutal par montée de voûte probable dans une couverture marno-calcaire. L'effondrement s'est produit au fond d'une doline pré-existante au cours de l'hiver 2007-2008 dans un contexte de karst de contact. Il semble que les infiltrations d'eau aient contribué à l'effondrement. Source : Inventaire spéléologique du Doubs, T5, GIPEK

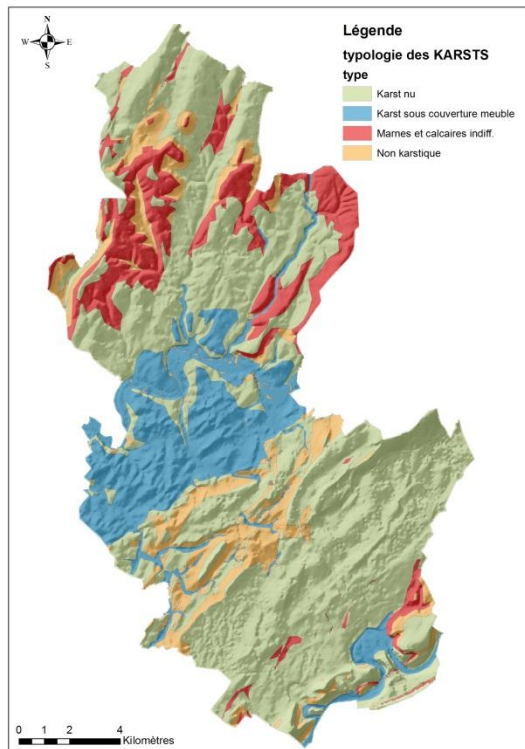


Deux exemples d'effondrements soudains en contexte de karst nu liés à l'activité humaine, département du Doubs. En haut : déboufrage d'un karst dans un canal de dérivation mis en service au 19^{ème} Siècle, l'effondrement se produit en 1997. En bas : gouffre remblayé artificiellement suivi quelques années plus tard par une rupture brutale d'une partie du remblai. Source : Inventaire spéléologique du Doubs, T5, GIPEK

Annexe 3

Cartographie semi-automatique des zones potentielles de karsts de contact - Méthode

1^{er} test – Zone de Franche-Comté



Sur le site d'étude de Franche-Comté, l'importance de la typologie du karst sur la distribution des désordres a été évaluée en procédant à la traduction de la carte géologique à 1/50 000 en une carte de la typologie des karsts par regroupement des lithologies en 4 classes (figure 2).

Néanmoins ce processus de reclassification ne permet pas de faire ressortir la classe de karst de contact. Ils doivent donc être extraits manuellement en cherchant les linéaires mettant en contact le karst nu et les zones non karstiques et pour lesquelles les zones non karstiques sont situées en **amont du karst nu**.

Suite à ce constat, une cartographie semi-automatique a été développée pour déterminer les zones potentielles de karsts de contact.

Figure 1 - Carte des typologies de karst de la zone d'étude

Les premières étapes préalables à l'application de cette méthode ont été :

- La caractérisation des emprises à traiter et du linéaire le long des zones karstiques où il y a des occurrences pour la présence de karsts de contact.
- La sélection des zones avec les contacts suivants : Karst nu / Non karstique et Karst nu / Marnes et calcaires indifférenciés.
- L'application d'une zone tampon de 150 m autour de la zone Karstique pour cartographier les secteurs potentiels de karsts de contact (dires d'experts).
- et la détermination des typologies associées au karst de contact avec la prise en compte des sens d'écoulement par l'intermédiaire de la notion d'amont et d'aval (figure 3).

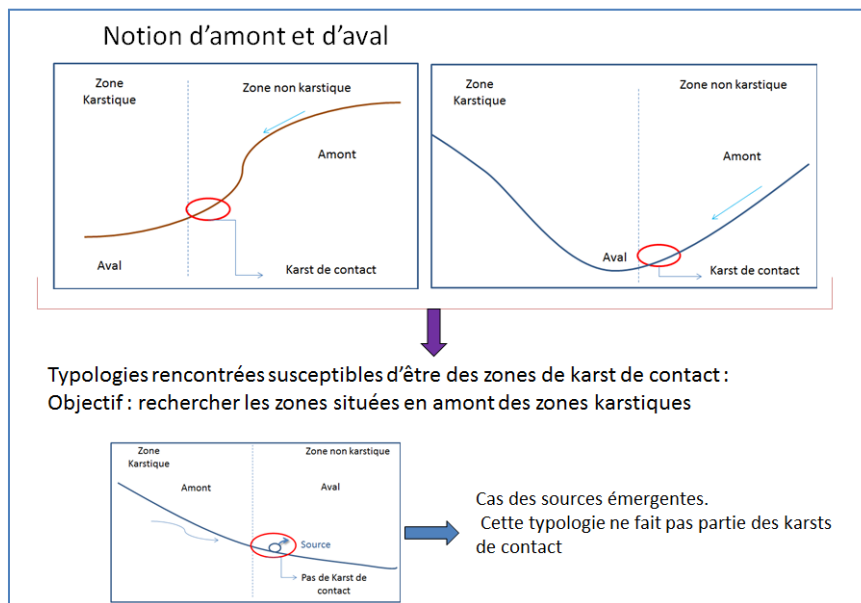


Figure 2 – Détermination des typologies de karsts de contact

La clé d'entrée de cette méthode de cartographie est donc la détermination automatique des zones « amont » et « aval », à partir du modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 25 m de l'IGN, dans un périmètre de 150 m autour des zones déjà identifiées comme karstiques.

Le traitement SIG utilisé dans cette approche s'inspire d'une cartographie pour l'exploitation forestière en montagne où les contraintes liées au dénivelé nécessite de déterminer les zones de coupe en fonction de la pente et de la position de l'amont.

Dans la méthode développée pour les karsts de contact, la notion de pente n'est pas prise en compte mais seulement la détermination des zones « amont » et « aval » en utilisant notamment l'outil d'allocation euclidienne (Spatial Analyst) développé par ArcGis©. Les résultats sont présentés ci-dessous avec dans un premier temps, le tracé de profils à partir du MNT qui ont permis de vérifier si le traitement automatique répondait correctement à la problématique posée (figure 3).

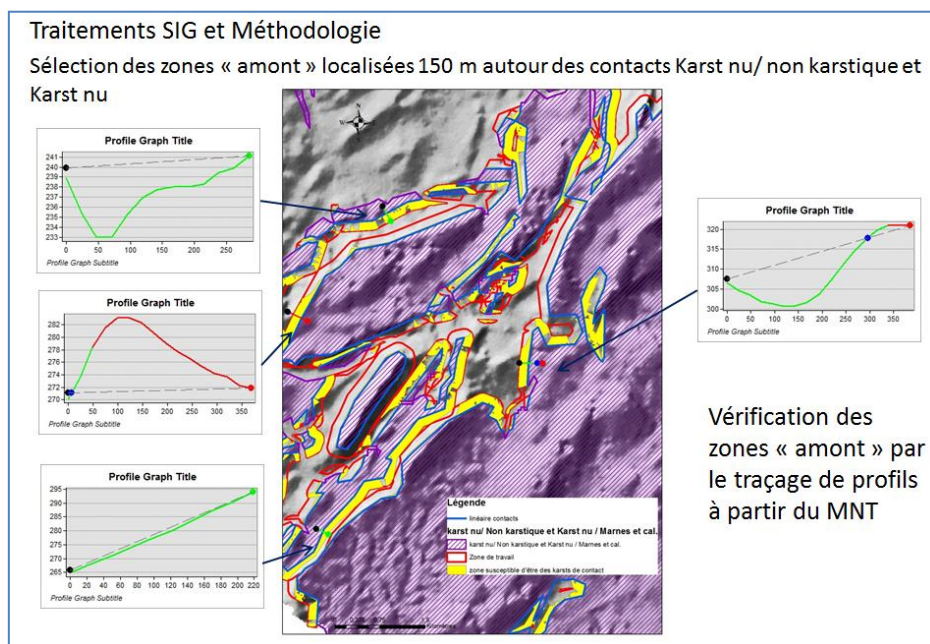


Figure 3 – Détermination des zones « amont »

2^{ème} test – Zone Vau Vauthier (Lorraine)

Contrairement au site précédent, la méthode de cartographie semi-automatique a été appliquée sur une zone à grande échelle représentant une surface d'environ 3 km² à partir de données Lidar au pas de 50 cm (MNT Haute résolution). Suite aux visites de terrain, les contours des formations géologiques ont été modifiés et ont permis de délimiter la limite de la couverture crétacé (secteur vert – figure 6) avec une meilleure précision que les contours extraits de la carte géologique au 1/50 000.

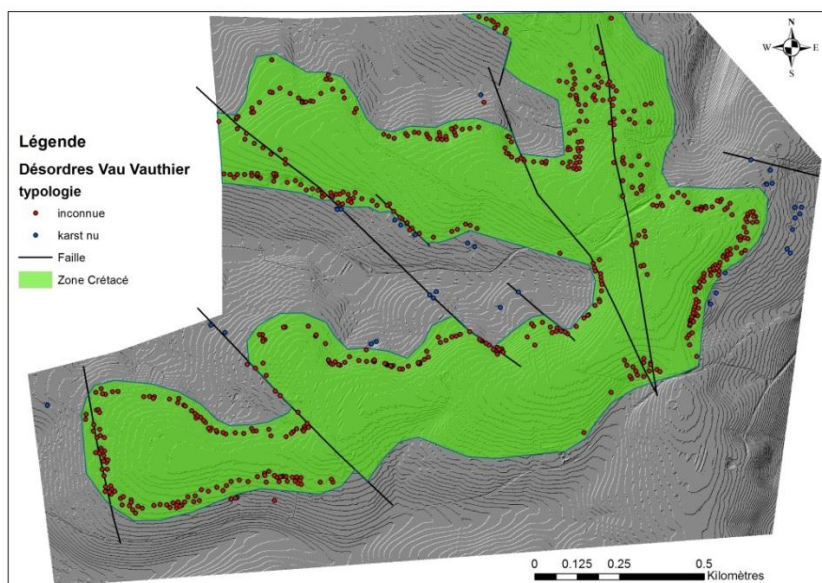


Figure 6–Site de Vau Vauthier

La méthode de cartographie semi-automatique des zones potentielles de karst de contact a été appliquée au MNT Haute résolution de Vau-Vauthier avec une zone tampon de 75 m (à dire d'experts). Le profil de la zone test (voir coupe figure 7) indiquent un relief relativement peu complexe permettant de tracer des secteurs « amont » et « aval » relativement homogènes.

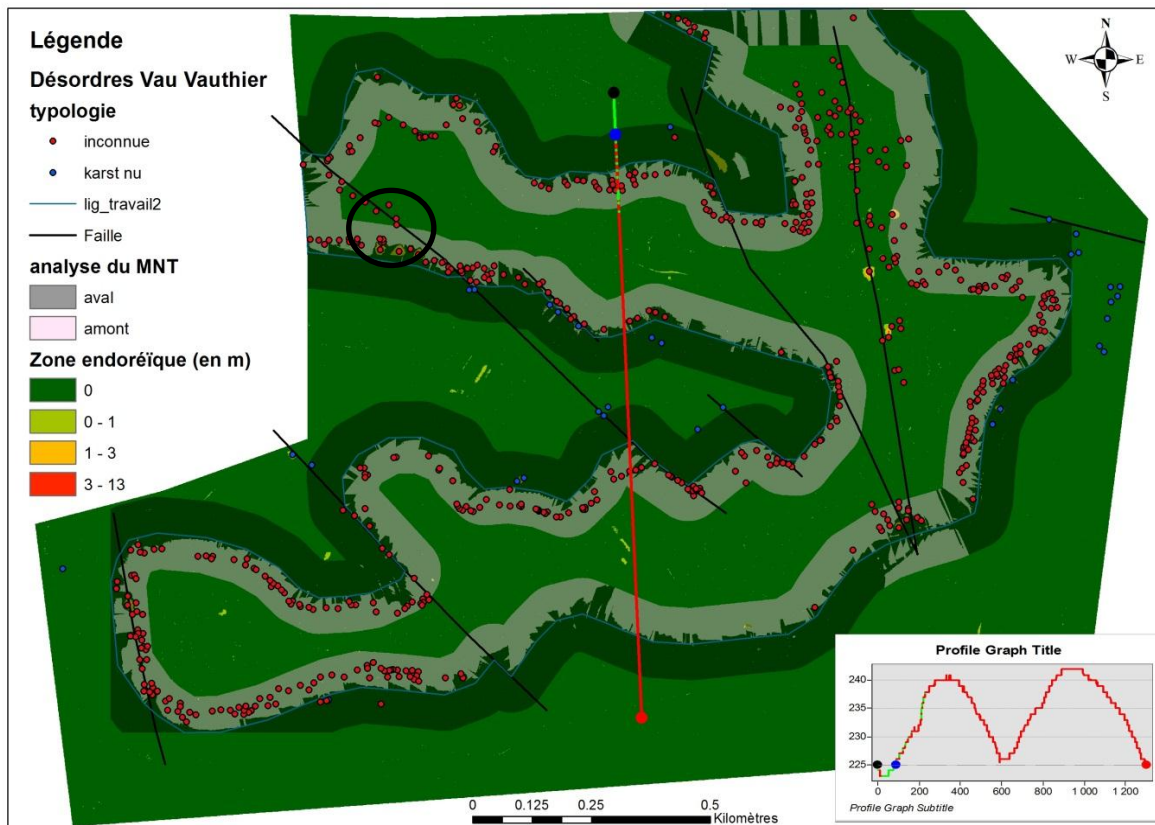


Figure 7—Comparaison des zones amont et aval avec les données de terrain

Annexe 4

Synthèse de l'analyse bibliographique des désordres décrits en territoire métropolitain

Site	Dept.	Remarques	Formation calcaire	Typologie karst	Caractéristiques couverture	Hydrologie	Position nappe	Typologie des désordres	Processus	Nombre	Diamètre (m)	Prof. (m)	Date d'apparition	Références
Saffré	44	analyse multicritères (profondeur calcaire, couverture meuble, f	Oligocène	couverture perméable	2-10 m sable, sable argileux, gravier	pertes, aléa fort proche du réseau hydrogr	dans la couverture	effondrements localisés	soufrage	25	métrique		régulier	Mondain & Boulay 2013
Cercottes	45	au moins une ouverture récente: chemin devé car coupé par l'e	Aquitainien (calc de Beauce)	couverture perméable	5-7 m de sables et marnes de l'Orléanais	drainage superficiel vers pertes	dans le karst	dolines de soufrage	soufrage	5	10-20	1-2	1970	Lorain 1972
Valentigney	25	autres effondrements plus anciens dans le même contexte	Kimméridgien	couverture perméable	>3m alluvions anciennes	période de forte pluie	dans la couverture	effondrement localisé	soufrage	1	3	3	10/10/2012	Renault 2012
Port sur Saône	70	fissures dans le bâti avant apparition fontis	Bathonien	couverture perméable	3 mètres alluvions récentes (limons & argile)	fuite réseau eau ayant pu accéléré l'effond	?	effondrement localisé	soufrage	1	1.5	2	25/5/2011	Bayle 2011a
Rupt aux Nonains	55	réactivation du karst par mise en service bassin de retention eau	Portlandien	couverture perméable	4 m de limons des plateaux	bassin réception eaux usées	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	2	plusieurs m	5		Jaillet 2000
Vieux Chamont	25	élargissement d'une dépression source déjà connue	Kimméridgien	couverture perméable	qq mètres alluvions	zone de sources	dans la couverture	effondrement localisé	débouillage?	1	1	1	mars 2013	Noury 2013
Preignac	33		Oligocène (Calcaire à Astéries)	couverture perméable	5-10m d'alluvions	proximité rivière (Garonne)	dans la couverture	effondrement localisé	soufrage	4	0.5-1.5	0.5-1.5	janvier 2011	Gutierrez 2011
Seuil de Malataverne	26	apparition accélérée par bassin de retention suite à intempéries	Barrémien	couverture perméable	plusieurs mètres d'alluvions		dans le karst	effondrement localisé	soufrage, montée de voule	1	plusieurs m	plusieurs m	1997	Camus 2010
Aubas	24	suite au détournement d'un ruisseau	Crétacé	couverture perméable	alluvions	proximité rivière (Vézère)		effondrement localisé		1	10	5		Mouret 1984
Chasseneuil	16	suite à construction route (décaissement couverture) RN141	(gr Bajocien	couverture perméable	8 m argile sableuse à silex		dans le karst	effondrement localisé	soufrage	2	métrique	métrique	décembre 2003	Dandurand 2011
Vrelade	33	autres effondrements dans le secteur	Oligocène (Calcaire à Astéries)	couverture perméable	10m alluvions (sable et gravier), terrasse Pléistocène moyen		dans le karst	effondrement localisé	soufrage/rupture?	1	20	12	février 1983	AFK excursion 2013
Mauvières	36		Bathonien	couverture peu perméable	3m couverture argilo-limoneuse		dans le karst	effondrement localisé	soufrage	2	2	7	janvier 1997	BRGM 1997
Montfaucon	2		Tertiaire (calcaires de Champigny	couverture perméable	13-20 m (limons des plateaux, sables Fontainebleau, ai	infiltration ruissellement	dans la couverture	effondrement localisé	soufrage	3	1-25	2.5	hiver 2011-2012	Maton 2012
Amagney	25	Effondrement des Champs Vieilles	Callovien (Dalle Nacrée)	couverture peu perméable	qq mètres d'argiles de l'Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	soufrage	1		3		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Pouilley français	25	Rivière de Candart, réseau karstique exploré	Bajocien	couverture perméable	faible placage alluvial	perte?	dans le karst	effondrement localisé	débouillage?	1	1.5	15	1990	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Voillans	25	Perte de l'autoroute, entièrement dans l'argile suite à une crue d	Bajocien	couverture perméable	alluvions-colluvions argileuses	zone de perte en amont	dans le karst	effondrement localisé	soufrage	1	1	7		2001 T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Chazot	25	Effondrement nord de Chazot, récent (fin années 2000)	Bathonien	couverture perméable	faible placage alluvial		dans le karst	effondrement localisé	soufrage?	1	0.8	3		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Médoc	33	Commune de Saint-Estèphe dans les vignobles, se réactivent à	Oligocène (Calcaire à Astéries)	couverture perméable	alluvions sableuses et siliceuses	sources artésiennes à proximité, effondre.	dans la couverture?	effondrement localisé	soufrage, montée de voule	7		3		Courrèges 1997
Roquefort	33	site test		couverture perméable			dans la couverture	effondrement localisé	soufrage, montée de voule	50				
Val d'Orléans	45	site test		couverture perméable			dans la couverture	effondrement localisé	soufrage, montée de voule	500				
Hyet	70	alignés sur fracture N205 permettant le soufrage?	Bathonien	couverture peu perméable	30-35 m de marnes oxfordiennes	infiltration diffuse	dans la couverture	effondrements localisés	soufrage (montée voule?)	3	5-15	1-5	2011	Renault 2013
Bougey	70		Sinemurien	couverture peu perméable	10m de marnes	zone d'émergence temporaire	dans la couverture	effondrement localisé	montée voule?	1	3.5	3	10/12/2011	Renault 2011
Salins les Bains	39	modification du drainage superficiel a pu contribuer à activer les	Kimméridgien	karst de contact	faible placage alluvial	zone de pertes karstiques	dans le karst	dolines de soufrage	soufrage	2	3-5	3-5	1980	Bayle 2011b
Omans	25		Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	débouillage?	2		5-10		Javey 1984
Bois de Marville	55		Bathonien (dalle d'étain)	karst de contact	2-20 m argiles calloviennes	pertes	dans le karst	dolines de soufrage	soufrage	50	1-30	1-10	régulier	Gamez 1995
Ancerville	55		Hauterivien	karst de contact	5 m argile Barrémien		dans le karst	effondrement localisé	soufrage	1	4	2	13/05/2013	Cartannaz 2013
Cademene	25	plusieurs enfoncures (Entonnoirs de Maubergier)	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	doline de soufrage	soufrage	3		3		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Cademene	25	Gouffre de la Charogne	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	rupture/débouillage?	1		13	oct-78	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Cademene	25	Gouffre du Pré du Puits	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	rupture/débouillage?	1		10		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Cussey sur Lison	25	Gouffre Roussel (dans village, 4 m recouvrement)	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien	réinfiltration eau pluviale?	dans le karst	effondrement localisé	rupture/débouillage?	1		8	24-mars-89	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Rouhe	25		Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	rupture/débouillage?	2	étroit		à proximité route	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Myon	25	Gouffre du Champ Bardey	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	<1	20	1988	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Villers Grelot	25	Gouffre à Roussot	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1.5	14	01/04/1907	T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Audincourt	25	perte RD126	Kimméridgien	karst de contact	alluvions anciennes	zone de pertes	dans le karst	effondrement localisé	soufrage	2	6	5	Sept 2007	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Dampierre-les-Bois	25	Gouffre sous le Châtelot, effondrement dans lit ruisseau	Kimméridgien	karst de contact	alluvions	lit de ruisseau	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		10	01/12/04	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Arcey	25	Gouffre de la Bouloie, faille mettant en contact argile et calcaire	Bathonien	karst de contact	5m d'argile Oxfordien avant le calcaire		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	6	5		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Geney	25	Trou du Prêlot, 2 soutirages en rive station de lagunage	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	argile Oxfordien	station de lagunage	dans le karst	doline soufrage	soufrage	2		4	2008	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Hjémondans	25	Puits de la Planche Verdey	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	5m d'argile Oxfordien avant le calcaire		dans le karst	effondrement localisé	Rupture voule/débouillage	1	1	5	Hiver 1995-1996	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Brailans	25	Gouffre au Village	Bathonien	karst de contact	marnes à Creniceras Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	2.5	2005	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)

Site	Dept.	Remarques	Formation calcaire	Typologie karst	Caractéristiques couverture	Hydrologie	Position nappe	Typologie des désordres	Processus	Nombre	Diamètre (m)	Prof. (m)	Date d'apparition	Références
Landresse	25	Gouffre 2 de Belue, effondrement fond doline	Bathonien	karst de contact	15-20 m de marno-calcaire Callovien	infiltration d'eau qui a fragilisé	dans le karst	effondrement localisé	rupture voute	1	10	10	Hiver 2007-2008	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Montfort	25	Soutirage de la combe de Vaujegreset, ouvert dans un champ	Bathonien	karst de contact	marnes de l'Aalénien	parcours souterrain de la source de Vaujeu	dans le karst	soutirage/effondrement	soutirage	1				T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Pouligny-Lusans	25	Gouffre de Patrouillet, dans un champ au passage d'un engin agricole	Callovien (Dalle Nacrée)	karst de contact	5m d'argile puis calcaire		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	15	01/04/91	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Vancians	25	Effondrement de Combe Provence	Séquanien	karst de contact	Marnes grises Oxfordien		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		3	2007	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Vau Vauthier	55	site test		karst de contact			dans le karst	dolines de soutirage	soutirage	50				
Forêt de Jaulnay	55	site test		karst de contact			dans le karst	dolines de soutirage	soutirage	50				
Franey	25		Bajocien	karst de contact?			dans le karst	effondrement localisé		1				T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Cademene	25	plusieurs enfoncures	Argovien	karst de contact?			dans le karst	doline de soutirage	soutirage	3		2		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Oudan	58	fontis dans matériaux meubles argileux, effondrement voute comble	Bajocien	karst nu		source en aval, calcaires argileux en amont	dans le karst	effondrements localisés	rupture toit?	1	1	5	25/12/2009	Bayle 2009
Chalezeule	25	ouvert brusquement dans la chaussée RD218	Bathonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage?	1	2	18	décembre 2008	http://baladesnaturalistes.haut-rhin.fr/
gouffre d'Arbecy	70	accès à un grand réseau karstique	Bajocien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	rupture toit?	1			7/7/1946	Nicod 1984
Acroux	58	activé par ruissellement route	Bathonien	karst nu		réinfiltration ruissellement route	dans le karst	effondrement localisé	soutirage	1	4	2.5	2005 puis récurrent	Bayle 2011c
Brailans	25	Gouffre Rambo	Bathonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		10		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Montrond le château	25	Gouffre du Bossu, ouvert sous les pieds d'une vache	Callovien (Dalle Nacrée)	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		15		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Roulans	25	Gouffre de la Pâtüre, ouvert sous les pieds d'une vache	Callovien (Dalle Nacrée)	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		4		T2 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Aissey	25	gouffre des Soiteux, ouvert sous les roues d'un tracteur	Bathonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1.2	30	Printemps 2000	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Baume les dames	25	gouffre rue T arragon, ouvert dans axe chaussée	Bathonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1.5	8	30/11/04	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Silley-Belfond	25	empoue Fanfan, ouvert sous les roues d'un tracteur	Bajocien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	0.5	3	2002	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Voillans	25	Gouffre au Mal Pommier, ouvert dans une pâture	Bajocien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		6	1990	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Belleherbe	25	Gouffre sur la Roche	Oxfordien sup	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	0.5	28		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Chazot	25	Puits 2 de Goutaille	Callovien (Dalle Nacrée)	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	28	1946	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Pierrefontaine lès Blamo	25	Gouffre des Sapins	Kimméridgien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	7		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Bulle	25	Gouffre sans Nom, cavité comblée puis réouverte	Tithonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage remplissage artificiel	1	1	7	Printemps 2009	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Raynans	25	Gouffre de la Combe de Bouvant	Rauracien	karst nu		perte de ruisseau	dans le karst	doline soutirage	soutirage	1	5	10	Printemps 1999	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Loray	25	Puits de la Station, ouvert sur un chemin	Kimméridgien	karst nu		regard sur écoulement souterrain en provenance de la source de la Combe de Bouvant	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	5	1994	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Ecot	25	Gouffre de Folgerotte, ouvert dans un champ	Kimméridgien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		6		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Vernois-les-Belvoir	25	Gouffre des Retteux, ouvert dans un champ	Callovien (Dalle Nacrée)	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	10		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Montrond-le-Chateau	25	Baume des Grettes, ouvert dans un champ	Rauracien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		29		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Rouhe	25	Gouffre au milieu du village, à proximité maison en face mairie	Callovien (Dalle Nacrée)	karst nu		ruissellement route?	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1		14		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Courcelles	25	Gouffre du Champ, en plein champ le long RD110	Bathonien	karst nu		sur faille, ruissellement route?	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	6		T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Gondenans-Montby	25	Puits des égouts, ouvert au centre du village absorbe les égouts	Kimméridgien	karst nu		infiltration égouts	dans le karst	soutirage/effondrement	débouillage	1		10	Hiver 1991-1992	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Bouclans	25	Gouffre de Champs Rénier, ouvert dans un champ	Rauracien	karst nu	1m d'argile de couverture	filet d'eau au fond	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	5	10/07/94	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Champlive	25	Effondrement de la dérivation du Gour	Bathonien	karst nu		dans le lit du canal de dérivation	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	10	5	01/06/97	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Les Terres de Chaux	25	Gouffre de Neuviel, dans une pâture	Bathonien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	4	01/12/04	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Valentigney	25	Gouffre du Bannot, secteur urbanisé	Kimméridgien	karst nu	2-3 m de couverture meuble	ruissellement route?	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1	5	01/11/96	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Vernierfontaine	25	Trou du miroir de faille, proximité hangar agricole	Kimméridgien	karst nu			dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1.5	8	Fin 2006	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Rantechaux	25	Gouffre de Fauverge, dans pâture	Kimméridgien	karst nu	sol de plusieurs mètres d'épaisseur		dans le karst	effondrement localisé	débouillage	1	1.5	18	Hiver 2012	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Beutal	25	Puits de la combe de froide fontaine, ouvert pendant travaux de la fontaine	Séquanien	couverture perméable	couverture de marnes et alluvions		dans le karst	effondrement localisé	Rupture voute/débouillage	1	2	6	Printemps 1995	T5 Inventaire spéléo Doubs (GPEK)
Oberhaslach	67	analyse aléa (faille, réseau karstique supposé, terrains karstifiés)	Muschelkalk	nu/couverture perméable	3-5 m colluvions	perte en amont	dans le karst	effondrements localisés	soutirage	6	1-5	3-5	1930-1998	CruzMermey & Pierrevelcin 2013
St Maixant	33	apparitions accélérées par réinfiltration des eaux pluviales	Oligocène (calcaire sableux)	nu/couverture perméable	0-3 m alluvions sableuses	proximité rivière (Garonne)	dans le karst	effondrement localisé	débouillage	18	0.5-2	0.5-2.5	18/06/2010, 26/12/2010, 08/01/2011	Aubié & al. 2010, Gutierrez 2011

Liste bibliographique ayant servi à l'élaboration de l'Annexe 4

Aubié S., Platel JP., Clément F., Gardet S. 2010. Effondrements de terrain survenu le 18 juin 2010 sur la commune de Saint-Maixant en Gironde. Rapport BRGM/RP-58705-FR. 25 p

Bayle E. 2008. Bonnevent-Veloreille (70) : Avis géologique sur des phénomènes karstiques – BRGM/RP-56955-FR. Avis du BRGM, rapport: 24 p.

Bayle E. 2009. OUDAN (58) – Avis géotechnique sur des phénomènes karstiques. Rapport final. BRGM/RP-57095-FR : 33 p.

Bayle E. 2011a. Effondrement rue Jean Bogé à Port sur Saône (70), rapport final. Rapport BRGM/RP-60060-FR : 20 p.

Bayle E. 2011b. Effondrement au hameau Granges Feuillet à Salins les Bains (39), rapport final. Rapport BRGM/RP-60031-FR : 16 p.

Bayle E. 2011c. Analyse géologique d'effondrements à Moulins-Engilbert (58). Rapport BRGM/RP-60137-FR : 17 p.

BRGM 1997. Ouverture d'une cavité à Mauvières « Le Haut Durennet » (Indre). Rapport BRGM R39341.

Camus H. 2010. Diagnostic du risque karstique : le cryptokarst de la LGV Méditerranée. In Audra (Ed) Grottes et Karst de France, Karstologia Mémoires 19.

Cartannaz C. 2013. Avis sur un effondrement sur la commune d'Ancerville (Meuse). Rapport BRGM/RP-62365-FR. 19 p.

Colleau A., Mathon C., Mirgon C. 2005. Commune de Jargeau (45) : Aléa mouvements de terrain associé à la présence de cavités souterraines – enquête détaillée et cartographie préliminaire. Rapport BRGM RP-53876-FR : 89 p.

Courrèges M. 1997. Le crypto-karst de la péninsule du Médoc : crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire. Quaternaire 8 (2-3) : 289-304.

Cruz Mermey D., Pierrevelcin B. 2013. Identification des zones soumises à l'aléa effondrements et affaissements karstiques sur le territoire de la commune d'Oberhaslach au niveau du bourg et du lieu-dit Schotten. Rapport final BRGM/RP-62765-FR : 99 p.

Dandurand G. 2011. Cavités et remplissages de la nappe karstique de Charente. Thèse Université Bordeaux 3.

Desprez N. 1967. Etude hydrogéologique du calcaire de Beauce : inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans. Rapport BRGM DSGR 67 A86.

Desprez N. 1976. Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret) : étude hydrogéologique. Rapport BRGM 76 SGN 109 BDP.

Donsimoni M., Berthier H., Martin J-C., Nachbaur A. 2008. Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels. Rapport BRGM RP-55711-FR : 179 p.

GYPEK 2012. Inventaire spéléologique du Doubs Tome 5 (mise à jour des tomes 1 à 4). Ornans.

Gutierrez T., Vincent C. 2011. Effondrements de terrain survenus le 26 décembre 2010 et 8 janvier 2011 sur la commune de Saint Maixant (33). Rapport BRGM/RP-59426-FR. 21 p.

Gutierrez T. 2011. Effondrements survenus en janvier 2011 sur le vignoble de M. Bon à Preignac (Château Voigny, 33). Rapport BRGM/RP-59804-FR. 14 p.

Jaillet S. 2000. Un karst couvert de Bas-plateau: Le Barrois; Structure, fonctionnement; évolution. Thèse Laboratoire de géographie physique et appliquée, Université Montaigne Bordeaux 3.

Javey C. 1984. Plan d'occupation des sols d'Ornans (25) : évaluation des risques géologiques au droit des zones d'urbanisation. Rapport BRGM 84 AGI 104 FRC : 34 p.

Mania J., et al. 2001. Investigations et cartographie des aléas karstiques dans une zone tectonisée complexe des avants-monts du Jura nord-occidental (France). *Geologica Belgica* 4/3-4 : 263-274.

Maton D. 2012. Communes de Rozoy-Belleval et Montfaucon (Aisne). Observations et avis du BRGM à la suite d'un effondrement, Rapport final. Rapport BRGM/RP-61063-FR : 29 p.

Mondain P.H., Boulay C. 2013. L'aquifère des calcaires oligocènes du bassin de Safré (44) : une ressource en eau au comportement hydrogéologique atypique. 19ème journées techniques du CFH, Bordeaux 30 mai – 2 juin 2013.

Mouret C. 1984. Les effondrements en milieu karstique : un risque naturel important pour l'aménagement du territoire. *In* Flageollet J-C. (Ed) 1984. Mouvements de terrain. Communications du Colloque de Caen. Documents du BRGM n°83 : 678 p.

Noury G. 2013. Parcelle AI 13 Vieux Charmont (25) : évaluation des risques et premières mesures d'urgence – Rapport d'expertise BRGM.

Renault O. 2011. Bougey (70) : effondrement karstique à proximité de maisons d'habitation – Rapport final. Rapport BRGM/RP-60727-FR : 10 p.

Renault O. 2012. Valentigney (25) : effondrement karstique au n°15 rue Camille Saint Saens – avis du BRGM – Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-61644-FR : 11 p.

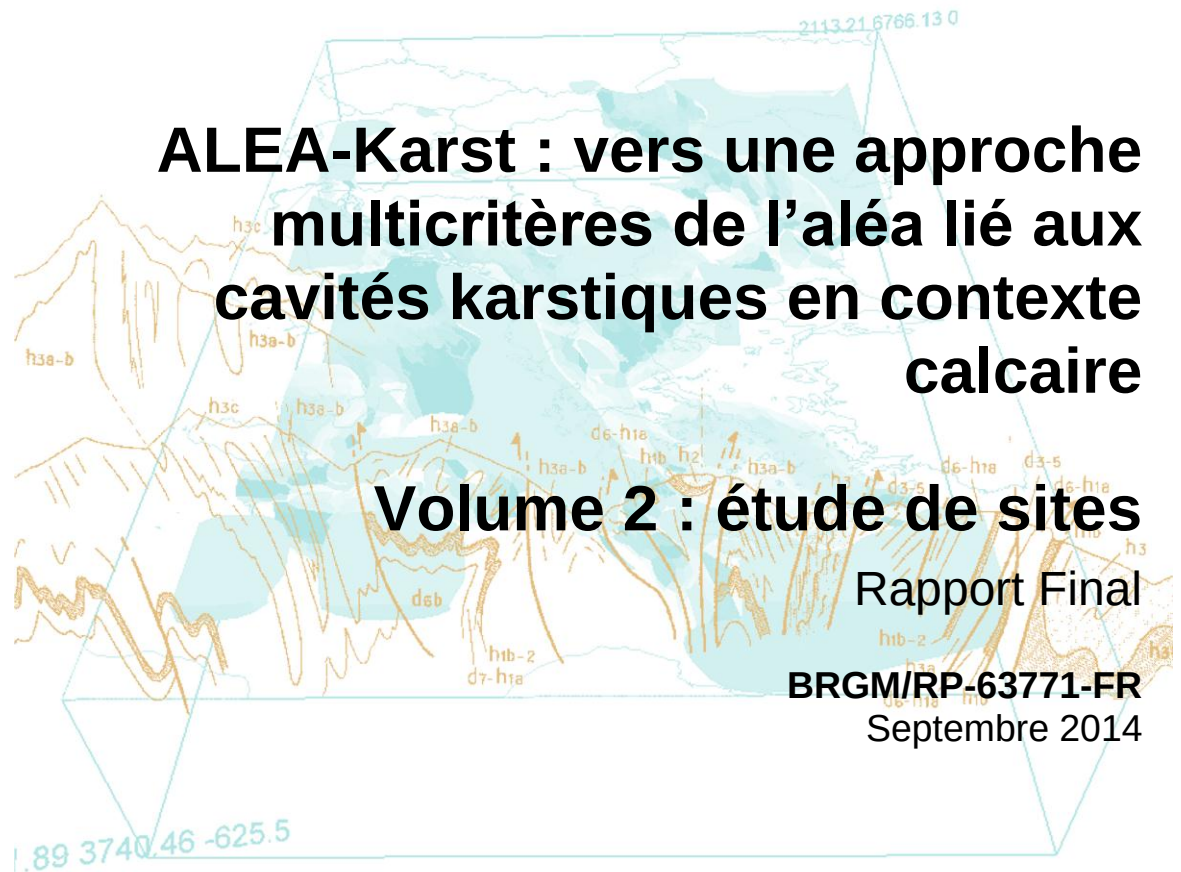
Renault O. 2013. Hyet (70) : effondrement karstique sur la route communale de la combe Gobardet. Rapport BRGM/RP-61964-FR : 11 p.

Roques et Pasquet 1991. Mairie de Jargeau : analyses géotechniques de maisons fissurées. Rapport BRGM R 33064 CEN 4S/91

Thierry P., Baltassat J-M. 2010. Effondrement à St Pryvé St Mesmin le 22 mai 2010. Avis du BRGM. Rapport BRGM RP 58649-FR.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr



ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire

Volume 2 : étude de sites

BRGM/RP-63771-FR

Septembre 2014

Etude réalisée dans le cadre de l'action R & D du Plan National cavités, Direction générale de la prévention des risques, MEDDE

J. PERRIN, G. NOURY, C. CARTANNAZ, T. GUTIERREZ, A. VAN LAERE

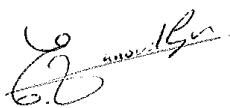
Avec la contribution de H. Tissoux, B. Detante

Vérificateur :

Nom : E. Vanoudheusden

Date : 12/11/2014

Signature :

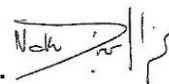


Approbateur :

Nom : N. Dörfliger

Date : 11/12/2014

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 9001:2000.

Mots clés : karst, calcaire, cavités, désordres, aléa, approche multicritères, susceptibilité, effondrement, bibliographie, Loiret, Meuse, Lorraine, Franche-Comté, Landes, Aquitaine

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

Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Gutierrez T., Van Laere A. 2014, ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 2 : étude de sites - Rapport BRGM/RP-63771-FR, 119 pages

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'action « Recherche et Développement » initiée par le Plan National Cavitité. Ce module a pour objectif de mener à bien des études destinées à faire progresser les connaissances dans le domaine du « risque cavitité » notamment requises pour des diagnostics précis et partagés sur les risques d'instabilités liés à la présence de cavités.

L'étude a permis de développer une trame méthodologique pour la cartographie de l'aléa lié à la présence et à l'effondrement de cavités karstiques en contexte calcaire. Cette trame et les concepts sous-jacents sont présentés dans le volume 1 du rapport. Ce volume 2 consiste en la synthèse des études menées sur les différents sites sur lesquels la trame méthodologique a été développée puis testée. Des informations additionnelles sur les études de site sont présentées dans le rapport final de l'année 1 du projet (Perrin et al. 2013).

Les campagnes de terrain ont été réalisées sur trois sites d'étude présentant des contextes karstiques contrastés en année 1 : Val d'Orléans (prédominance de karst sous couverture), Lorraine (karst de contact), Franche-Comté (karst nu, karst de contact et karst sous couverture). L'inventaire des désordres sur chacun des sites confirme le rôle prépondérant de la typologie du karst sur la distribution spatiale des désordres. Le karst sous couverture étant le contexte le plus susceptible, un quatrième site a été étudié en année 2 : le site de Roquefort (Landes) qui est essentiellement constitué de karst sous couverture.

L'application de la trame méthodologique sur quatre sites montre la pertinence des critères explicatifs retenus pour des contextes géologiques et hydrogéologiques variés. Une différence notoire est l'épaisseur seuil de couverture peu perméable au-delà de laquelle la susceptibilité devient faible. Cette épaisseur est de l'ordre de 8 m pour le site du Val d'Orléans et de 20 m pour le site de Roquefort.

Les études de site ont montré la difficulté de constituer un inventaire représentatif des désordres qui est une étape préliminaire indispensable à toute analyse statistique. Cette difficulté est liée au caractère très ponctuel à la fois dans l'espace et dans le temps des désordres et aux informations souvent fragmentaires qui les renseignent. Ce constat montre l'intérêt de la trame méthodologique proposée qui ne nécessite pas d'inventaire de désordres puisqu'elle consiste à croiser les différents critères explicatifs de la distribution des désordres. Les résultats de cartographie sont ensuite comparés à posteriori avec la localisation des désordres connus.

Une piste novatrice pour mieux appréhender la localisation de désordres est l'utilisation de techniques de télédétection telles que le Lidar. Cependant, l'utilisation de cette technique, qui tend de plus en plus à être mise en œuvre dans un but d'aménagement du territoire, est encore à ses débuts et demande à être développée.

Sommaire

Synthèse.....	3
1. Introduction	9
2. Etude de sites : évaluation des critères explicatifs potentiels.....	11
2.1. METHODOLOGIE	11
2.1.1. Choix des sites.....	11
2.1.2. Campagnes de terrain.....	11
2.1.3. Evaluation des critères explicatifs potentiels par la théorie du poids des évidences	12
2.2. VAL D'ORLEANS ET ENVIRONS	13
2.2.1. Délimitation du secteur d'étude	13
2.2.2. Contexte géologique	14
2.2.3. Contexte hydrogéologique.....	19
2.2.4. Inventaire des désordres d'origine karstique	21
2.2.5. Analyse de l'intensité des désordres	25
2.2.6. Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement et carte d'aléa	33
2.2.7. Conclusion	48
2.3. LORRAINE	49
2.3.1. Contexte géologique	49
2.3.2. Contexte géologique du site du Bois de Vau-Vauthier.....	50
2.3.3. Données de terrain.....	52
2.3.4. Cartographie de la susceptibilité.....	56
2.4. AQUITAINE : COMMUNE DE ROQUEFORT ET ENVIRONS	66
2.4.1. Délimitation du secteur d'étude	66
2.4.2. Contexte géologique	67
2.4.3. Contexte hydrogéologique.....	77
2.4.4. Inventaire des désordres d'origine karstique	78
2.4.5. Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement	83
2.4.6. Conclusion	91
2.5. FRANCHE COMTE	91
2.5.1. Contexte géologique	93
2.5.2. Contexte hydrogéologique.....	96
2.5.3. Inventaire des formes karstiques et désordres d'origine karstique.....	96
2.5.4. Analyse de la distribution des désordres et typologie du karst.....	99
2.5.5. Carte de susceptibilité et validation	103
3. Conclusions et Perspectives.....	107
4. Références bibliographiques	109

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation de la zone d'étude du Val d'Orléans et report des formes karstiques répertoriés sur la carte géologique à 1/50 000	14
Figure 2 : Succession des unités lithologiques du Loiret dans les formations crétacées et tertiaires (Giot et al. 2003)	15
Figure 3 : Coupes schématiques interprétatives, transversalement au Val-de-Loire entre Gien et Châteauneuf-sur-Loire (en haut) et Châteauneuf-sur-Loire et Blois (en bas) (Martin, Giot et le Nindre, 1999)	16
Figure 4 : Coupe Nord-Sud du Val d'Orléans au village d'Ardon (Sologne).	17
Figure 5 : Coupe géologique du Val au niveau de Jargeau sur la base d'observations en sondage (d'après Castanet et al. 2003)	19
Figure 6 : Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans. (Jozja et al. 2010)	20
Figure 7 : Carte des « gouffres » du Val d'Orléans (d'après Blanchard 1903)	21
Figure 8 : Coupe géologique de la Bîme de la ferme à Bardy, Sandillon (Lepiller 2006)	22
Figure 9 : Affaissements différentiels par suffosion/soutirage vers les conduits karstiques conduisant à la fissuration du bâti, commune de Jargeau (d'après Roques et Pasquet 1991)	22
Figure 10 : Effondrement d'une habitation suite à l'apparition d'un fontis, St-Pryvé-St-Mesmin, 22 mai 2010	23
Figure 11 : Répartition des formes karstiques pour le site du Val d'Orléans (total 1 107 formes). Les dolines regroupent à la fois les dolines colmatées, actives et celles pour lesquelles le degré de stabilité n'a pas pu être déterminé	24
Figure 12 : Distribution de l'apparition de désordres liés au karst dans le val d'Orléans en fonction du mois (35 observations)	25
Figure 13 : Intensité des désordres liés au karst pour le site du Val d'Orléans (88 observations)	26
Figure 14 : Répartition des diamètres des fontis liés à un effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux pour le site du Val d'Orléans	28
Figure 15 : Répartition des diamètres des fontis liés à un effondrement de la couverture ou du substratum rocheux pour les site du Val d'Orléans, des Pinellas en Floride et de la région de Centurion en Afrique-du-sud	29
Figure 16 : Répartition par classes d'intensités des diamètres des 38 fontis liés à un effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux pour le site du Val d'Orléans	30
Figure 17 : Diamètre initial d'un fontis à son arrivée à la surface du sol (Sowers, 1996) : a) Sol cohésif - b) Sol peu cohésif	31
Figure 18 : Evaluation des diamètres de fontis selon les valeurs empiriques de Sowers (en marron) pour le site du Val d'Orléans, comparaison globale des intensités obtenues avec celles observées	32
Figure 19 : En haut, carte géologique harmonisée à 1/50 000 du secteur d'étude et carte des épaisseurs des marnes dans le Val (Auterives inédit). En bas, délimitation de la zone karstique en jaune qui contient toutes les formes karstiques répertoriées	34
Figure 20 : Carte des typologies de karst pour le secteur d'étude du Val d'Orléans et répartition des désordres liés à la présence de karst.	35
Figure 21 : Carte de la susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour les zones en karst nu ; les désordres répertoriés pour cette typologie de karst sont également indiqués par des croix	36

Figure 22 : Cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et répartition des désordres liés à la présence de karst	37
Figure 23 : Carte de l'épaisseur des formations peu perméables (marnes de Blamont, marnes de l'Orléanais, sables et argiles de Sologne) et de la répartition des désordres associés à la présence de karst	38
Figure 24 : Carte de la distance aux cours d'eau et de la répartition des désordres associés à la présence de karst	39
Figure 25 : Résultat de l'analyse des trois critères explicatifs pour le contexte de karst sous couverture par la théorie du poids des évidences.	40
Figure 26 : Résultats du test d'indépendance entre le critère saturation de la couverture et les deux autres critères envisagés	41
Figure 27 : Pondérations des différentes classes pour chacun des critères explicatifs utilisés dans les six scénarios de susceptibilité à l'effondrement. AUC (« area under curve ») est un paramètre permettant d'évaluer la qualité prédictive du scénario	42
Figure 28 : courbes ROC pour un modèle parfait, un modèle aléatoire et les modèles expérimentaux (scénarios 1 à 6)	43
Figure 29 : Carte de susceptibilité à l'effondrement pour le site test du Val d'Orléans et répartition des désordres (points gris= base de données utilisées pour tester les critères explicatifs, points noirs= base de données utilisées pour tester les scénarios de pondération)	44
Figure 30 : Carte de l'intensité des effondrements basées sur la formule empirique de Sowers reliant le diamètre de l'effondrement aux épaisseurs respectives des formations cohésives (peu perméables) et peu cohésives (perméables) et diamètres observés pour les fontis documentés	45
Figure 31 : Cartographie de la zone d'étude en 8 classes d'aléa effondrement par croisement de la susceptibilité à l'effondrement et l'intensité de l'effondrement	47
Figure 32 : Carte d'aléa effondrement en utilisant un schéma de reclassement plus conservateur (susceptibilité faible/moyenne & intensité modérée → aléa moyen)	47
Figure 33 : Carte d'aléa effondrement en utilisant un schéma de reclassement moins conservateur (susceptibilité faible/moyenne & intensité modérée → aléa faible).....	48
Figure 34 : carte géologique de la Lorraine et localisation des 4 sites d'étude (d'après la carte géologique harmonisée au 1 000,000ème de la France).....	49
Figure 35 : coupe géologique synthétique de la région Lorraine (Cartannaz et al., 2011). Le log stratigraphique associé est consultable sur le site www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/log.php	50
Figure 36 : Log stratigraphique du Bois de Vau-Vauthier (Cartannaz et al., 2011)	51
Figure 37 : Carte de localisation des sources et des dolines émergence-perte du Bois de Vau-Vauthier sur fond de carte IGN au 1/25 000.....	52
Figure 38 : Carte des morphologies karstiques du Bois de Vau-Vauthier sur fond de carte IGN au 1/25 000	53
Figure 39 : Proportion des morphologies karstiques en fonction de l'épaisseur de la couverture du Bois de Vau Vauthier	54
Figure 40 : Répartition des dolines fermées en fonction de leur diamètre dans le Bois de Vau Vauthier.....	54
Figure 41 : Répartition des dolines fermées en fonction de leur profondeur dans le Bois de Vau Vauthier.....	55
Figure 42 : Rapport des diamètres des dolines fermées sur leur profondeur en fonction de leur pente sur le site du Bois de Vau Vauthier	55
Figure 43 : Graphique montrant la répartition des diamètres des dolines fermées en fonction de l'épaisseur de couverture dans le Bois de Vau Vauthier	56

Figure 44 : Rendu cartographique avec MNT ombré et pente (issu du LIDAR) ainsi que les 664 désordres répertoriés sur le site de Vau-Vauthier.....	57
Figure 45 : Carte de la typologie du karst. En bleu clair karst nu, violet : karst de contact, vert : karst sous couverture peu perméable.	58
Figure 46 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la typologie du karst (ou géologie) par la théorie du poids des évidences	59
Figure 47 : Cartographie du critère pente sur le site de Vau-Vauthier à partir des données LIDAR moyennées au pas de 25 m (avec filtrage des pentes dues aux désordres).....	60
Figure 48 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la pente par la théorie du poids des évidences.....	61
Figure 49 : Carte de la distance aux failles et répartition des désordres associés aux karsts pour le contexte de karst de contact lithostratigraphique	62
Figure 50 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la distance aux failles par la théorie du poids des évidences	63
Figure 51 : Arbre décisionnel pour la cartographie de la susceptibilité de présence de désordres liés au contexte de karst de contact lithostratigraphique	64
Figure 52 : nombre de désordres par classe de susceptibilité pour le site de Vau-Vauthier	64
Figure 53 : Carte de la susceptibilité aux désordres liés au contexte de karst de contact lithostratigraphique. Rouge : forte, orange : moyenne, vert foncé : faible, vert clair : très faible. Points blancs : désordres	65
Figure 54 : Délimitation de la zone d'étude (en rouge) de Roquefort (département des Landes).....	66
Figure 55 : Log schématique du secteur de Roquefort (département des Landes)	69
Figure 56 : Carte géologique de la zone d'étude de Roquefort (département des Landes).....	70
Figure 57 : Coupe schématiques N-S de Roquefort (département des Landes).....	71
Figure 58 : Carte de l'épaisseur de la couverture au-dessus des premiers bancs de carbonates à Roquefort (département des Landes)	73
Figure 59 : Carte de l'épaisseur des premières couches marneuses dans la couverture à Roquefort (département des Landes)	74
Figure 60 : Coupes géologique reconstituant l'histoire de la karstification du secteur de Roquefort (département des Landes)	76
Figure 61 : Carte hydrogéologique du secteur d'étude montrant une esquisse de la piézométrie de la nappe karstique du Crétacé, les niveaux piézométriques mesurés dans le calcaire et l'aquifère superficiel (couverture), les cours d'eau avec les pertes principales qui alimentent le karst et les sources.....	77
Figure 62 : Carte des désordres connus sur le site de Roquefort (département des Landes)	79
Figure 63 : Photo d'un fontis en 2012 sur le site de l'ancienne papeterie de Roquefort (département des Landes). Substrat argileux ou argilo-sableux.....	81
Figure 64 : Deux fontis alignés selon une direction E-W, apparus sur l'avenue Gaston Lescouzères en 2012 à Roquefort (département des Landes).....	81
Figure 65 : Fontis de petite taille au droit d'une gouttière (Roquefort, département des Landes).....	82
Figure 66 : Doline noyée (nappe) sur la commune de Roquefort (département des Landes).....	82
Figure 67 : Carte des typologies de karst pour le secteur d'étude de Roquefort et répartition des désordres liés à la présence de karst. Les points rouges représentent les désordres inventoriés	84

Figure 68 : Carte de la susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour les zones en karst nu : la susceptibilité passe de très faible (en bleu) à faible (en beige) pour les zones construites et/ou à proximité des cours d'eau perchés	85
Figure 69 : Cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et répartition des désordres liés à la présence de karst dans le contexte de karst sous couverture (points noirs)	86
Figure 70 : Carte de l'épaisseur des marnes et de la répartition des désordres associés à la présence de karst dans le contexte de karst sous couverture (points noirs)	86
Figure 71 : Carte de la distance aux failles et répartition des désordres associés à la présence de karst pour le contexte de karst sous couverture (points noirs)	87
Figure 72 : Résultat de l'analyse des trois critères explicatifs pour le contexte de karst sous couverture par la théorie du poids des évidences	88
Figure 73 : Résultats du test d'indépendance entre le critère saturation de la couverture et les deux autres critères envisagés (distance cours d'eau et épaisseur formation peu perméable)	89
Figure 74 : Typologie de la couverture	89
Figure 75 : Carte de susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour le site test de Roquefort	90
Figure 76 : Carte de la zone d'étude Franche-Comté montrant les formes karstiques répertoriées dans différentes sources d'information	92
Figure 77 : Coupe géologique passant par le secteur d'étude indiqué par le rectangle rouge	93
Figure 78 : Colonne stratigraphique pour le site d'étude Franche-Comté)	95
Figure 79 : Inventaire des formes karstiques sur le site Franche-Comté	97
Figure 80 : Illustrations des différents types de désordres observés en Franche-Comté :	98
Figure 81 : Dimensions des désordres observés en Franche-Comté lors de la campagne de terrain 2013	99
Figure 82 : Deux exemples de présence de désordres en contexte de karst de contact	99
Figure 83 : Exemple de désordres (points rouges) dans un contexte de karst de contact	100
Figure 84 : Carte géologique à 1/50 000 de la zone d'étude	101
Figure 85 : Carte des typologies de karst de la zone d'étude établie suite à une reclassification des différentes formations géologiques cartographiées (Figure 78) et une cartographie du karst de contact	102
Figure 86 : Comptage pour chaque typologie de karst du nombre de pixels (surface respective de chaque typologie) et de désordres	102
Figure 87 : Carte de susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour le site test de Franche-Comté (approche régionale)	104
Figure 88 : Courbe de ROC permettant de tester la robustesse de la cartographie de la susceptibilité du site test Franche-Comté	105

Liste des annexes

Annexe 1	113
Annexe 2	118

1. Introduction

Ce volume 2 du rapport présente les quatre études de site qui ont été réalisées dans le cadre du projet et qui ont permis de développer la trame méthodologique de cartographie de la susceptibilité/aléa puis de confronter les résultats de cartographie aux données de terrain. Les sites étudiés sont le Val d'Orléans (Loiret), Vau Vauthier (Meuse), Franche-Comté (secteur à cheval sur les départements du Doubs et de la Haute-Saône) et Roquefort (Landes). Une partie des résultats obtenus sur les sites d'étude ont été présentés dans le rapport final à l'issue de la première année (Perrin et al. 2013). Ce volume du rapport reprend ces résultats tout en ajoutant les étapes de cartographies de la susceptibilité et de validation.

Pour chaque site, le contexte géologique et hydrogéologique est présenté puis une analyse statistique de la répartition des désordres en fonction de différents critères explicatifs de leur présence est réalisée. Cette analyse permet de montrer de manière objective quels sont les critères explicatifs à retenir pour l'évaluation de l'aléa.

Sur le site du Val d'Orléans une cartographie de l'intensité de l'aléa puis une carte d'aléa sont proposées. De plus, un site additionnel sur lequel la trame méthodologique a pu être testée est présenté, il s'agit du site de Roquefort (Landes).

2. Etude de sites : évaluation des critères explicatifs potentiels

2.1. METHODOLOGIE

2.1.1. Choix des sites

Les trois sites d'études retenus en début d'étude ont été choisis afin de représenter d'une part des typologies différentes de karst et d'autre part être suffisamment documentés d'un point de vue géologique, hydrogéologique et désordres liés à la présence de karst (thèses, publications, rapports, bases de données, etc.) de manière à posséder tous les éléments nécessaires à l'élaboration de la trame méthodologique.

Sur cette base les sites retenus sont les suivants :

Val d'Orléans (Loiret) : karst sous couverture alluviale et karst de contact, nombreuses occurrences de désordres, plusieurs études sur les désordres et l'aléa.

Lorraine (Meuse) : quatre secteurs représentant des karsts de contact lithologique ont été étudiés en année 1 du projet (Perrin et al. 2013) et un des sites a été retenu pour la cartographie de la susceptibilité à l'effondrement. Il s'agit du Bois de Vau-Vauthier : calcaires tithoniens/calcaires crétacés sous les argiles du Crétacé (Jailliet 2000). Ce dernier site a en outre l'avantage de présenter des typologies de karst nu et de karst sous couverture non perméable et a fait l'objet d'une campagne d'acquisition au LIDAR.

Franche Comté (Doubs & Haute-Saône) : karst nu, karst sous couverture alluviale et karst de contact (faille). Etudes et rapports sur l'aléa lié à la présence de karst disponibles.

En année 2 du projet, un quatrième site d'étude a été intégré afin de tester la trame méthodologique dans un contexte de karst sous couverture, il s'agit du site de **Roquefort (Landes)**.

2.1.2. Campagnes de terrain

L'objectif du travail de terrain a été d'inventorier et de cartographier les désordres liés à la présence de karst, dans le but de valider ou d'invalidier les critères explicatifs décrits précédemment, tels que l'épaisseur de la couverture, sa lithologie, le degré de fracturation du substratum, la lithologie, etc. Pour cela, une fiche terrain a été établie, reprenant toutes les caractéristiques physiques des objets (diamètre, profondeur, pente du terrain naturel...) ainsi que les propriétés de la couverture (lithologie, épaisseur) et les données de fracturation visibles sur le substratum.

Sur le terrain, un GPS ainsi qu'un télémètre laser ont été utilisés pour obtenir les localisations et les dimensions les plus précises. Chaque position est prise, dans la mesure du possible au centre du phénomène. Quant aux altitudes, elles ont été déduites d'après les courbes de niveau des cartes au 1/25 000 de l'IGN, après retranscription des coordonnées UTM fournies par le GPS. En effet, l'erreur sur la position verticale donnée par le GPS pouvant atteindre 20 mètres, les courbes de niveau des cartes de l'IGN ont été jugées plus précises.

Les formes de l'exokarst ont été prédéfinies d'après la bibliographie, puis précisées suite aux observations de terrain. Au total, sept morphologies karstiques ont été distinguées : dolines fermées, dolines trou, dolines gouffres, dolines pertes, dolines-émergence-perte, gouffres et mardelles. Elles sont liées aux processus définis précédemment : le soutirage/suffosion, la dissolution et l'effondrement (Annexe 1). On prend soin de distinguer les formes karstiques stables (dolines colmatées, grottes, gouffres, mardelles) des désordres (dolines de soutirage, doline d'effondrement, pertes, fontis, etc.).

2.1.3. Evaluation des critères explicatifs potentiels par la théorie du poids des évidences

Pour chaque zone d'étude, la première étape consiste à distinguer les secteurs karstifiés des secteurs non karstifiés en utilisant la localisation de toutes les formes karstiques inventoriées (stables et instables) et la nature de la roche en profondeur. Les zones non karstiques (roche granitique par exemple) sont donc soustraites à l'analyse puisqu'elles ne peuvent pas contenir de désordres. La deuxième étape se focalise sur la zone karstifiée pour laquelle l'ensemble des désordres inventoriés et les critères explicatifs potentiels sont croisés selon la méthodologie suivante :

La théorie du poids des évidences (« Weights of Evidence ») offre un cadre robuste pour évaluer la pertinence des critères explicatifs et les hiérarchiser et a été utilisée dans des études portant sur la cartographie de la susceptibilité d'effondrement de cavités (Fontaine et al. 2008, Oh et Lee 2010). Le principe de l'approche est exposé ci-dessous, les détails théoriques peuvent être consultés en Annexe 2.

Pour un critère explicatif potentiel cartographié (par exemple la nature lithologique du substratum), il s'agit de déterminer dans un premier temps les surfaces respectives de chaque lithologie dans l'ensemble de la zone d'étude (par exemple par comptage du nombre de pixels) puis de déterminer la répartition des désordres par lithologie, c'est-à-dire le pourcentage de désordres dans chaque classe lithologique. Intuitivement, il est clair que si les désordres sont essentiellement regroupés dans une classe lithologique, cette classe a un fort pouvoir explicatif, dans le cas contraire, (i.e., désordres répartis dans les différentes classes), le pouvoir explicatif du critère devient non significatif.

La théorie du poids des évidences formalise l'estimation du pouvoir explicatif en calculant des poids positifs (W^+ : densité de désordres associé à chacune des classes) et des poids négatifs (W^- : densité des désordres qui ne sont pas associés à chacune des classes). La somme des poids informe sur le pouvoir de contraste du critère explicatif potentiel. Si le pouvoir de contraste est trop faible, le critère est évalué non significatif et n'est pas retenu. Pour les critères retenus, la valeur du contraste permet de hiérarchiser les critères : un critère ayant un fort contraste sera prépondérant par rapport à un critère ayant un contraste plus faible.

Cette approche s'applique à la fois à des critères qualitatifs (par exemple lithologie) et à des critères quantitatifs (par exemple profondeur de la nappe) par l'introduction de classes de valeurs pour ces derniers. Il faut par contre disposer d'un inventaire représentatif des désordres à l'échelle de la zone d'étude. Une fois les critères explicatifs évalués, il s'agit de tester leur indépendance à l'aide d'un test statistique non paramétrique (chi-carré). En effet, pour cartographier la probabilité d'occurrence de désordres, seuls des critères indépendants doivent être combinés dans l'approche multicritères afin d'éviter la redondance des poids.

Le choix des critères explicatifs à tester par le poids des évidences est conditionné par la connaissance du contexte karstologique du site d'étude et la possibilité de disposer d'une cartographie du critère à l'échelle du site.

2.2. VAL D'ORLEANS ET ENVIRONS

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives lorsque l'effondrement est de grande envergure et/ou situé au droit d'infrastructures. L'occurrence de fontis sous les digues de la Loire fait craindre une déstabilisation/rupture locale de celles-ci avec les risques d'inondation qui pourraient en découler. L'origine des fontis est liée à la karstification des calcaires de Beauce qui forment le substratum du Val sous une couverture peu épaisse d'alluvions : le soutirage de sédiments meubles des alluvions dans les conduits karstiques entraîne une perte de matière dans la couverture qui peut résulter en la déstabilisation de celle-ci jusqu'en surface pour former un fontis.

A notre connaissance, la première étude d'évaluation de l'aléa effondrement karstique dans la région est celle de Donsimoni et al. (2008) effectuée sur les 630 km de levées de la Loire entre Nièvre et Loire-Atlantique. Il en ressort que le secteur le plus sensible est situé entre Bouteilles (Loiret) et Blois (Loir-et-Cher) et comprend donc le Val d'Orléans.

2.2.1. Délimitation du secteur d'étude

Afin de couvrir un secteur où la prédisposition aux désordres est contrastée, le secteur d'étude comprend le Val d'Orléans mais déborde également sur la forêt d'Orléans au nord et la Sologne au sud (Figure 1). Au final, 29 communes ont été sélectionnées pour un secteur d'étude couvrant une superficie totale de 712 km².

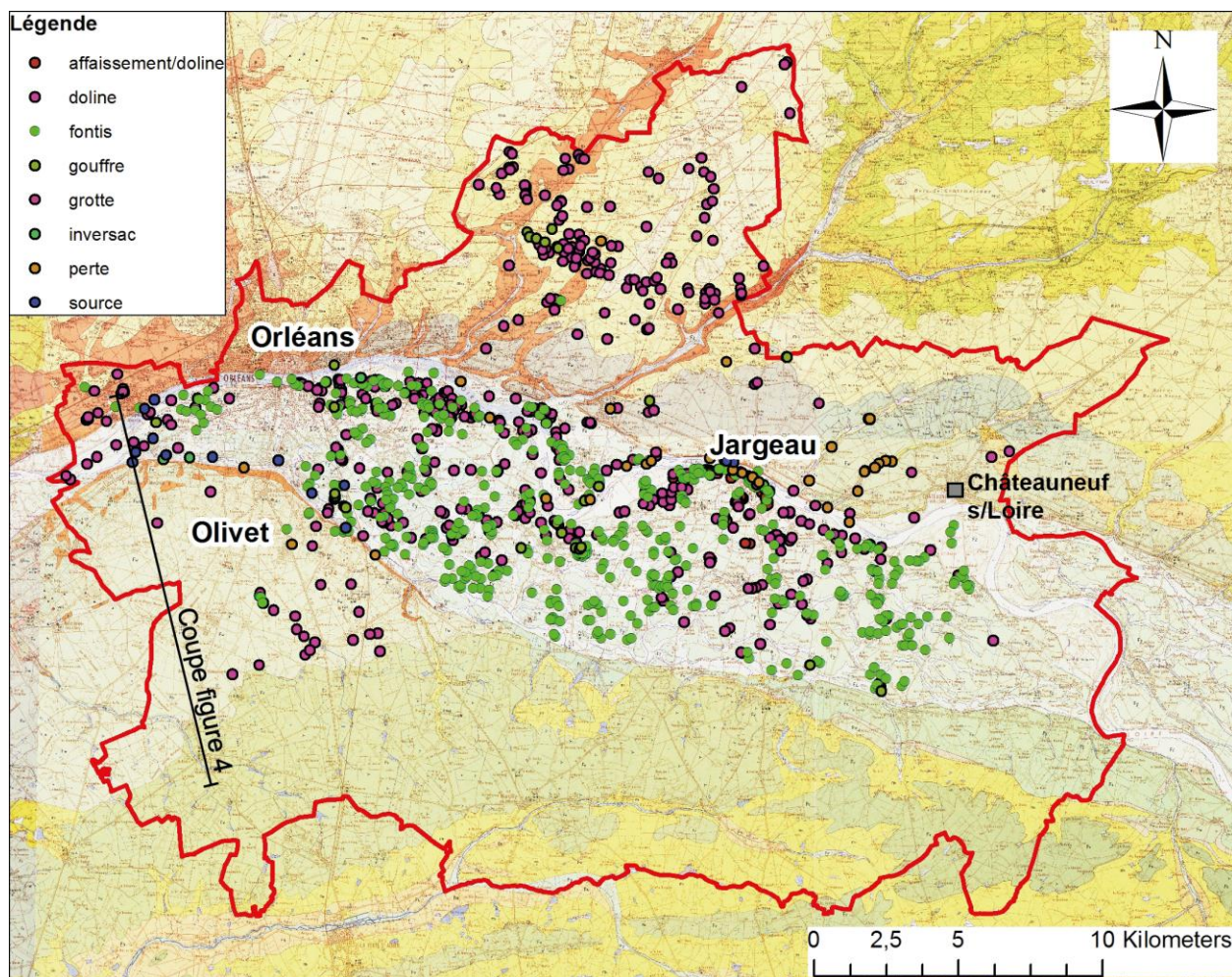


Figure 1 : Délimitation de la zone d'étude du Val d'Orléans et report des formes karstiques répertoriés sur la carte géologique à 1/50 000

2.2.2. Contexte géologique

Le Val d'Orléans correspond à un élargissement sensible du lit majeur de la Loire qui se marque par des divagations du lit mineur dans la traversée de la zone d'épandage des formations détritiques argilo-sableuses du Burdigalien, elles-mêmes recouvrant en partie les Calcaires de Beauce : de 1-2 km en amont de Sully-sur-Loire, sa largeur passe à 6 km en aval de cette localité puis atteint une largeur maximale de 8 km au droit de Sandillon. A l'aval d'Orléans la largeur se réduit brutalement à 2-3 km.

La formation des Calcaires de Beauce correspond à l'extension d'un (ou plusieurs) lac qui s'est formé entre 43 et 25 millions d'années (Eocène à Aquitaniens) dans la Beauce et aussi sur la majeure partie de la Sologne. La sédimentation calcaire atteint 200 m d'épaisseur au centre du bassin. Elle est interrompue par un épisode marin qui dépose les Marnes à huîtres et les sables de Fontainebleau. Elle se termine par une émergence à laquelle correspondent des dépôts détritiques (argile et sable de Sologne du Mio-Pliocène) apportés par les cours d'eau puis par la Loire (Maget & Pointet 2006). La notion de calcaire de Beauce doit néanmoins être précisée. Au sens strict (Lorrain 1972), « le calcaire de Beauce véritable est bien équivalent de l'ensemble des calcaires de l'Agenais constituant l'Aquitaniens lacustre. Il comporte deux assises : en bas les calcaires ou marnes de la Neuville et de la Voise, qui passent latéralement à la molasse du Gâtinais.

Par-dessus le calcaire de Pithiviers à *Helix tristani* et son extension vers le gîte de Selles-sur-Cher à *Cerathorinus tagicus* et mammifères de l'horizon de Saint-Gérard» ; au sens large, qui fait plutôt appel à une définition lithologique et géographique, le Calcaire de Beauce est l'ensemble des faciès lacustres à dominante calcaire qui se sont déposés, au milieu du Tertiaire, dans le sud-ouest du Bassin parisien (Figure 2) (Lorrain, 1972). Le sens large de la définition des calcaires de Beauce est retenu dans la présente étude.

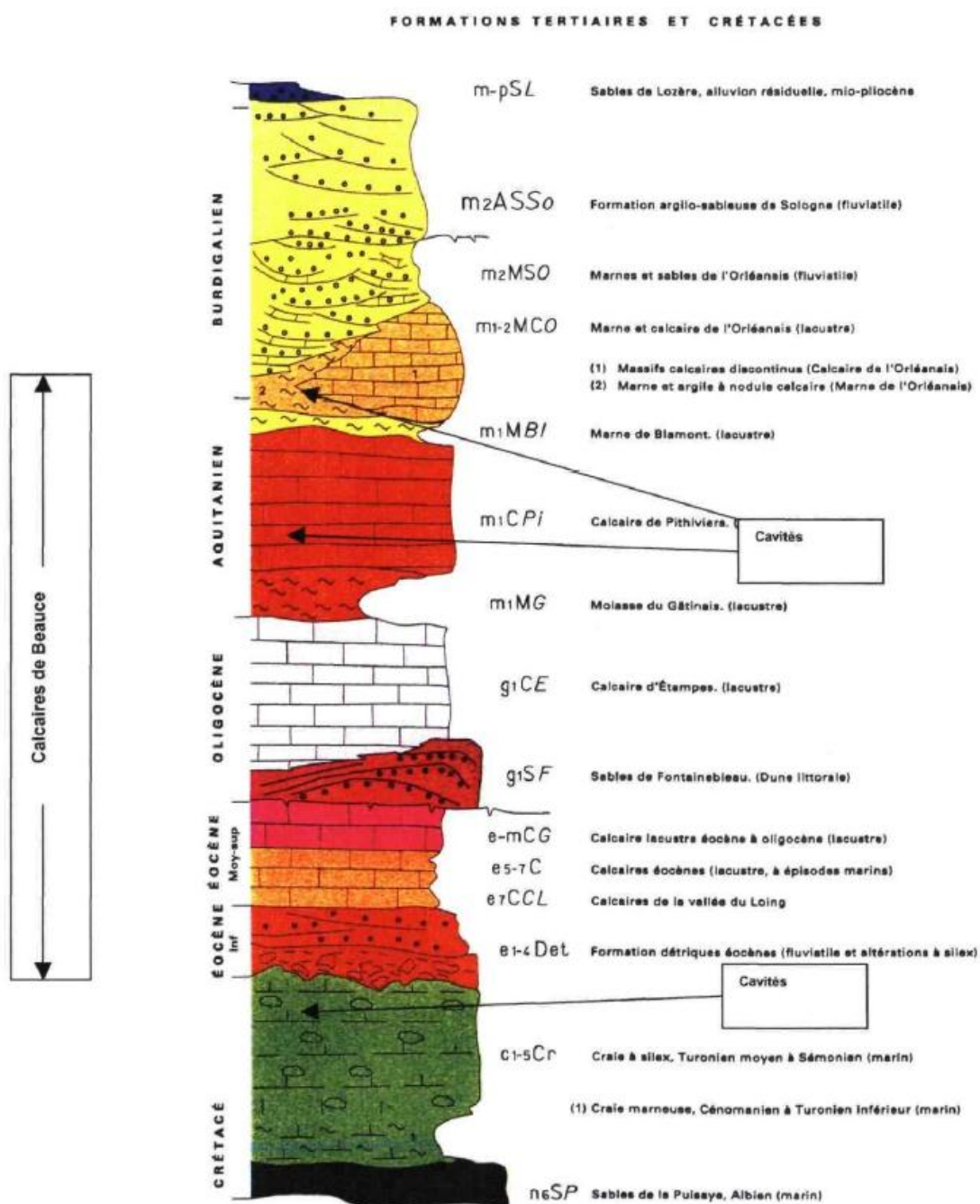


Figure 2 : Succession des unités lithologiques du Loiret dans les formations crétacées et tertiaires (Giot et al. 2003)

Le calcaire de Pithiviers est séparé du calcaire d'Etampes par la molasse du Gâtinais dont l'épaisseur passe de quelques mètres au maximum sous le Val d'Orléans à l'ouest de la faille de Sennely, à plusieurs dizaines de mètres vers l'est et le sud-est. L'épaisseur (25-30 m à l'ouest de la faille) et l'extension vers l'est des faciès calcaires de Pithiviers s'en trouvent d'autant plus réduites que les bancs marneux de sa partie supérieure, peu épais à l'ouest de la faille, envahissent la moitié supérieure des calcaires à l'est de la faille.

Entre les villes de Gien et Châteauneuf-sur-Loire (à l'extrême est du secteur étudié), la base des alluvions de la Loire repose sur la Molasse du Gâtinais. Les niveaux perméables des calcaires d'Etampes et de l'éocène calcaire sont ainsi isolés de la Loire. Au contraire, entre Châteauneuf-sur-Loire et Blois (majeure partie et ouest du secteur étudié), le lit de la Loire entame les Calcaires de Pithiviers et les communications entre la Loire et la nappe sont possibles (Martin, Giot et le Nindre, 1999) (Figure 3).

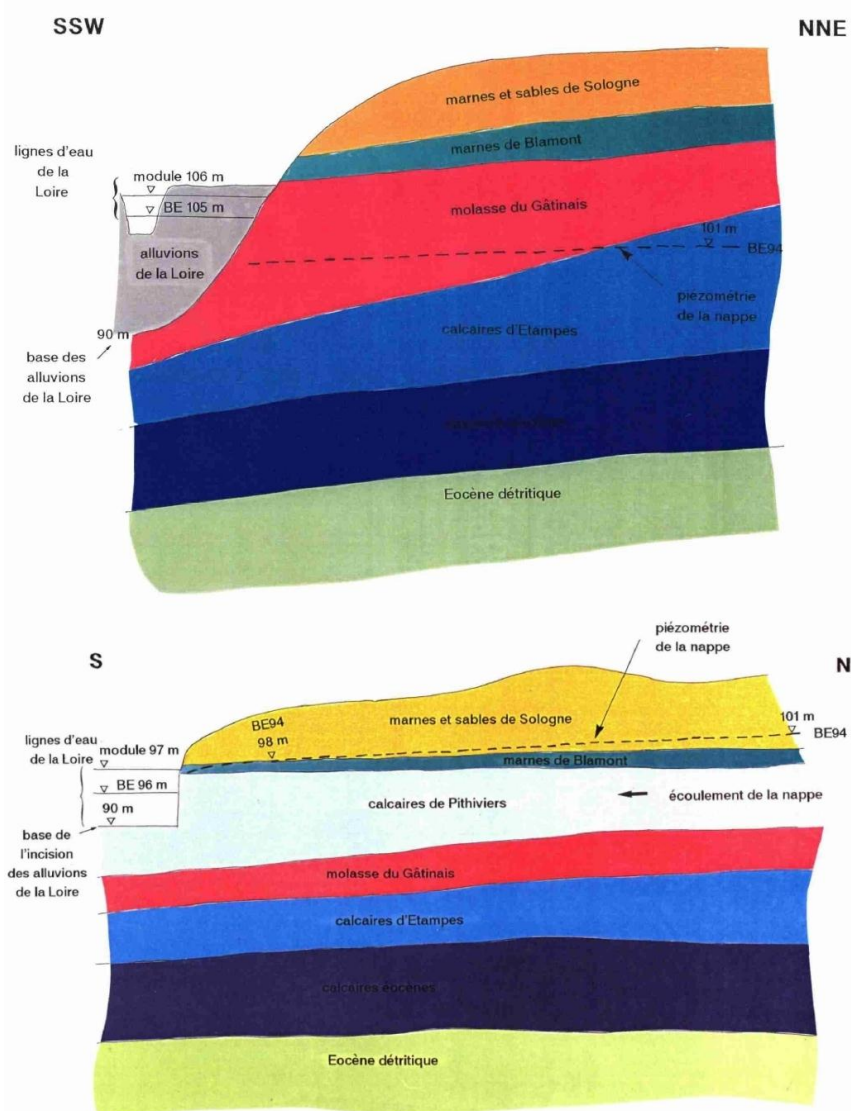


Figure 3 : Coupes schématiques interprétatives, transversalement au Val-de-Loire entre Gien et Châteauneuf-sur-Loire (en haut) et Châteauneuf-sur-Loire et Blois (en bas) (Martin, Giot et le Nindre, 1999)

Partie sud du secteur d'étude : nord Sologne

La Figure 4 illustre le contexte géologique du secteur d'étude avec un calcaire de Beauce sous couverture d'alluvions anciennes (Fw) dans la partie nord puis recouvert des sables et argiles de Sologne et d'alluvions anciennes (Fw et Fv) dans la partie sud. Cette partie sud des calcaires n'a pas été soumise à l'altération superficielle (absence de karstification).

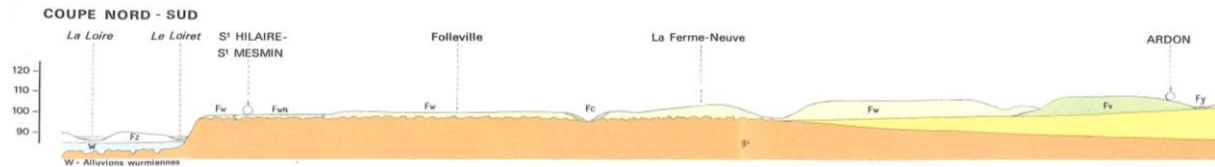


Figure 4 : Coupe Nord-Sud du Val d'Orléans au village d'Ardon (Sologne). Les calcaires de Beauce (g1, figuré en marron) sont surcreusés au niveau du Val puis couverts par des alluvions anciennes (Fw) ; ils plongent ensuite vers le sud et sont couverts par la formation des sables et argiles de Sologne (m1, figuré jaune) qui s'épaississent rapidement vers le sud. Des alluvions anciennes (Fw et Fv) coiffent les argiles de Sologne (extrait de la notice explicative de la carte géologique 1/50 000 Ferté St-Aubin)

Origine et évolution du réseau karstique dans le Val d'Orléans

Les calcaires de Beauce offrent une grande variété de faciès lithologiques : à l'exception de calcaires micritiques plus massifs, ils comportent presque tous de très nombreux vides de tailles diverses leur conférant une porosité primaire élevée. L'interconnexion de ces vides contribue à la perméabilité du calcaire qui est encore augmentée par la fracturation et la karstification.

Ces bancs durs, qui sont vacuolaires dans le cas du calcaire de Pithiviers, comportent de petites « canalicules » qui vont favoriser la circulation des eaux (Lorrain, 1972). L'observation des données des sondages de la BSS effectués dans le Val d'Orléans conforte ces interprétations. En effet, sur les 2500 sondages répertoriés, 70 mentions sont faites à des karsts rencontrés en sondages (cela ne concerne que les sondages suffisamment profonds pour atteindre le calcaire de Beauce sous les alluvions et/ou le Burdigalien).

Sur ces 70 mentions, 64 ont lieu dans un niveau strictement calcaire dont 19 attribuées au « Calcaire de Beauce », 25 au Calcaire de Pithiviers et 20 à un calcaire décrit comme « vacuolaire ». Seuls 6 karsts sont décrits dans un milieu non calcaire s.s. (Marnes graveleuses, calcaire argileux, etc.).

La fissuration du Calcaire de Pithiviers, qui induit l'orientation du karst, est en partie originelle et en partie liée à la tectonique et à l'altération.

De manière générale, la fissuration du calcaire est un phénomène mal connu. Certaines études menées localement mettent en évidence des directions principales de fissurations qui peuvent être reliées aux déformations régionales des séries lacustres NE-SW mais également des directions secondaires difficilement explicables, sinon liées à des phénomènes tectoniques locaux (Lorrain 1972 ; Trautman 1974).

La dissolution des calcaires est facilitée lorsque ceux-ci sont altérés. Des phénomènes de cryoturbation de la partie supérieure des calcaires ont pu être observés (Gigout, 1972). Ces cryoturbations interviennent en domaine périglaciaire, lorsque le substratum est à nu, c'est-à-dire pendant les périodes glaciaires (voir ci-dessous). Les phases glaciaires sont marquées par une aridité importante qui empêche toute dissolution et karstification des calcaires, c'est donc au retour de l'humidité, pendant les phases de transition puis pendant les interglaciaires que le karst a fonctionné.

Le Val d'Orléans

Depuis le Pléistocène inférieur et à la faveur des cycles glaciaires-interglaciaires qui marquent le Quaternaire, la Loire a incisé son substratum et formé des terrasses qui sont globalement étagées du sud vers le nord dans la région d'Orléans (Giot et Garcin 2002, Tissoux et al. 2013).

Les travaux réalisés sur les alluvions du lit majeur de la Loire (Gigout 1974 ; Macaire 1981; Lepiller 2006) indiquent que la première phase de creusement dans le Val a eu lieu au tout début du Wechsélien ou stade isotopique 4, anciennement appelé Würm ancien, il y a environ 125 ka. L'incision a mis le calcaire à nu par endroit, déblayant les Sables et Argiles de Sologne et favorisant ainsi les phénomènes de cryoturbation lors du maximum glaciaire. Le remblaiement sédimentaire du Val par les alluvions de la Loire a débuté ensuite à la faveur de l'amélioration climatique, c'est également à cette période qu'a dû débuter la karstification au contact entre fleuve et calcaire de Beauce supérieur (calcaire de Pithiviers). La lithologie et l'épaisseur des alluvions sont complexes dans le Val, résultat d'une évolution polyphasée jusqu'à aujourd'hui. Néanmoins, les accumulations alluvionnaires sont constituées majoritairement par des graviers à la base, puis des sables plus ou moins grossiers et enfin des limons de débordement. Cette lithologie est classique dans les formations alluviales de la région (dépôts grossiers de versant ou charriés en transition glaciaire-interglaciaire, lorsque la végétation a disparu, permettant la déstabilisation des versants mais dont l'humidité est encore importante et que le fleuve tend à récupérer son profil d'équilibre lié à la baisse du niveau marin; pas de dépôt pendant tout le maximum glaciaire ; reprise de sédimentation par des sables en phase interglaciaire ; limon de débordement lorsque le cours a migré latéralement). Une étude menée par Castanet et al. (2003) a mis en évidence, au sein des alluvions du Val, la présence de paléochenaux supposés montrant une sédimentation argileuse à tourbeuse caractéristique de comblement de bras morts dans les vallées alluviales. Ces paléochenaux ont modifié le toit du substratum calcaire (surcreusement) et constituent vraisemblablement des zones de drain préférentiel des eaux de la nappe alluviale.

Ces auteurs ont décrit au moins trois paléochenaux ligériens :

- en amont du Val du lieu-dit « La Bouteille » à Guilly au lieu-dit la petite maison à Tigy,
- en contournement de la commune de Jargeau par le sud (Figure 5),
- du nord de la commune de Saint-Denis-en-Val au sud-est de la commune de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin.

Auxquels il n'est pas aberrant d'ajouter les ruisseaux principaux du Val d'Orléans.

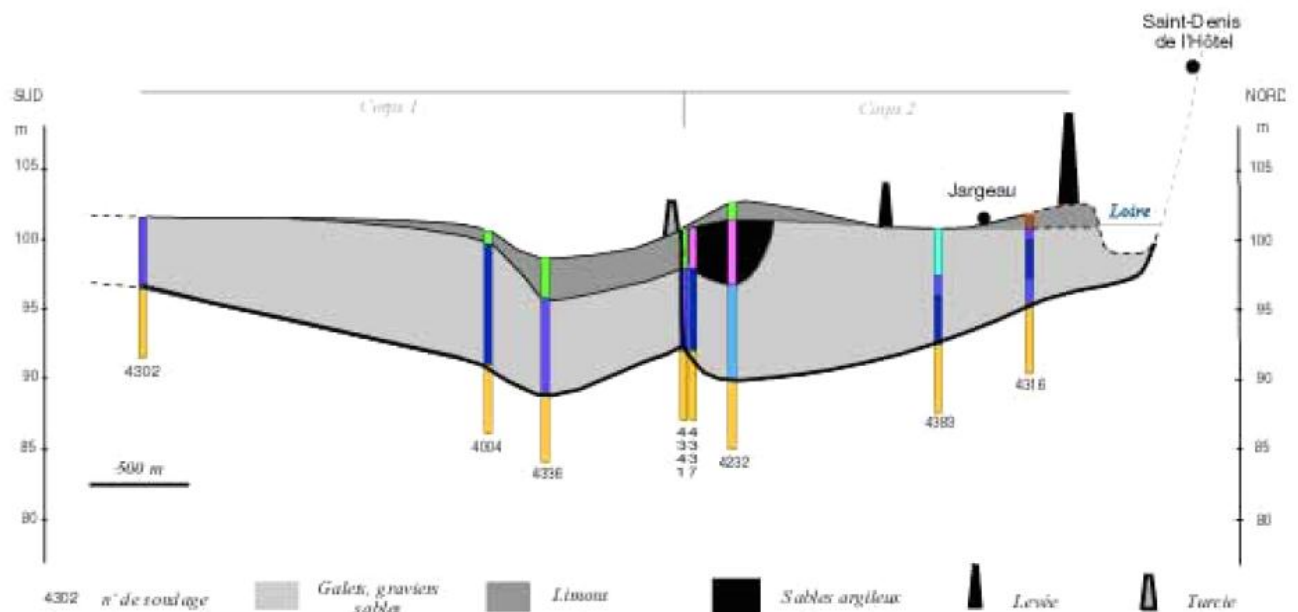


Figure 5 : Coupe géologique du Val au niveau de Jargeau sur la base d'observations en sondage (d'après Castanet et al. 2003)

2.2.3. Contexte hydrogéologique

Des cartes piézométriques réalisées en 1966 (Desprez 1967) fournissent des informations essentielles sur le fonctionnement hydrogéologique du Val d'Orléans : les cartes mettent en évidence l'existence de deux nappes, l'une libre dans les alluvions, l'autre dans les calcaires de Beauce dont la captivité est assurée à l'est du méridien de Châteauneuf-sur-Loire, par la présence continue de formations imperméables sous les alluvions. A l'ouest en revanche les niveaux des deux nappes semblent s'équilibrer du fait de la disparition de ce niveau imperméable.

D'une manière générale partout où un aquitard (marnes de Blamont, formation sablo-argileuse de Sologne, marnes de l'Orléanais) ne s'intercale pas entre les alluvions et les calcaires, les surfaces piézométriques des deux aquifères sont quasiment confondues en régime faiblement varié. En régime varié, les impulsions de charge se propagent avec un retard de quelques heures dans les alluvions. L'alimentation des alluvions par les drains karstiques sous-jacents, à la faveur de lacunes des formations argileuses intercalées, provoque l'apparition de remontées piézométriques qui peuvent entraîner des inversions locales et temporaires du gradient hydraulique.

Dans la partie sud du secteur d'étude (nord Sologne), le sable des terrasses alluviales récentes et les chenaux sableux du Mio-Pliocène renferment la première nappe accessible qu'atteignent les puits traditionnels ; les débits de ces puits restent généralement très inférieurs à 10 m³/h. Sous ces formations de couverture, la nappe des calcaires de Beauce est généralement captive et est alimentée essentiellement par drainance à partir des sables. Cette alimentation est très lente comme montré par les datations réalisées. La captivité de la nappe se traduit par des variations piézométriques relativement fortes (Maget 2006).

Dans la nappe des calcaires, les directions d'écoulement mettent en évidence des axes de drainage préférentiels de direction globale est-ouest qui paraissent en liaison avec les anciens lits de la Loire et qui correspondent probablement à d'anciennes pertes (ou poljés), comme le suggère la forme brusquement interrompue de certains de ces chenaux (Lepiller 2006). La morphologie des dépressions aujourd'hui fossilisées par les alluvions du lit majeur ou noyées sous les eaux du lit mineur, bien que de plus grandes dimensions, présente beaucoup d'analogies avec certaines pertes présentes en forêt d'Orléans qui absorbent des cours d'eau nés sur la formation de Sologne.

La Ville d'Orléans possède trois captages (le Gouffre, le Theuriet et le Bouchet) situés dans le Val et qui fournissent environ 80 % de l'eau pour la ville ainsi que pour trois communes du sud de la Loire (Saint-Denis-en-Val, Saint-Jean-le-Blanc et Saint-Pryvé-Saint-Mesmin). Ces ouvrages, peu profonds (17 à 26 m), captent l'eau dans le Calcaire de Pithiviers, fortement karstifié dans ce secteur proche des sources du Loiret.

La nappe des calcaires de Beauce est alimentée par les pertes de Loire : les premières pertes se situent au niveau de Châteauneuf-sur-Loire, à l'aval du talus formé par la surface piézométrique de l'aquifère alluvial (Lepiller, 2006). Ces pertes massives, pouvant atteindre une quinzaine de m³/s, sont la caractéristique principale du système et sont à l'origine du développement du réseau karstique (Chatelain et al., 1981 ; Chery 1983). Si la partie amont est caractérisée par la présence des pertes sur une vingtaine de kilomètres, la partie aval correspond à une zone d'exhaure, les résurgences du Loiret, dont la source dite le Bouillon, dans le Parc floral, est la plus en amont et la plus connue.

Sept traçages effectués par Michel Lepiller et l'Université d'Orléans (Figure 6), à partir des pertes situées dans le lit mineur ou d'un point d'injection qui se trouve sur l'axe de drainage karstique, montrent des valeurs de vitesses apparentes peu variables, entre 100 et 140 m/h, et peu dépendantes du débit de la Loire. On obtient des vitesses plus lentes vers les captages AEP de la ville d'Orléans (entre 73 et 85 m/h). Ce ralentissement est dû à la position latérale des captages par rapport à l'axe de drainage suivi par les traceurs depuis la zone des pertes.

Le colmatage de nombreuses pertes suite au remblaiement alluvial, et la perte d'énergie résultant d'une remontée générale équivalente du niveau de base sont des facteurs déterminants d'une diminution naturelle de la fonctionnalité du système karstique (Lepiller 2006).

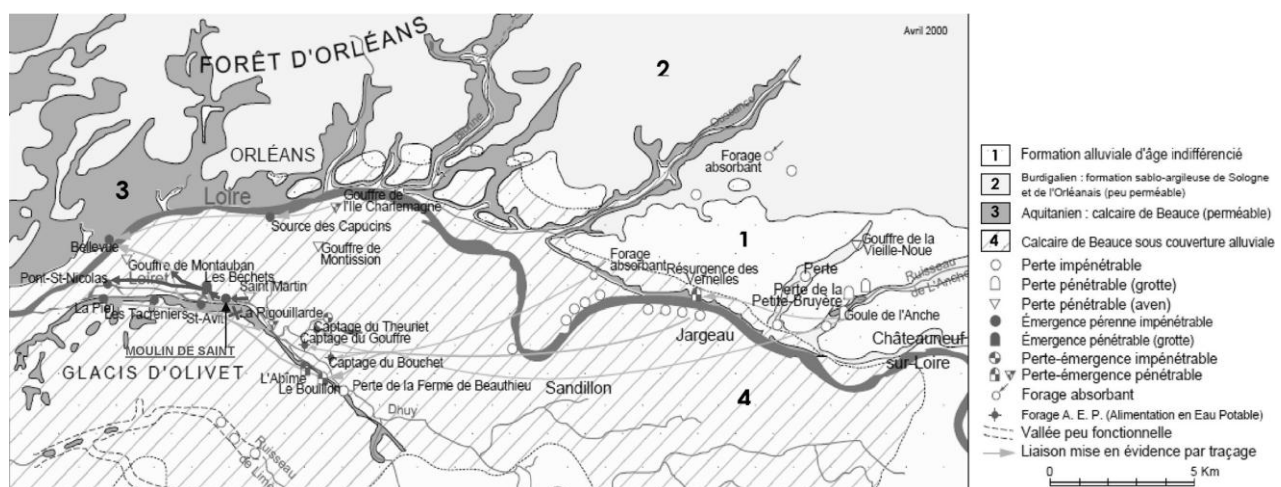


Figure 6 : Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans. (Jozia et al. 2010)

2.2.4. Inventaire des désordres d'origine karstique

Il s'agit de distinguer les désordres rencontrés dans le Val d'Orléans sous les alluvions, de loin les plus fréquents et les plus étudiés, des désordres des karsts de contact au nord (forêt d'Orléans) et au sud (coteau de Sologne) du Val.

Le premier inventaire détaillé des désordres rencontrés dans le Val est l'œuvre de Blanchard (1903) où 210 « gouffres » sont répertoriés sous forme de carte (Figure 7).

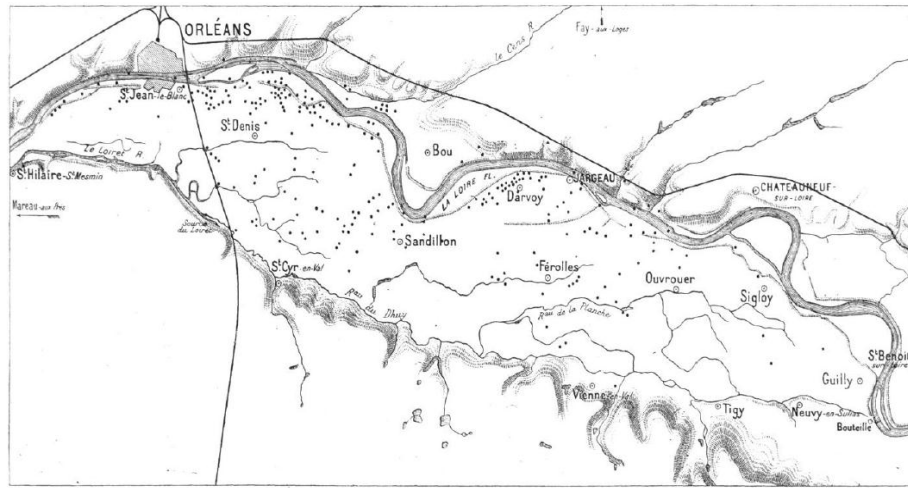


FIG. 1. — Gouffres du Val d'Orléans.
à 1 : 200 000.
Les points noirs représentent les gouffres

Figure 7 : Carte des « gouffres » du Val d'Orléans (d'après Blanchard 1903)

Les cartographies ultérieures sont celles de Desprez (1967, 1976, 1977) qui répertorie 391 « gouffres » comblés ou effondrements potentiels et les 252 « gouffres » et dolines ont été digitalisés dans son étude la plus récente.

Lepiller (2006) décrit la bîme (fontis) de la ferme à Bardy (commune de Sandillon) apparue soudainement en juin 1984 et dans laquelle il fut possible de descendre de 6 m jusqu'au toit des calcaires de Pithiviers pour en faire le levé géologique (Figure 8) : la séquence granulométrique va de galets-cailloutis attribués au Pléistocène sup. à la base vers des graviers et sables (Holocène) puis des limons de plus en plus argileux au sommet (Holocène et récent). Cette séquence traduit la forte diminution d'énergie de la Loire qui a succédé à son enfoncement maximal dans le substratum calcaire. L'alluvionnement a entraîné le colmatage des pertes creusées dans le lit majeur du fleuve. La géométrie verticale des bîmes s'explique par la forte cohésion des matériaux de la paroi.

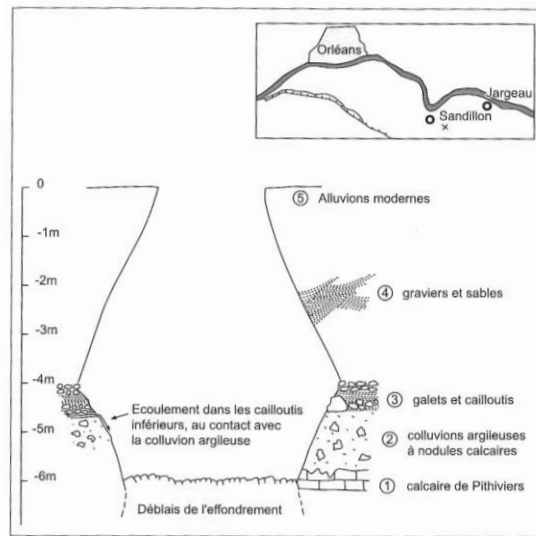


Figure 8 : Coupe géologique de la Bîme de la ferme à Bardy, Sandillon (Lepiller 2006)

La commune de Jargeau a fait l'objet de plusieurs études suite à des désordres ayant affecté le bâti : Roques et Pasquet (1991) ont réalisé une analyse géotechnique de maisons fissurées et diagnostiquent des affaissements différentiels ayant pour origine la suffosion et le soutirage des sédiments par les conduits karstiques sous-jacents (Figure 9).

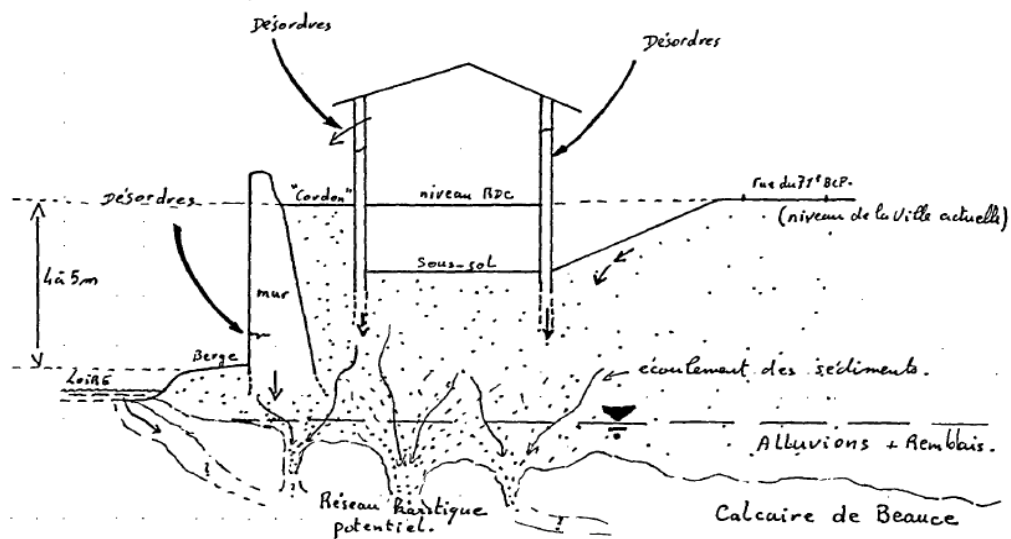


Figure 9 : Affaissements différentiels par suffosion/soutirage vers les conduits karstiques conduisant à la fissuration du bâti, commune de Jargeau (d'après Roques et Pasquet 1991)

Une cartographie préliminaire de l'aléa mouvements de terrain associé à la présence de karst fut réalisée par Colleau et al. (2005) : un inventaire en trois phases (exploitation des documents existants, enquête auprès des habitants, validation sur le terrain) a permis de recenser 49 désordres : 32 dolines de soutirage et 17 fontis. Aucune corrélation objective et fiable ne peut être établie entre la répartition spatiale des désordres et les critères de susceptibilité (piézométrie, épaisseurs des alluvions, fracturation).

Le désordre récent de plus forte intensité est celui apparu sous une habitation sur la commune de St-Pryvé St-Mesmin (diamètre 16 m, profondeur jusqu'au toit de nappe 7,5 m) le 22 mai 2010 (Figure 10). L'intensité du phénomène semble indiquer la rupture du toit d'un conduit karstique (Thierry & Baltassat 2010).



Figure 10 : Effondrement d'une habitation suite à l'apparition d'un fontis, St-Pryvé-St-Mesmin, 22 mai 2010

Le travail de Donsimoni et al. (2008) portant sur la réduction du risque d'effondrement de la digue lié à la présence de ces conduits souterrains naturels présente 51 désordres dans le secteur d'étude sur les deux rives de la Loire (20 fontis, 16 « effondrements », 8 pertes, 7 gouffres). Les sources d'information sont la DIREN Centre, la DDE Loiret et les spéléologues.

La base de données nationale BD cavités (Trouillard-Perrot et al. 2003) recense sur la zone d'étude 191 dolines, 28 pertes, 26 dolines de soutirage, 24 gouffres, 20 fontis, 17 « effondrements », 14 sources, 4 fosses, 2 grottes (sources : BSS, carte géologique 1/50 000, carte IGN 1/25 000, spéléologues, enquêtes communales, observations de terrain).

Le Laboratoire régional de Blois (CETE Normandie-Centre, devenu entretemps CEREMA Dter NC) a mis à disposition l'information sur la localisation de 37 désordres (17 « effondrements », 20 fontis), informations issues des Archives, de la DDT45 et de rapports du LRPC/CETE.

La carte géologique au 1/50 000 (La Ferté St-Aubin, feuille XXII-20) a permis en outre de répertorier 25 dolines en bordure de forêt de Sologne (sud de la zone d'étude).

Le travail de terrain a permis de réaliser 61 observations sur des dolines colmatées et des désordres.

Au final une base de données a été consolidée à partir des différentes sources d'information et des observations de terrain et comporte 1107 formes karstiques avec dominance de dolines et de fontis (Figure 11).

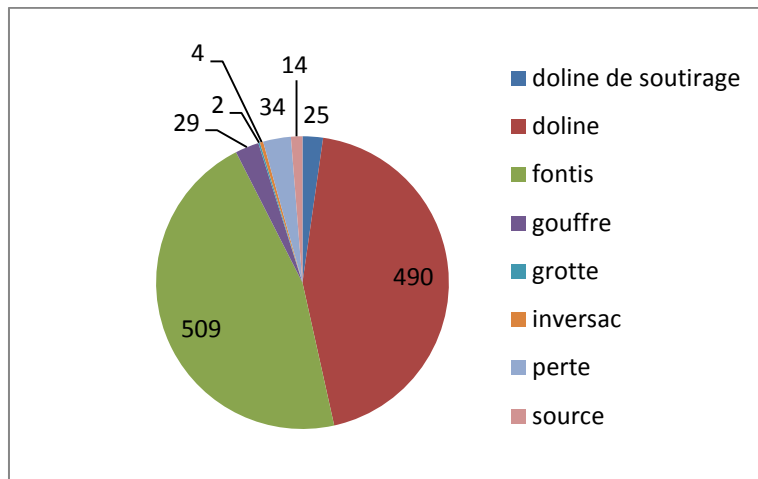


Figure 11 : Répartition des formes karstiques pour le site du Val d'Orléans (total 1 107 formes). Les dolines regroupent à la fois les dolines colmatées, actives et celles pour lesquelles le degré de stabilité n'a pas pu être déterminé

Toutes ces formes indiquent la karstification du calcaire de Beauce ; toutefois seule une partie des formes karstiques témoignent de désordres en surface (fontis, dolines de soutirage, pertes, inversacs) alors que les autres sont des morphologies stables (dolines de dissolution, grottes).

Chaque forme est catégorisée en regard de sa stabilité : actif (599 points), stable (57), indéterminé (451) pour les points non documentés et non visités.

Probabilité d'occurrence

Blanchard (1903) indique que 16 gouffres s'étaient formés en 1901.

Dans l'étude de Colleau et al. (2005) aucune période de retour n'a pu être estimée : le plus vieux désordre daterait d'il y a 50 ans et le plus récent de 3 ans.

Les informations fournies par le CETE sur les apparitions récentes de désordres montrent une fréquence de l'ordre d'un événement par an (1 en 2007, 1 en 2008, 3 en 2010, 1 en 2011). Cette fréquence est certainement sous-estimée puisque nombre de fontis ne sont pas signalés et/ou documentés.

Dans la base de données constituée, la date d'apparition est connue pour 35 désordres. La distribution par mois est présentée Figure 12 : il semble que plus de désordres apparaissent au printemps et en automne, toutefois l'échantillonnage n'est peut-être pas suffisamment représentatif pour en tirer des conclusions.

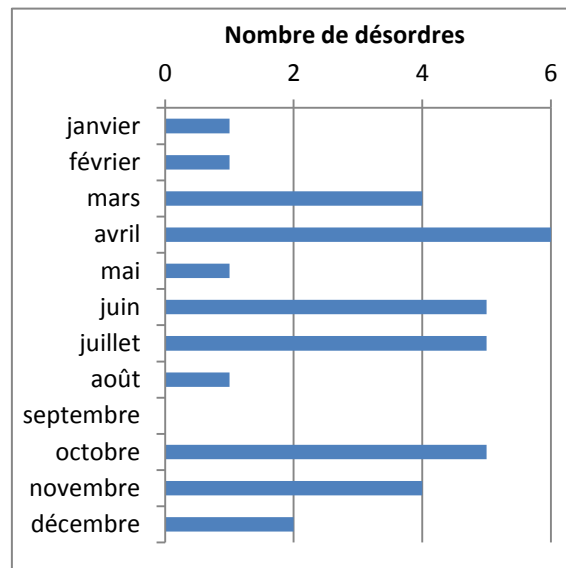


Figure 12 : Distribution de l'apparition de désordres liés au karst dans le val d'Orléans en fonction du mois (35 observations)

2.2.5. Analyse de l'intensité des désordres

Analyse globale de l'ensemble des formes karstiques

Les désordres pour lesquels des informations sont disponibles sont au nombre de 88 : dolines de soutirage, dolines, fontis et gouffres. L'analyse globale de la géométrie de ces désordres montre deux populations (Figure 13) :

- d'une part, les dolines et les dolines de soutirage avec des diamètres systématiquement plus importants que les profondeurs et des diamètres presque toujours pluri-décamétriques,
- et, d'autre part, les fontis et les gouffres avec des diamètres du même ordre de grandeur que les profondeurs et des diamètres toujours inférieurs à 20 m.

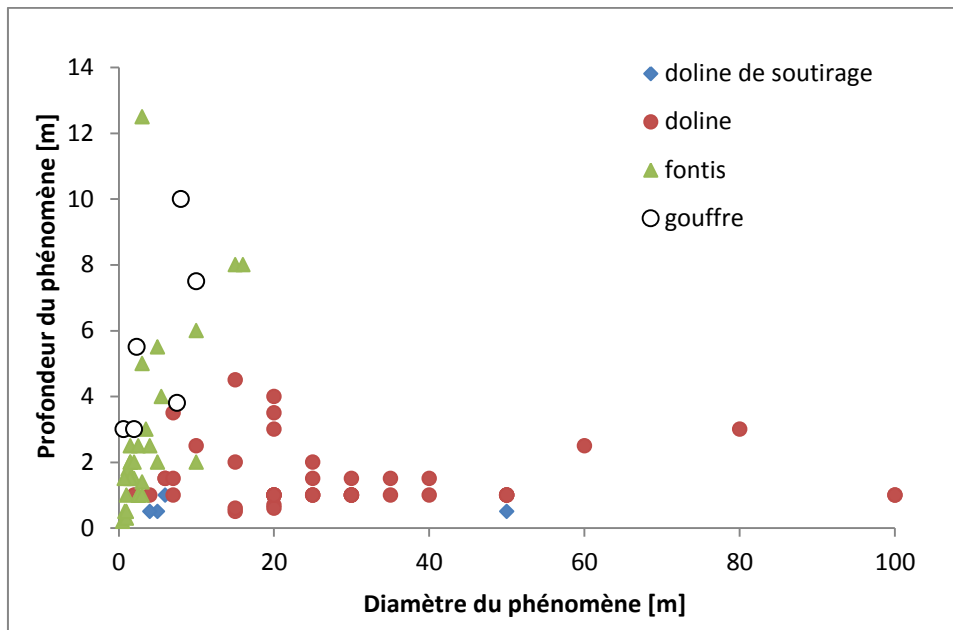


Figure 13 : Intensité des désordres liés au karst pour le site du Val d'Orléans (88 observations)

Cette première analyse concerne l'ensemble des formes karstiques. Parmi celles-ci, seules les fontis et les dolines de soutirage sont des formes actives, récemment créées. En termes de gestion des risques, ce sont donc les formes karstiques les plus dangereuses, ce qui motive une analyse précise de leur intensité.

Comme expliqué dans le volume 1 du présent rapport (§ 2.3.2), l'intensité d'un désordre s'étudie suivant plusieurs étapes : tout d'abord selon le type de karst, puis selon le type de désordre, ensuite selon la dimension physique modifiée, et enfin selon des seuils représentatifs des dommages éventuels.

Analyse de l'intensité des fontis

Pour rappel, l'analyse des précédentes études fournit les éléments suivants :

- Blanchard (1903) indique que la plupart des fontis sont à talus raide et ont des diamètres compris entre 1,5 – 3 m. Il signale en outre un « effondrement » de 35 m de diamètre et 15 m de profondeur (ce fontis, non retrouvé lors de la présente étude, n'a pas été considéré dans l'analyse qui suit).
- Colleau et al. (2005) montrent à partir d'une enquête auprès des habitants de Jargeau que la majorité des fontis ont des diamètres de 2-4 m et une profondeur de 1-2 m. Un cas de fontis de 5-6 m de diamètre et 2 m de profondeur est en outre signalé.
- Le désordre récent le plus intense dûment documenté est celui apparu sous la villa de St-Pryvé St-Mesmin (16 m de diamètre, 8 m de profondeur).

La présente étude vient préciser et compléter ces précédentes études.

Parmi les fontis répertoriés, 40 sont renseignés en termes de dimensions (au moins le diamètre).

Une coupe géologique simple (épaisseur de recouvrement peu ou non cohésif, épaisseur de recouvrement cohésif, toit du substratum rocheux) a été associée à chacun de ces fontis grâce à l'analyse des dossiers de la Base de données du Sous-Sol (BSS).

Les 40 fontis correspondent tous à un environnement de **karst sous couverture perméable**. Ceux-ci auraient donc été générés soit par le soutirage-débouillage de la couverture (« dropout sinkhole ») soit, par l'effondrement du massif rocheux calcaire (« collapse sinkhole »). Pour rappel, ce dernier phénomène est rare selon toutes les publications disponibles. Aucune règle simple n'existe pourtant à notre connaissance pour distinguer de manière certaine ces deux types de phénomènes dans le contexte de karst sous couverture. On peut toutefois en imaginer deux :

La première consiste à vérifier la présence à proximité d'un réseau connu de cavités souterraines dont le volume du vide dépasse celui du vide créé par le fontis.

La seconde consiste à comparer le volume dégagé par le fontis de celui attendu de l'effondrement d'une cavité dans le calcaire et de celui attendu de l'effondrement d'une cavité dans la couverture. Si le volume dégagé par le fontis est supérieur à celui attendu pour un des deux types d'effondrement, alors l'effondrement ne peut être uniquement lié à ce type : il est soit lié soit à l'autre type d'effondrement (pour autant que celui-ci dégage un volume supérieur et suffisant), soit à la combinaison des deux types d'effondrement.

Pour le Val d'Orléans, le volume attendu d'une cavité dans le calcaire peut être estimé grâce aux explorations des plongeurs-spéléologues ayant reconnu le réseau souterrain au niveau de la Source. Les dimensions moyennes constatées sont de l'ordre de 3 m de large par 1 m de haut, le maximum étant de 11 m de large par 6 m de haut (source : [SIGES Centre](#)). En prenant ces dimensions maximales et en supposant qu'une cavité s'effondrerait de manière cylindrique, le volume maximal de l'effondrement d'une cavité dans le calcaire serait : $\pi \times (11/2)^2 \times 6 = 570 \text{ m}^3$ (ou bien tout simplement, il est possible d'avoir un cratère en surface de 11 mètres de diamètre et de 6 mètres de profondeur apte à enfouir une maison).

Les deux plus grands fontis observés à l'époque contemporaine dans le Val d'Orléans sont tous les deux localisés à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin. Il s'agit de celui ayant détruit un pavillon rue Gaston Deffie sur les bords de Loire (Thierry et Baltassat, 2010) et d'un fontis observé rue de la Cabrede par la DDE45 et repris par l'étude de Donsimoni en 2008. Leurs diamètres sont de l'ordre de 15 m et leurs profondeurs sont de 8 m. Les volumes correspondant sont d'environ 1400 et 1600 m³, soit près de trois fois le volume maximal attendu pour une cavité dans le calcaire telle que celle observée à la Source. Ces deux événements ne seraient donc pas uniquement liés à l'effondrement d'une cavité dans le calcaire.

L'hypothèse de l'effondrement d'une cavité créée uniquement dans la couverture n'est quant à elle pas vérifiée. D'après Sowers (1996), le diamètre à la surface ($\emptyset$) d'un fontis généré par l'effondrement d'une cavité créée dans la couverture dépend de l'épaisseur de la couverture (h) et de la cohésion de ces matériaux. Pour des matériaux non cohésifs : $\emptyset = h/5$. Pour des matériaux cohésifs : $\emptyset = 2/3 h$. L'épaisseur de la couverture à ces endroits étant de l'ordre de 10 à 15 m d'après les dossiers de la BSS les plus proches, les fontis attendus devraient en effet présenter un diamètre maximal de $15 \times 2/3 = 10 \text{ m}$, alors qu'ils sont de 15 m.

Il est donc très vraisemblable que ces fontis soient tous les deux liés à la présence de cavités englobant le calcaire et la couverture. Parmi les fontis bien renseignés sur la zone d'étude, il s'agit dans tous les cas des fontis les plus grands.

Ce raisonnement appliqué aux 38 autres fontis associés au karst sous couverture indique que deux d'entre eux pourraient également être liés, mais avec moins de certitude, à l'effondrement d'une cavité créée dans le calcaire et dans la couverture. Il s'agit du fontis découvert sur l'A71 dont le diamètre est particulièrement grand (8 m) en regard de l'épaisseur de couverture observée en sondage à cet endroit (9 m) et d'un fontis observé à Saint-Jean-le-Blanc par la DDE45 et repris par l'étude de Donsimoni en 2008, particulièrement volumineux (diamètre 10 m, profondeur = 6 m, soit un volume de 470 m³). A noter que le fontis de l'A71 est proche des deux grands fontis de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin. Les 36 autres fontis peuvent s'expliquer uniquement par l'effondrement d'une cavité créée dans la couverture.

La répartition des diamètres des 36 fontis liés à un effondrement de la couverture et des 2 fontis liés à un effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux est représentée en Figure 14.

Elle suit globalement une distribution de type log-normale, avec toutefois une surreprésentation des classes 4-5 m et 9-10 m. Cette surreprésentation pourrait s'expliquer par la population étudiée, qui reste relativement faible.

Le diamètre médian est de 2,5 m. Le diamètre maximal observé, 10 m, concerne environ 5 % de la population (2 fontis).

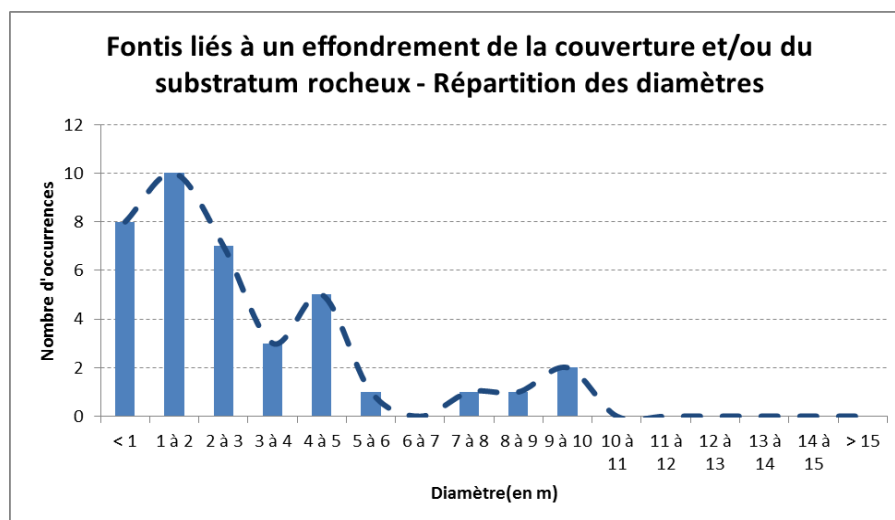


Figure 14 : Répartition des diamètres des fontis liés à un effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux pour le site du Val d'Orléans

A titre de comparaison, la Figure 15 représente la répartition des diamètres de fontis du Val d'Orléans et celles des fontis étudiés dans deux autres régions : aux Pinellas en Floride (Beck et Sayed, 1991) et dans la région de Centurion en Afrique-du-sud (Sartain *et al.*, 2011). Ces régions sont affectées par de nombreux fontis. Leurs contextes géologiques sont relativement similaires à celui du Val d'Orléans (karst respectivement calcaire et dolomitique, sous couverture perméable, avec des épaisseurs de couverture de l'ordre de celles observées sur le Val d'Orléans, avec toutefois des épaisseurs parfois très grandes en Afrique-du-Sud : plusieurs dizaines de mètres).

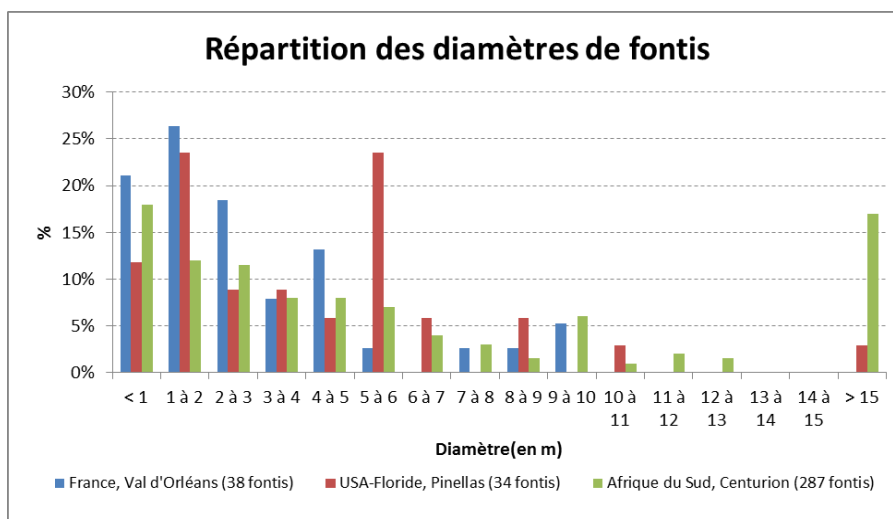


Figure 15 : Répartition des diamètres des fontis liés à un effondrement de la couverture ou du substratum rocheux pour les site du Val d'Orléans, des Pinellas en Floride et de la région de Centurion en Afrique-du-sud

De manière succincte, les différences principales entre ces régions concernent :

- La proportion des plus grands fontis (> 15 m) : en Afrique-du-Sud, les grands fontis sont bien plus nombreux qu'en Floride et que dans le Val d'Orléans, ceci étant principalement expliqué par les grandes épaisseurs de couverture en Afrique-du-Sud qui permettent de générer de grandes cavités.
- La surreprésentation en Floride de la classe de fontis 5-6 m, non expliquée par les auteurs. Cette surreprésentation pourrait être mise en parallèle avec celle de la classe 4-5 m du Val d'Orléans et pour laquelle nous ne disposons pas non plus d'explication.

Les diamètres de ces 38 fontis du Val d'Orléans peuvent également être répartis selon deux classifications d'intensité (celle du guide méthodologique français pour la réalisation de plans de préventions des risques - Cavités souterraines abandonnées – 2012 et celle proposée en Afrique du Sud par Buttrick *et al* (2001). Des précisions sur ces classifications sont données dans le § 2.3.2 du volume 1 du présent rapport. Cette répartition est illustrée en Figure 16.

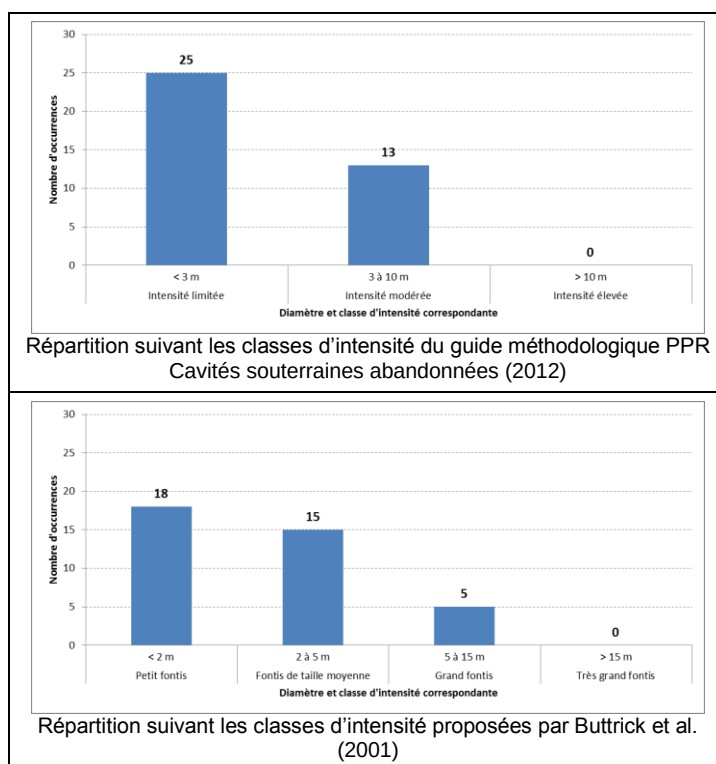


Figure 16 : Répartition par classes d'intensités des diamètres des 38 fontis liés à un effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux pour le site du Val d'Orléans

Ces deux classifications sont globalement cohérentes entre elles : la plupart des fontis liés à l'effondrement de la couverture et/ou du substratum rocheux sont d'intensité petite à moyenne / limitée à modérée, aucun n'est d'intensité très grande / élevée. Dans le détail, la classification sud-africaine semble toutefois plus réaliste que la classification française pour ce qui concerne les petits et moyens fontis. La classification « sud-africaine » révèle en effet que la classe des fontis moyens est relativement importante (15 sur 38, soit 39 %), ce que ne permet pas de détailler la classification française, alors que cette taille de fontis est vraisemblablement préjudiciable aux aménagements de petite taille (pavillons, etc.).

L'analyse réalisée pour ces 38 fontis sert enfin à proposer une méthode simple d'évaluation de l'intensité des fontis générés par effondrement d'une cavité créée dans la couverture. Les coupes géologiques associées à chaque fontis permettent en effet d'évaluer le diamètre attendu de fontis et de le comparer à celui réellement observé. Pour rappel du § 2.3.3 du rapport de phase 1 (RP-62595-FR, Perrin *et al.* 2013), cette évaluation se base sur les propositions empiriques de Sowers - 1998 (Figure 17).

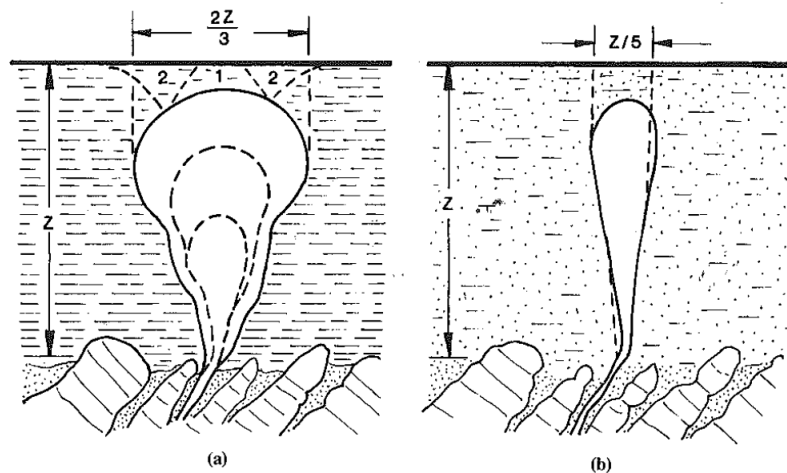


Figure 17 : Diamètre initial d'un fontis à son arrivée à la surface du sol (Sowers, 1996) :
a) Sol cohésif - b) Sol peu cohésif

Les propositions de Sowers ne sont pas directement applicables à la zone d'étude du Val d'Orléans car la coupe géologique simplifiée (présentée ci-dessous) est plus complexe que celles retenues par Sowers :

- couche 1 : Alluvions récentes de la Loire,
- couche 2 (pas toujours présente) : Matériaux argileux, type marnes de Blamont par exemple,
- couche 3 : substratum rocheux calcaire.

Cette coupe se fait succéder des matériaux non ou peu cohésifs (couche 1) et des matériaux cohésifs (couche 2). Or, Sowers propose un calcul pour chaque type de matériaux, mais rien pour une telle succession. Nous proposons « d'extrapoler » le principe du calcul en sommant les diamètres unitaires obtenus pour chacune des couches sur la hauteur de la couverture, c'est-à-dire :

$$\text{Diamètre estimé du fontis} = 1/5 \times \text{épaisseur couche 1} + 2/3 \times \text{épaisseur couche 2}$$

Pour aller plus loin, plusieurs calculs ont été réalisés en faisant varier les valeurs de Sowers entre 1/5 et 2/3 sur chacune des deux couches. Bien qu'imparfait, le calcul utilisant les valeurs initiales de Sowers est le plus satisfaisant : il est conservateur tout en n'étant pas trop pessimiste. La répartition globale des intensités ainsi estimées est globalement cohérente avec celle des intensités observées (Figure 18). Dans le détail, avec la classification française du PPR, 55 % des diamètres évalués aboutissent à la même classe d'intensité que ceux réellement observés alors que 26,5% sous-estiment cette classe et 18,5 % la surestiment. Avec la classification sud-africaine, la correspondance est plus conservatrice avec les pourcentages suivants : 50 % ; 16 % ; 34 %.

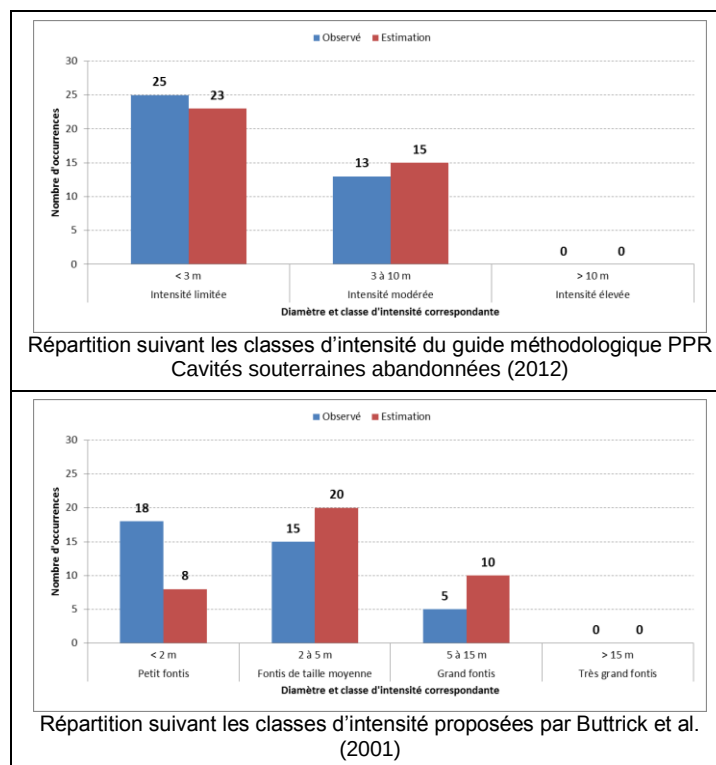


Figure 18 : Evaluation des diamètres de fontis selon les valeurs empiriques de Sowers (en marron) pour le site du Val d'Orléans, comparaison globale des intensités obtenues avec celles observées

Une évaluation plus précise du diamètre attendu pourrait être réalisée en se servant de calculs plus complexes. Pour cela, on peut en particulier citer les travaux de Tharp (1999, 2002) et les abaques établies par Drumm *et al.* (2009). Cette évaluation n'a pas été réalisée pour la présente étude car elle nécessite un travail approfondi, en particulier une synthèse géotechnique précise de l'ensemble de la zone d'étude. Elle pourrait l'être si l'on souhaite affiner l'évaluation de l'intensité, ou bien dans le cadre d'études de site.

Analyse de l'intensité des dolines de soutirage

Les données relatives aux dolines de soutirage sont malheureusement bien moins nombreuses que celles relatives aux fontis. Seules 12 dolines parmi les 32 inventoriées sont renseignées en termes de dimensions.

L'analyse de ces données montre par ailleurs que la moitié de ces dolines de soutirage pourraient en réalité correspondre à de « vieux » fontis s'étant élargis. Les pentes observées sont en effet souvent très fortes (> 25 % et atteignant souvent 100 %) et ne correspondent plus à des ordres de grandeurs attendus pour des affaissements.

Dans tous les cas, les données disponibles ne sont pas suffisamment nombreuses pour être représentatives du phénomène. Une analyse complète de l'intensité de ces désordres nécessiterait de bien connaître la pente de chacun de ces évènements.

2.2.6. Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement et carte d'aléa

1) Délimitation des zones karstifiées

La première étape consiste à délimiter les zones du secteur d'étude qui sont karstifiées en utilisant l'inventaire de toutes les formes karstiques connues (actifs, stables et indéterminés) et les informations géologiques disponibles. La carte de distribution des formes karstiques (Figure 19) montre que certaines zones ne sont pas affectées par la karstification, en particulier toute la zone sud-est, l'extrême amont du Val d'Orléans et certaines zones nord. Ces zones sont parfaitement corrélées avec la présence significative du Burdigalien (> 8 m d'épaisseur) qui coiffe les calcaires (sables et argiles de Sologne, marnes de l'Orléanais, marnes de Blamont) : dans un tel contexte, soit le karst n'a pas pu se développer (absence d'infiltration d'eau agressive), soit le karst n'est pas suffisamment développé pour se manifester en surface. De fait tous les secteurs avec des épaisseurs significatives de Burdigalien sont considérés comme non karstique et sont donc extraits de l'analyse (pas de probabilité d'occurrence de désordres possible).

La délimitation finale du secteur non karstique a été réalisée en utilisant la carte géologique harmonisée à 1/50 000, les informations en forage (données BSS), et un travail inédit de modélisation géologique 3D du Val d'Orléans réalisé par l'ISTO-BRGM (Auterives com. pers.) (Figure 19). La zone délimitée comme karstique couvre une superficie de 428 km² alors que la zone non karstique couvre 284 km².

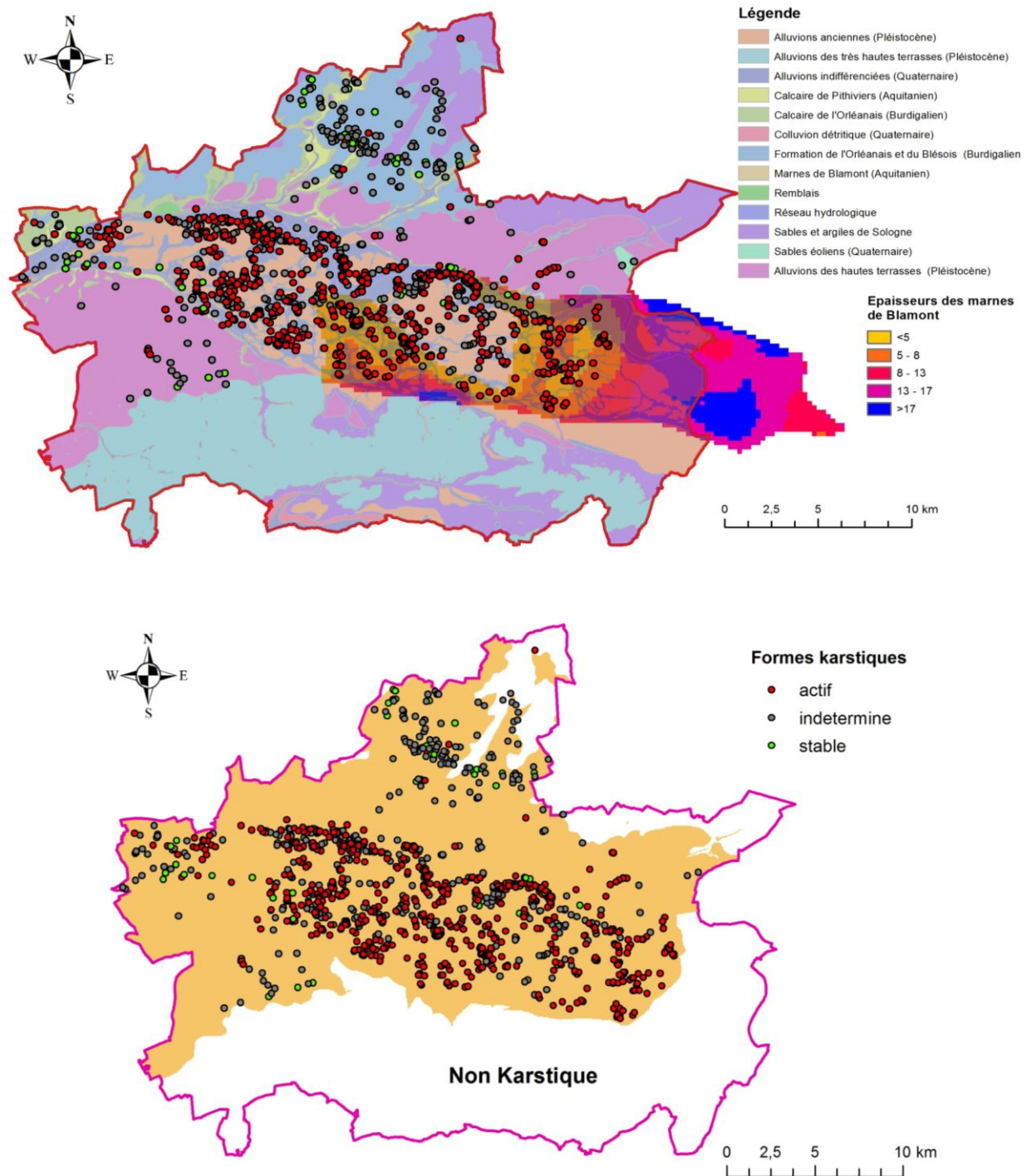


Figure 19 : En haut, carte géologique harmonisée à 1/50 000 du secteur d'étude et carte des épaisseurs des marnes dans le Val (Auterives inédit). En bas, délimitation de la zone karstique en jaune qui contient toutes les formes karstiques répertoriées

2) Cartographie des typologies de karst

Ensuite, à partir de la carte géologique, une carte des typologies de karst a été élaborée (Figure 20) par regroupement des différentes unités lithologiques : karst sous couverture perméable à peu perméable (regroupement des alluvions indifférenciées, alluvions anciennes, alluvions des très hautes terrasses, alluvions des hautes terrasses, formation de l'Orléanais et du Blésois, sables et argiles de Sologne) couvrant une superficie de 396 km² et karst nu (calcaires de Pithiviers, calcaires de l'Orléanais) d'une superficie de 32 km².

Il est clair que le nombre et la densité de désordres sont bien plus importants en contexte de karst sous couverture : 589 désordres sont situés dans ce contexte alors que seul 15 désordres sont répertoriés en karst nu.

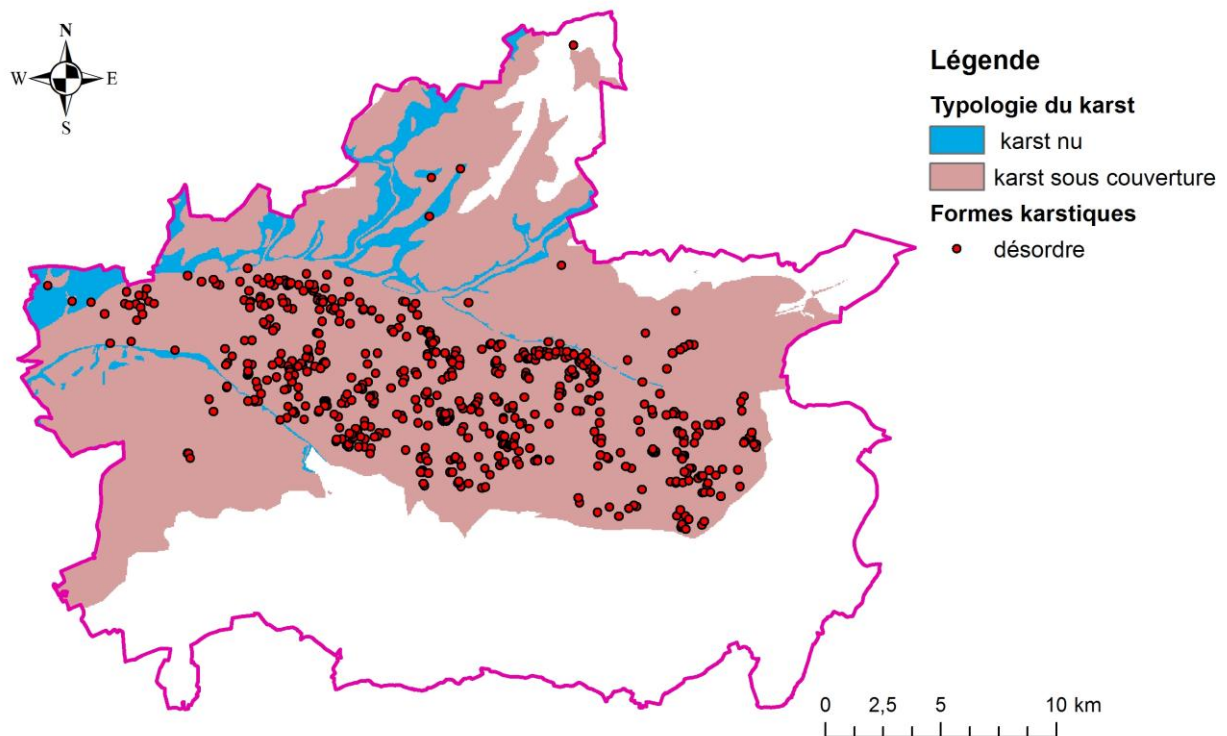


Figure 20 : Carte des typologies de karst pour le secteur d'étude du Val d'Orléans et répartition des désordres liés à la présence de karst

3) Cartographie des critères explicatifs

- Karst nu

Le nombre de désordres est faible (15) et ne se prête pas à une analyse statistique par le poids des évidences. Par contre, une cartographie multicritères peut être réalisée en partant du constat que 11 des 15 désordres sont situés à une distance de moins de 100 m d'un cours d'eau (les désordres sont des pertes dans la plupart des cas). Deux des désordres restant sont situés en zone urbanisée (La Chapelle St-Mesmin) et pour les deux autres désordres, un correspond à une perte de ruisseau non répertorié dans la BD Carthage et l'autre est situé dans le Parc Floral (Orléans) dans un terrain modifié par l'homme.

Il est donc raisonnable dans ce contexte de cartographier la susceptibilité en fonction du critère distance aux cours d'eau alimentant le karst (tampon de 100 m autour des cours d'eau) et du critère occupation du sol (secteurs anthropisés à plus forte susceptibilité, utilisation de la BD Corine LandCover).

La carte de susceptibilité résultante (Figure 21) présente trois classes de susceptibilité : une classe de susceptibilité faible-moyenne correspondant aux zones anthropisées à moins de 100 m des cours d'eau (578 pixels), une zone de susceptibilité faible correspondant soit à une zone anthropisée à plus de 100 m d'un cours d'eau soit à une zone non anthropisée à une distance de moins de 100 m d'un cours d'eau (6489 pixels), et finalement une zone à susceptibilité très faible ou l'on ne peut exclure des effondrements mais où aucun critère déclencheur potentiel n'est présent (5838 pixels).

Remarque : la trame méthodologique finale présentée dans le Volume 1 du rapport préconise finalement deux classes de susceptibilité pour contexte de karst nu : très faible et faible (cas d'un secteur anthropisé et/ou à proximité d'un cours d'eau).

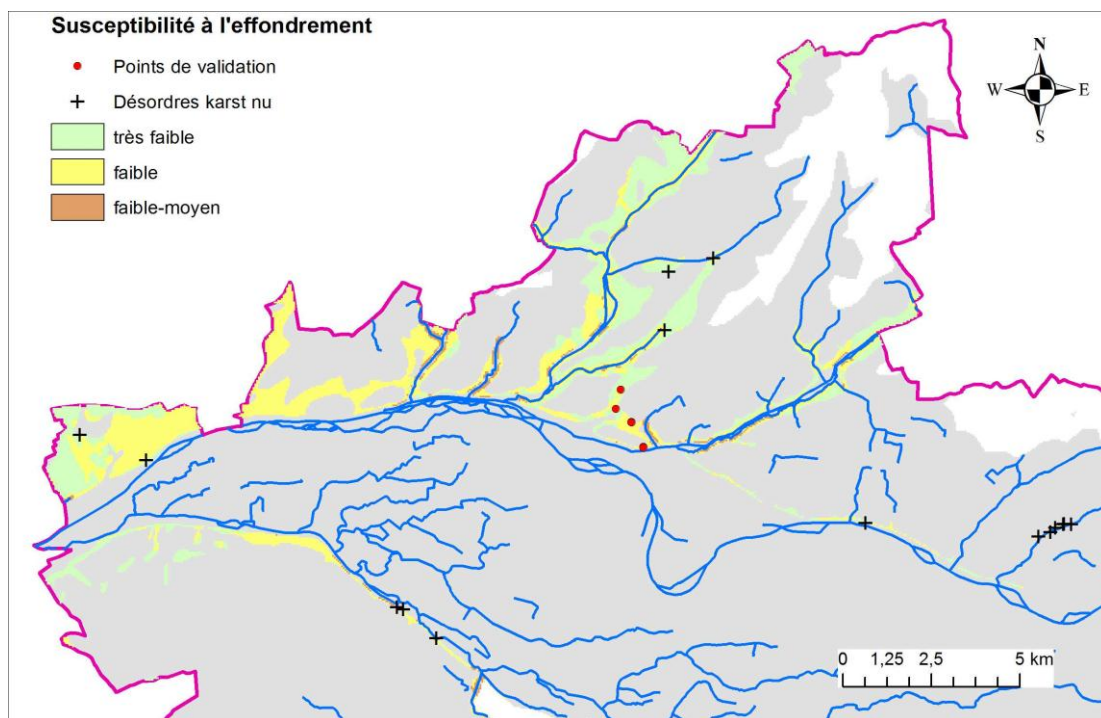


Figure 21 : Carte de la susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour les zones en karst nu ; les désordres répertoriés pour cette typologie de karst sont également indiqués par des croix

- Karst sous couverture

Les critères retenus pour ce type de karst (étude bibliographique et analyse des sites) sont le contexte nappe/couverture/toit du calcaire, l'épaisseur de la couverture peu perméable, et la distance aux cours d'eau drainé par la nappe.

Contexte nappe/couverture/toit du calcaire

Plusieurs situations sont représentées dans le secteur d'étude : 1) dans le Val d'Orléans une couverture perméable sur le calcaire karstifié avec une nappe commune dans la couverture (typologie de couverture 1b essentiellement, cf. rapport volume 1), dans la zone sud (Sologne)

une nappe perchée dans les sables séparée de la nappe des calcaires par des niveaux peu perméables (typologies 2a et 2b), dans la zone nord (forêt d'Orléans) une couverture peu perméable sans nappe continue coiffant le calcaire (nappe dans les calcaires) (typologie couverture peu perméable).

Afin de délimiter cartographiquement ces différentes situations, une carte des épaisseurs de recouvrement a été réalisée à partir de données inédites (Bruno Tourlière & Chrystelle Auterives comm. pers.) et issues de la BSS (logs de forages validés). Les points d'observation (cote du toit du calcaire observé en forage) ont ensuite été interpolés par krigeage (outil ArcGIS). En parallèle, la profondeur de la nappe karstique a été déterminée sur l'ensemble du secteur d'étude en combinant trois cartes piézométriques existantes : une carte établie en hautes eaux 2002 pour le secteur nord, une carte établie en moyennes eaux (1966) pour le secteur des alluvions du Val (Desprez 1967) et une carte de la nappe de Beauce sous Sologne établie en hautes eaux 2004. La combinaison de ces deux cartes (calcul sous ArcGIS de « épaisseur recouvrement » - « profondeur à la nappe ») permet d'obtenir une carte de l'épaisseur saturée de la couverture¹.

La Figure 22 montre la cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et la répartition des désordres avec clairement une plus forte densité de désordres quand la couverture est au moins partiellement saturée.

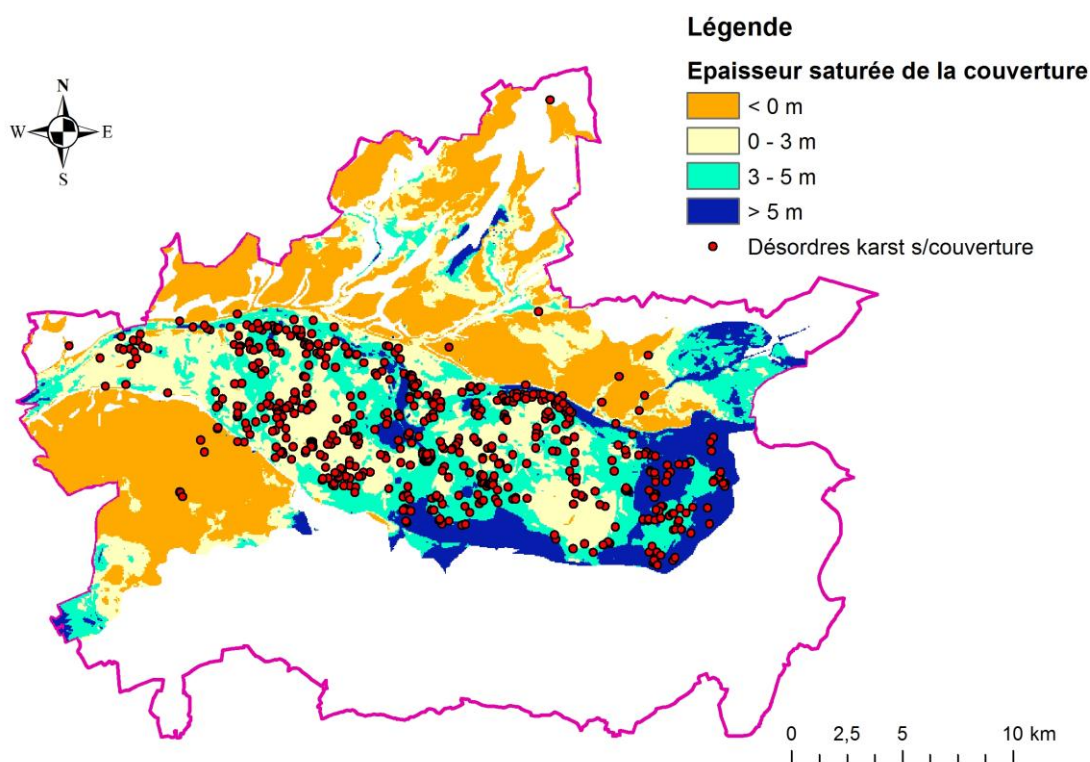


Figure 22 : Cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et répartition des désordres liés à la présence de karst

¹Si la couverture est peu perméable, on ne peut pas parler de saturation de la couverture mais de captivité de l'aquifère karstique (surface piézométrique dans la couverture).

Epaisseur de la couverture peu perméable

Les formations peu perméables qui vont empêcher les flux d'eau et de particules vers le calcaire sont constituées par les marnes de Blamont, les marnes de l'Orléanais et les sables et argiles de Sologne. L'épaisseur combinée de ces formations ont été déterminées sur la base des données de la carte géologique à 1/50 000, des données forages de la BSS, et de travaux inédits réalisés par l'ISTO et le BRGM de modélisation géologique 3D du Val d'Orléans (C. Auterives com. pers.). Les informations ponctuelles ont été interpolées par krigeage (outil ArcGIS).

La carte résultante est présentée à la Figure 23. Il apparaît clairement qu'au-delà de 8 m de couverture peu perméable, quasiment aucun désordre ne s'est produit.

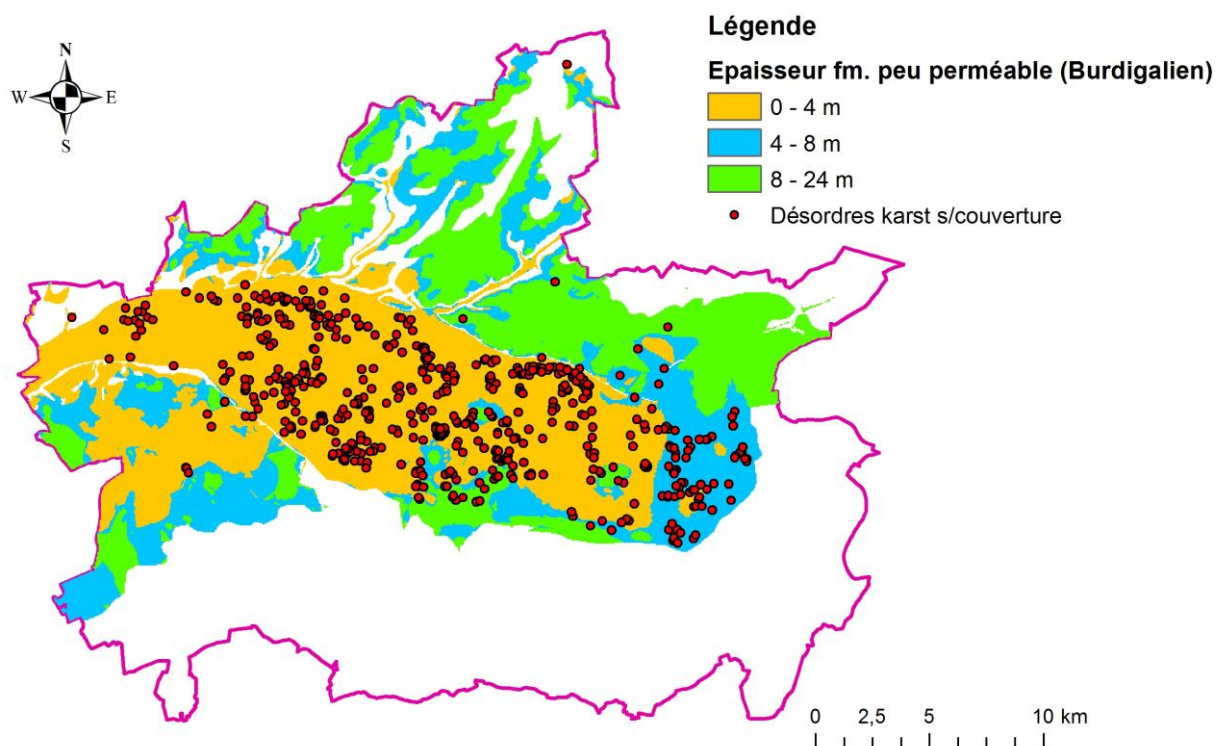


Figure 23 : Carte de l'épaisseur des formations peu perméables (marnes de Blamont, marnes de l'Orléanais, sables et argiles de Sologne) et de la répartition des désordres associés à la présence de karst

Distance aux cours d'eau

La distance aux cours d'eau a été calculée à partir de la base de données Carthage (IGN) en calculant sous ArcGIS la distance euclidienne depuis chaque cours d'eau répertorié. Trois classes de distance sont présentées à la Figure 24 : inférieur à 200 m, entre 200 et 500 m, et plus de 500 m. Les désordres semblent se répartir préférentiellement à proximité des cours d'eau.

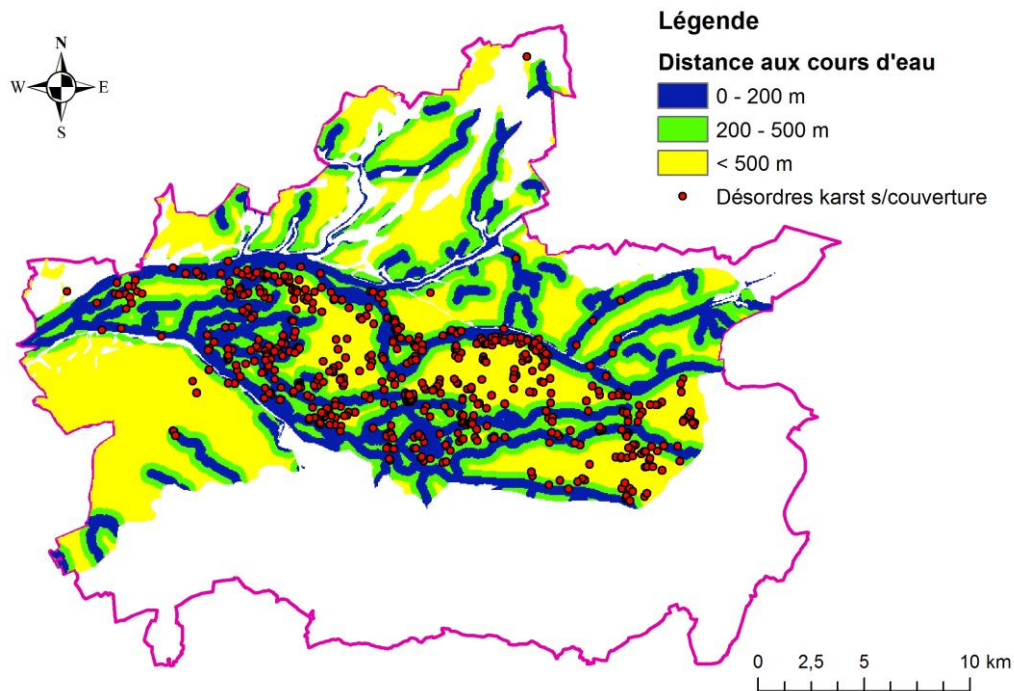


Figure 24 : Carte de la distance aux cours d'eau et de la répartition des désordres associés à la présence de karst

4) Evaluation des critères par la méthode du poids des évidences

L'analyse des données par la méthode du poids des évidences (cf. Annexe 2) permet de confirmer de manière objective la prépondérance de certaines classes de critères sur la distribution spatiale des désordres (Figure 25). La distance aux cours d'eau montre une susceptibilité plus forte pour des distances inférieures à 200 m du cours d'eau (contraste de 0.42). L'épaisseur de la formation peu perméable joue un rôle protecteur très significatif au-delà de 8 m d'épaisseur avec une valeur de contraste très négative (-2.16). Les zones où les calcaires ne sont pas complètement saturés (épaisseur saturée de la couverture inférieure à 0) sont également moins susceptibles avec une valeur de contraste très négative (-2.61).

Critère	Classes	Nombre de désordres	Répartition des désordres [%]	Nombre de pixels zone d'étude	Répartition des classes zone d'étude [%]	Ratio	W+	W-	Contraste (C)	Variance W+	Variance W-	Ecart-type C, S(C)	C/S(C)
Distance cours d'eau	≤200 m	228	38.7%	46428	29.4%	1.32	0.28	-0.14	0.42	0.004	0.003	0.08	5
	200-500 m	197	33.4%	45839	29.0%	1.15	0.14	-0.06	0.21	0.005	0.003	0.09	2
	>500 m	164	27.8%	65701	41.6%	0.67	-0.40	0.21	-0.61	0.006	0.002	0.09	-7
Epaisseur Fm. peu perméable	0-4 m	481	81.7%	75931	48.1%	1.70	0.53	-1.04	1.57	0.002	-0.002	0.00	5414
	4-8 m	84	14.3%	39374	25.0%	0.57	-0.56	0.13	-0.69	0.012	-0.012	0.00	-2973
	≥8 m	24	4.1%	42483	26.9%	0.15	-1.89	0.27	-2.16	0.042	-0.042	0.00	-18728
Epaisseur sat. de la couverture	<0 m	23	3.9%	56302	35.7%	0.11	-2.21	0.40	-2.61	0.043	0.002	0.21	-12
	0-3 m	223	37.9%	46960	29.8%	1.27	0.24	-0.12	0.36	0.005	0.003	0.09	4
	3-5 m	252	42.8%	34873	22.1%	1.93	0.66	-0.31	0.97	0.004	0.003	0.08	12
	>5 m	91	15.4%	19580	12.4%	1.24	0.22	-0.04	0.25	0.011	0.002	0.11	2

Figure 25 : Résultat de l'analyse des trois critères explicatifs pour le contexte de karst sous couverture par la théorie du poids des évidences. En rouge contraste (C) le plus fort (classe la plus susceptible), en vert contraste le plus faible (classe la plus protectrice). Si la valeur de la dernière colonne (C/S(C)) est supérieure à 1,96, la probabilité que le contraste (C) soit différent de 0 est supérieure à 99,5 %

Le test d'indépendance sur les trois critères explicatifs montre qu'ils sont indépendants et peuvent donc être combinés dans la cartographie multicritères de la susceptibilité sans risque de surpondération (Figure 26).

		Couverture partiellement saturée			Nappe karstique sous la couverture			Chi-carré total
		Observé	Théorique	chi-carré	Observé	Théorique	chi-carré	
Distance cours d'eau	<200 m	222	219	0.04	6	9	0.95	
	>=200 m	344	347	0.02	17	14	0.60	
	Totaux	566	566	0.06	23	23	1.54	1.61
Epaisseur Fm. peu perméable	<8 m	544	543	0.00	21	22	0.05	
	>=8 m	22	23	0.05	2	1	1.21	
	Totaux	566	566	0.05	23	23	1.26	1.31

Figure 26 : Résultats du test d'indépendance entre le critère saturation de la couverture et les deux autres critères envisagés (distance cours d'eau et épaisseur formation peu perméable). Les deux critères sont statistiquement indépendants du critère saturation de la couverture (valeur de chi-carré total inférieur à 6,63)

5) Carte de susceptibilité et validation

La validation de la carte de susceptibilité est effectuée en se basant sur une base de données désordres indépendantes (non utilisée pour la méthode du poids des évidences) contenant 347 événements. Ces désordres sont issus de plusieurs sources : les points décrits par Desprez (1977) comme gouffres et dolines (245 désordres), les points récupérés dans le cadre de la mise à jour de la BD-MVT du département du Loiret en 2013 (81 points : 39 réponses de mairies, 25 communiqués par la DDE, 9 communiqués par la Ville d'Orléans, 8 sources diverses), et 21 points issus d'observations de terrain orientées par analyse préalable du MNT Lidar haute résolution mis à disposition par la DREAL.

Pour le contexte de karst nu, 6 points de validation sont disponibles (effondrements signalés par la mairie de Chécy) : 2 points sont situés dans un secteur à susceptibilité faible-moyenne, 3 points dans un secteur à susceptibilité faible et le dernier point dans un secteur à susceptibilité très faible (Figure 21).

Pour le contexte de karst sous couverture, les 341 désordres restants sont disponibles et permettent une approche statistique. Plusieurs scénarios de pondération sont réalisés (Figure 27) pour la réalisation de cartes de susceptibilité. Les gammes testées pour le poids de chacun des critères sont guidées par les contrastes trouvés lors de l'analyse par la méthode du poids des évidences : le critère le plus prépondérant est l' « épaisseur de la formation peu perméable » avec un contraste total 3.7, Figure 25) suivi par le critère « épaisseur saturée de la couverture » (contraste total 3.6) ; le critère « distance au cours d'eau » a une pondération faible (contraste total 1.0). De fait les critères 1 et 2 à un poids maximal compris entre 2 et 8 selon les scénarios alors que le poids maximal est compris entre 1 et 2 pour le 3^{ème} critère.

Critère	Classes	Scenario 1: Pondération	Scenario 2: Pondération	Scenario 3: Pondération	Scenario 4: Pondération	Scenario 5: Pondération	Scenario 6: Pondération
Distance cours d'eau	≤200 m	1	1	1	2	1	1
	200-500 m	0	0	0	1	0	0
	>500 m	0	0	0	0	0	0
Epaisseur Fm. peu perméable	0-4 m	4	8	4	8	2	4
	4-8 m	1	3	1	3	1	2
	≥8 m	0	0	0	0	0	0
Epaisseur sat. de la couverture	<0 m	1	1	2	1	1	2
	0-3 m	4	4	8	4	2	4
	3-5 m	4	4	6	4	2	4
	>5 m	3	3	4	3	1	2
AUC		0.74	0.75	0.72	0.75	0.72	0.73

Figure 27 : Pondérations des différentes classes pour chacun des critères explicatifs utilisés dans les six scénarios de susceptibilité à l'effondrement. AUC (« area under curve ») est un paramètre permettant d'évaluer la qualité prédictive du scénario

Pour chacun des 6 scénarios, une carte d'indices de susceptibilité est construite en additionnant les pondérations des trois critères selon la Figure 27. Cette combinaison donne un nombre d'indices variable en fonction des scénarios et qui est compris entre 5 (scénario 5) et 14 (scénario 4). La robustesse des scénarios est ensuite testée par un calcul de la courbe ROC (Receiving Operating Characteristic)². La courbe ROC représente graphiquement la validité du modèle de susceptibilité sur un graphique « 1-spécificité » en abscisse vs. « sensibilité » en ordonnées. La sensibilité correspond à la proportion de pixels (cellules) de la carte de susceptibilité qui sont correctement classés en susceptibles (« vrais positifs ») alors que la spécificité correspond à la proportion de pixels qui sont correctement classés en non susceptibles (« vrais négatifs »). La courbe de ROC pour un modèle prédisant parfaitement la susceptibilité passe par l'origine (0,0) puis par (0,1) et finalement se termine aux coordonnées (1,1). Au contraire, un modèle de susceptibilité équivalent à un modèle purement aléatoire (susceptibilité cartographiée « au hasard ») décrirait une courbe ROC diagonale passant par l'origine et se terminant aux coordonnées (1,1). De fait la qualité prédictive du modèle est évaluée en calculant l'aire sous la courbe ROC (AUC : « area under curve ») : une aire de 0.5 correspondant à un modèle aléatoire et une aire de 1 à un modèle parfait (prédisant correctement tous les événements) (Figure 28).

²Cette approche fut développée pendant la 2^{ème} guerre mondiale pour évaluer les performances de radars dans la détection de cibles. Elle est depuis lors utilisée dans différentes disciplines scientifiques telles que pour l'évaluation de traitements médicaux, l'apprentissage automatique et également en sciences environnementales pour évaluer différents modèles de cartographie de risques géologiques (glissements de terrain, effondrements, etc.) (Oh & Lee 2010, Frattini et al. 2010, Cervi et al. 2010, Verachtert et al. 2011).

Les points expérimentaux utilisés pour tracer la courbe ROC sont calculés pour des valeurs seuil de susceptibilité progressivement plus élevées. Par exemple si 4 classes de susceptibilité ont été cartographiées (1, 2, 3, 4), les deux premiers couples de valeurs sensibilité-spécificité sont calculés en prenant la valeur seuil de la classe 1, c'est-à-dire que tous les pixels caractérisés par une susceptibilité de classe 1 sont « non susceptibles » alors que les pixels cartographiés en classe 2, 3 et 4 sont susceptibles.

Les deux couples suivants sont calculés en fixant la valeur seuil à la classe 2, c'est-à-dire que les pixels cartographiés en susceptibilités de classe 1 ou 2 sont considérés « non susceptibles » et les pixels en classe 3 ou 4 sont susceptibles, et ainsi de suite. Le nombre de couples de valeurs finales va dépendre du nombre de classe de susceptibilité définis dans le modèle expérimental.

Les 6 scénarios testés montrent un pouvoir prédictif proche avec des aires sous la courbe ROC (AUC) comprises entre 0.72 et 0.75 (Figure 27, Figure 28). Les scénarios 2 et 4 sont les plus robustes. Ces courbes ROC sont établies à partir d'un jeu indépendant de 341 désordres qui n'ont pas été utilisés pour l'évaluation des critères à cartographier.

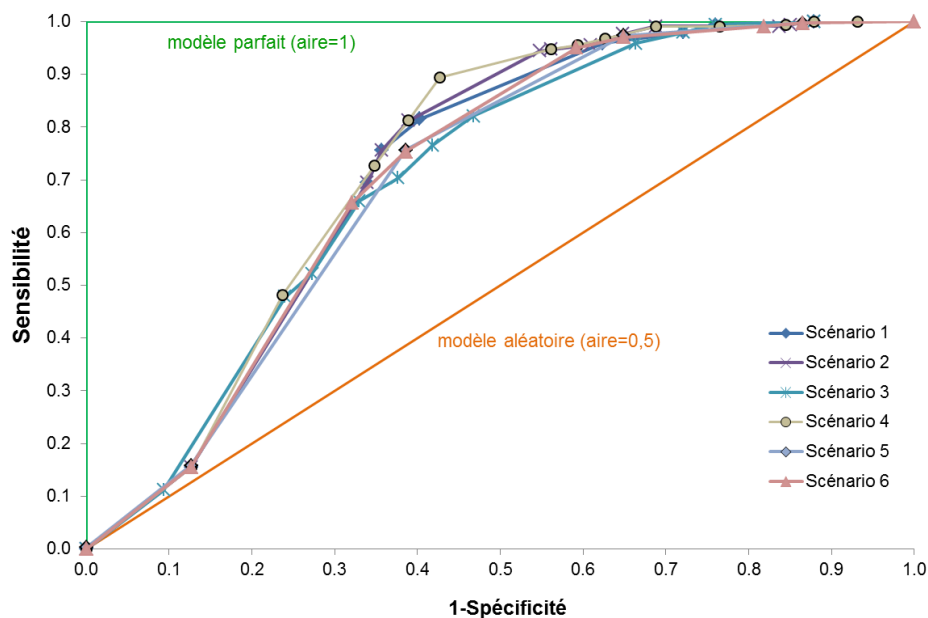


Figure 28 : courbes ROC pour un modèle parfait, un modèle aléatoire et les modèles expérimentaux (scénarios 1 à 6)

La carte de susceptibilité finale (Figure 29) combine les deux typologies de karst en tenant compte de la susceptibilité plus forte du contexte karst sous couverture par rapport au karst nu. Le scénario 2 de pondération pour le karst sous couverture est retenu et 5 classes de susceptibilité à l'effondrement sont définies comme suit :

- susceptibilité très faible (karst nu uniquement),
- susceptibilité faible (karst nu uniquement),
- susceptibilité faible-moyenne (karst nu et karst sous couverture),
- susceptibilité moyenne (karst sous couverture),
- susceptibilité forte (karst sous couverture).

Pour la zone karstique du secteur d'étude, 3 % de la surface correspond à la classe de susceptibilité très faible, 4 % à la classe de susceptibilité faible, 29 % à la classe de susceptibilité faible-moyenne, 28 % à la classe de susceptibilité moyenne, et 36 % à la classe de susceptibilité forte.

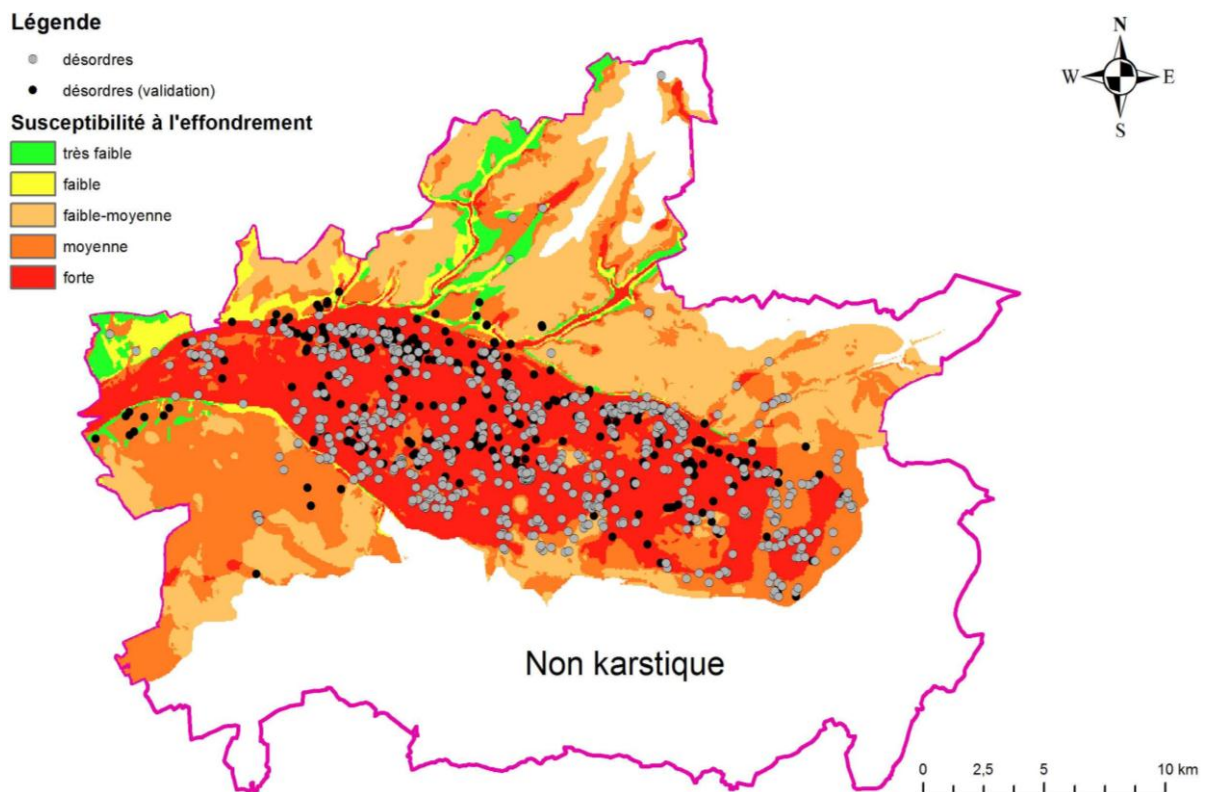


Figure 29 : Carte de susceptibilité à l'effondrement pour le site test du Val d'Orléans et répartition des désordres (points gris= base de données utilisées pour tester les critères explicatifs, points noirs= base de données utilisées pour tester les scénarios de pondération)

6) Carte de l'intensité

La qualification de l'intensité des effondrements est réalisée sur le paramètre « diamètre de l'effondrement » en considérant trois classes d'intensité : limitée (diamètre < 3 m), modérée (entre 3 et 10 m) et élevée (supérieur à 10 m) (cf. §2.2.5). Cette intensité caractérise donc les effondrements localisés qui sont les désordres les plus largement répandus sur le site d'étude.

La carte de l'intensité (Figure 30) est construite sur la base de la connaissance des épaisseurs respectives des formations perméables (alluvions récentes) et peu perméables en appliquant la formule empirique de Sowers (cf. §2.2.5). La carte résultante est globalement en accord avec les diamètres de fontis observés ou décrits dans les archives : 70 % des fontis observés ont des diamètres compatibles avec la classe d'intensité cartographiée (diamètre dans la classe prédite ou inférieur) alors que 30 % ont des diamètres observés supérieurs à ceux prédits. Le nombre de fontis documentés est toutefois trop faible pour permettre une analyse plus détaillée de la cohérence. Les différences constatées peuvent avoir différentes origines : incertitude sur les épaisseurs totales des formations meubles, fontis résultant d'un effondrement du toit d'une cavité (diamètre résultant plus important), localisation peu précise de fontis décrits dans les archives, caractéristiques géomécaniques non documentées, évolution à long-terme du fontis.

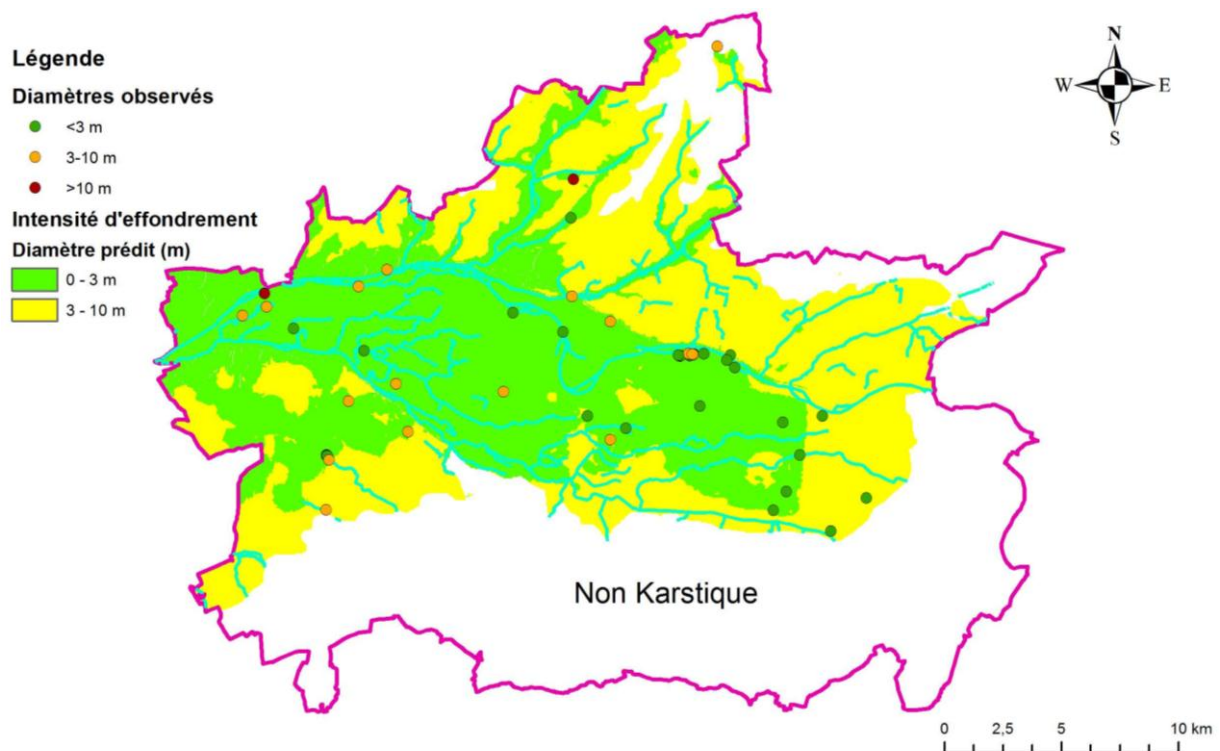


Figure 30 : Carte de l'intensité des effondrements basées sur la formule empirique de Sowers reliant le diamètre de l'effondrement aux épaisseurs respectives des formations cohésives (peu perméables) et peu cohésives (perméables) et diamètres observés pour les fontis documentés

7) Carte de l'aléa effondrement

En faisant abstraction de la notion de la période de retour difficilement caractérisable, le croisement de la carte de susceptibilité à l'effondrement (Figure 29) et de la carte de l'intensité (Figure 30) permet de proposer huit classes d'aléa effondrement (de type fontis) (Figure 31). Le regroupement de ces classes d'aléa en trois catégories (aléa faible, moyen ou fort) peut être fait selon un schéma plus ou moins conservateur selon que les classes susceptibilité faible/moyenne & intensité modérée et susceptibilité moyenne & intensité faible sont reclassifiées en aléa faible ou moyen (Figure 32 & Figure 33) :

Susceptibilité-Intensité (Figure 31)	Reclassement conservateur (Figure 32)	Reclassement moins conservateur (Figure 33)
Très faible-limitée	Aléa faible	Aléa faible
Faible-limitée	Aléa faible	Aléa faible
Faible/moyenne-limitée	Aléa faible	Aléa faible
Faible/moyenne-modérée	Aléa moyen	Aléa faible
Moyenne-limitée	Aléa moyen	Aléa moyen
Moyenne-modérée	Aléa moyen	Aléa moyen
Forte-limitée	Aléa fort	Aléa fort
Forte-modérée	Aléa fort	Aléa fort

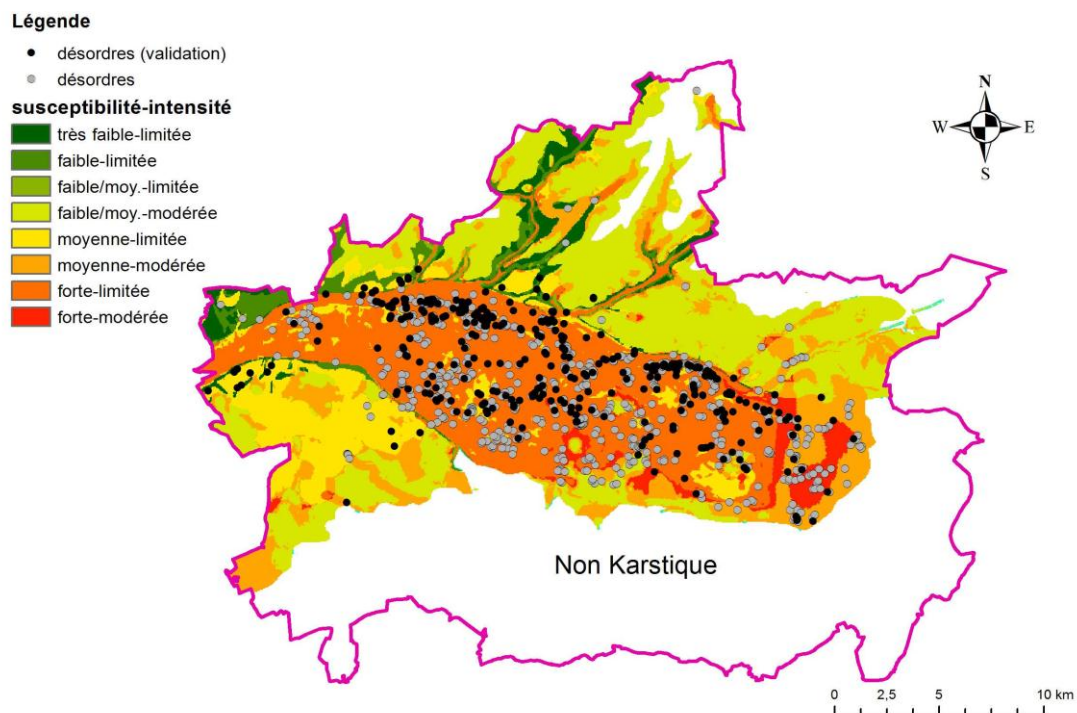


Figure 31 : Cartographie de la zone d'étude en 8 classes d'aléa effondrement par croisement de la susceptibilité à l'effondrement et l'intensité de l'effondrement

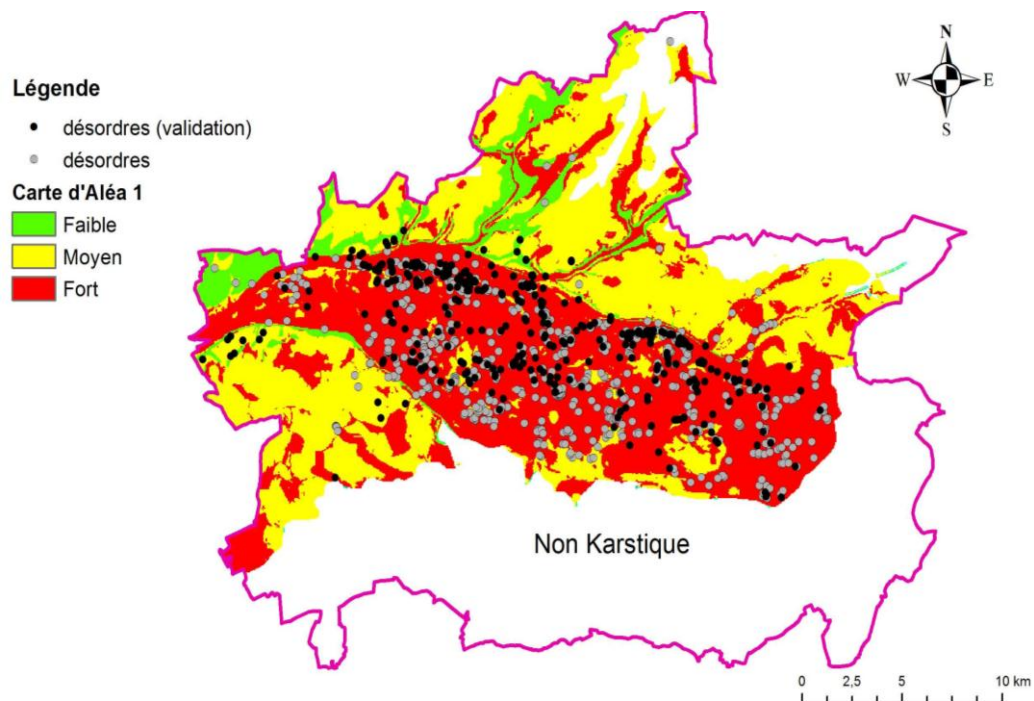


Figure 32 : Carte d'aléa effondrement en utilisant un schéma de reclassement plus conservateur (susceptibilité faible/moyenne & intensité modérée → aléa moyen)

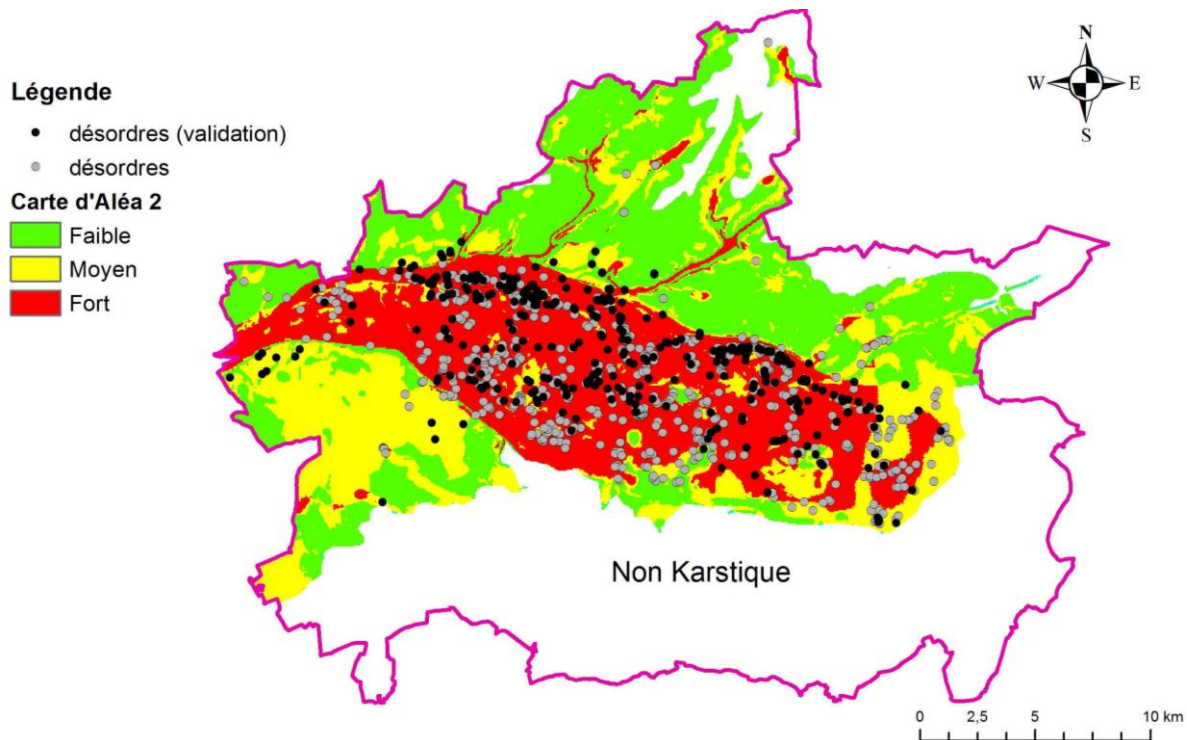


Figure 33 : Carte d'aléa effondrement en utilisant un schéma de reclassement moins conservateur (susceptibilité faible/moyenne & intensité modérée → aléa faible)

2.2.7. Conclusion

L'approche par la théorie du poids des évidences s'est avérée particulièrement bien adaptée à l'évaluation des critères explicatifs potentiels ; de plus elle offre par la détermination d'une valeur de contraste un moyen objectif de hiérarchisation des critères indépendants.

Le karst sous couverture montre la plus forte prédisposition à l'occurrence de désordres ; cela rejoint les conclusions établies à partir de l'analyse bibliographique. Pour le contexte de karst sous couverture trois critères sont explicatifs des désordres et indépendants, il s'agit de l'épaisseur de la formation imperméable intercalée entre les formations superficielles et les calcaires, l'épaisseur saturée de la couverture, et la distance aux cours d'eau alimentant le calcaires. Les deux premiers critères sont prépondérants. La carte de susceptibilité finale permet d'expliquer entre 75 % et 80 % des désordres connus.

2.3. LORRAINE

2.3.1. Contexte géologique

La Lorraine fait partie de la bordure orientale du Bassin parisien. Elle est entourée par le Massif ancien des Vosges à l'est, par l'Ardenne, l'Eifel et l'Hunsrück au nord (Figure 34). Deux ensembles distincts façonnent la région :

- Au Sud-Est, le versant lorrain des Vosges est un élément de socle hercynien constitué de granites et de roches métamorphiques.
- Au Nord-Ouest, la Lorraine sédimentaire est caractérisée par une alternance de plateaux calcaires et de dépressions argilo-marneuses séparés par des fronts de côtes (ou cuestas). Sept cuestas subméridiennes pouvant atteindre 500 mètres d'altitude se succèdent d'Est en Ouest (Figure 35). Il s'agit de la côte du Trias ; la côte du Muschelkalk (ou de Lorraine) ; la côte de l'Hettangien-Sinemurien (ou Infraliasique) ; la côte du Dogger (ou de Moselle) ; la côte de l'Oxfordien (ou de Meuse) ; la côte du Tithonien (ou des Bars) et la côte de l'Albien (ou d'Argonne).

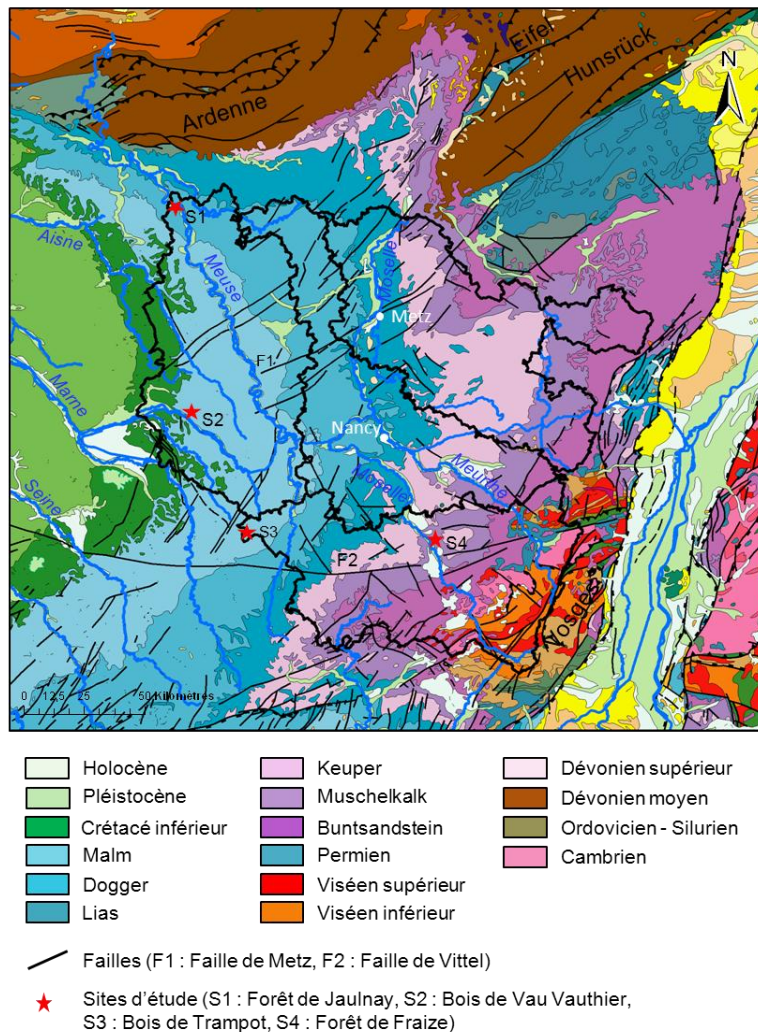


Figure 34 : carte géologique de la Lorraine et localisation des 4 sites d'étude (d'après la carte géologique harmonisée au 1 000,000ème de la France)

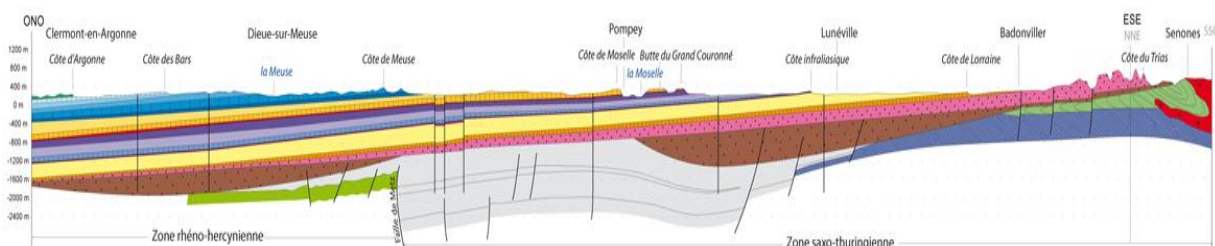


Figure 35 : coupe géologique synthétique de la région Lorraine (Cartannaz et al., 2011). Le log stratigraphique associé est consultable sur le site www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/log.php

Dégagé au Plio-Quaternaire, le relief de cuestas s'explique par une alternance des roches résistantes et perméables, et des roches plus tendres et peu perméables. En effet, les plateaux calcaires ou gréseux, souvent entaillés de vallées encaissées résistent à l'érosion, tandis que les couches tendres d'argiles, de marnes ou de sables constituant les dépressions, subissent une érosion mécanique préférentielle.

D'autre part, le pendage introduit une dissymétrie dans le découpage des plateaux calcaires. Le front de côte présente une pente forte, alors que le revers de côte, de pente plus douce, se prolonge jusqu'aux couches argileuses suivantes.

Les 4 sites d'étude de la région Lorraine présentent quatre contextes géologiques distincts :

- Le site S1 de la Forêt de Jaulnay met en contact les argiles du Callovien et les calcaires oolithiques de la Dalle d'Etain (Bathonien) sous-jacents.
- Le site S2 du Bois de Vau-Vauthier se situe sur les calcaires du Tithonien/Crétacé sous couverture argileuse du Crétacé.
- Le site S3 du Bois de Trampot met en relation les calcaires de l'Oxfordien et les limons d'altération sus-jacents.
- Le site S4 de la Forêt de Fraize révèle un karst de contact lithostratigraphique entre les roches carbonatées de la Lettenkohle et du Muschelkalk sous les paléo-terrasses alluviales de la Moselle et argiles de la Lettenkohle.

Les sites S1, S3 et S4 sont présentés dans le rapport de l'année 1 (Perrin et al. 2013), seul le site S2 est présenté dans la suite puisque la cartographie de susceptibilité a été réalisée sur ce site uniquement.

2.3.2. Contexte géologique du site du Bois de Vau-Vauthier

Le Bois de Vau-Vauthier est situé sur les communes de Mussey et de Fains-les-Sources, à l'ouest de Bar-le-Duc. Il fait partie de la région, communément appelée le Barrois, jouxtant la frontière avec la région Champagne-Ardenne.

Le plateau du Barrois est limité à l'Est par la Côte des Bars, à l'Ouest par la vallée de la Marne ; au Sud, le fossé d'effondrement de Gondrecourt-le-Château marque la limite avec l'Ornois et le Haut-Pays, tandis qu'il se poursuit au Nord jusqu'aux abords de Verdun. Dans cette région de la Lorraine, les argiles et sables du Crétacé recouvrent le plateau calcaire du Tithonien (Figure 36). Les faciès du Tithonien sont de deux types dans notre zone d'étude : le Tithonien supérieur très incomplet du fait de l'érosion antécédente, est constitué de dolomies verdâtres. Il s'agit de dolomies qui prennent une teinte jaune suite à l'altération.

Elles ne font qu'environ 10 mètres d'épaisseur. A l'Est du site, une faille de direction N10 sépare le Tithonien supérieur du Tithonien moyen : d'une vingtaine de mètres de puissance, ce faciès correspond à des calcaires lithographiques très durs, criblés de cavités, plus ou moins tubulaires, en bancs massifs ou peu épais, avec des intercalations de lumachelles.

Sur cet ensemble, repose le Valanginien : il est représenté par des grès ferrugineux, des sables à passées gréseuses, argileuses et des niveaux ferrugineux (rognons, plaquettes). Le fer géodique était exploité et le sable utilisé pour les moules de fonderies ou la fabrication de briques.

Au centre de la zone d'étude, les terrains affleurant sont d'âge Barrémien-Hauterivien. L'Hauterivien est constitué de calcaires à spatangues (oursins) et d'argiles noires plastiques à oolites ferrugineuses. Il est surmonté d'une formation argileuse du Barrémien inférieur, les argiles à *Ostrea* (Annexe 3, Perrin et al. 2013) dans lesquelles peuvent parfois s'intercaler des bancs calcaro-marneux. Au sommet du Barrémien sont observées des argiles gréseuses et des sables. L'altération de ces formations argileuses du Barrémien peut être à l'origine d'une couverture ocre limoneuse-argileuse-sableuse (30 % de quartz) ou d'une couverture argilo-limoneuse grise verdâtre.

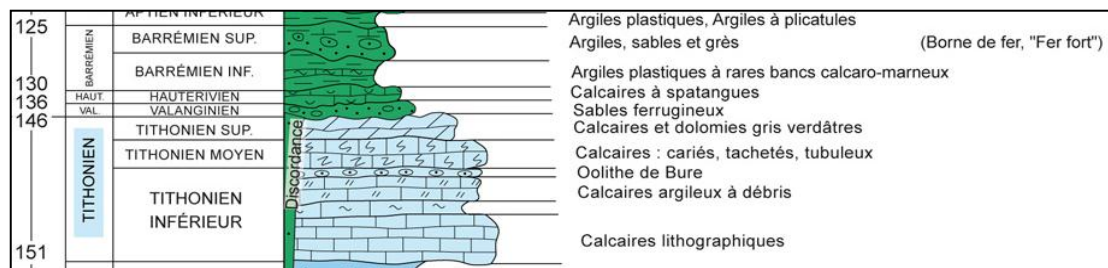


Figure 36 : Log stratigraphique du Bois de Vau-Vauthier (Cartannaz et al., 2011)

Hydrologiquement, les communes du plateau du Barrois sont alimentées par la nappe du Tithonien. Vers l'ouest, la nappe devient captive sous le Crétacé imperméable. Au sud de l'Ornain, les sources de Fains-Veels, exurgences liées au passage de failles, alimentent les communes de Fains-Veels et de Bar-le-Duc.



Figure 37 : Carte de localisation des sources et des dolines émergence-perte du Bois de Vau-Vauthier sur fond de carte IGN au 1/25 000

Le niveau de base des morphologies karstiques du Bois de Vau-Vauthier a la même altitude que la Source du Château, soit 167 mètres (Figure 37). L'épaisseur de la zone vadose est comprise entre 53 et 87 mètres.

2.3.3. Données de terrain

De même que pour le site précédent, notre travail de terrain a été aiguillé par des travaux universitaires antérieurs (Jaillet 2000, 2005).

Nos interprétations des données de terrain (sauts d'altitude dans le liseré, Figure 38) nous révèlent l'existence de petites failles que nous faisons figurer ici, malgré l'incertitude de leur extension. De plus, le tracé du contact géologique nous a permis d'estimer les épaisseurs de couverture en tout point de notre inventaire par croisement avec la carte topographique.

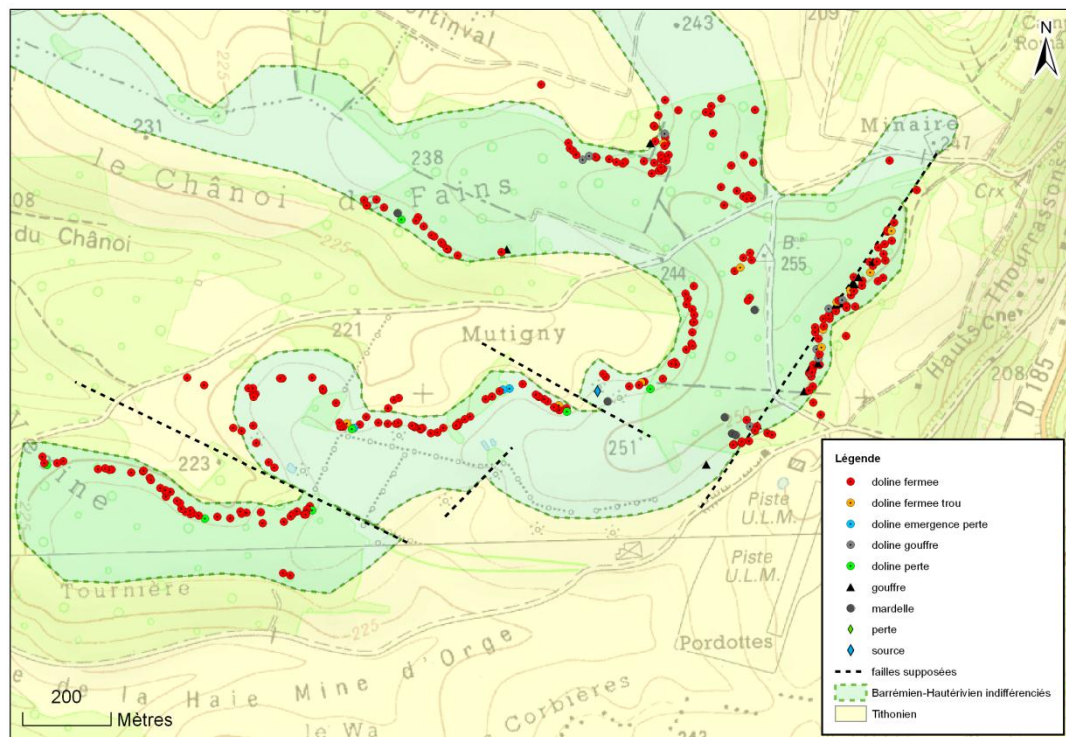


Figure 38 : Carte des morphologies karstiques du Bois de Vau-Vauthier sur fond de carte IGN au 1/25 000

Sur ce site de 2 kilomètres carrés, 303 formes karstiques ont été inventoriées : 252 dolines fermées (dont seulement 7 sont stables) (83%), 14 gouffres (4%), 11 dolines trou, 8 dolines perte, 9 dolines gouffre, 6 mardelles et 3 dolines émergence-perte. Ces formes karstiques apparaissent alignées suivant les courbes de niveau topographiques. En complément, des formes karstiques additionnelles ont été ajoutées à l'inventaire suite à une acquisition LIDAR (cf. §2.3.4).

L'épaisseur de la couverture est comprise entre 0 et 22 mètres. La Figure 39 présente la densité de morphologies karstiques observées en fonction de l'épaisseur de la couverture. La majorité des observations se localisent dans un recouvrement qui ne dépasse pas 3 mètres. 95 % d'entre elles sont situées sur une couverture d'une épaisseur inférieure ou égale à 7 mètres. Seules 3,6 % des formes se situent entre 8 et 22 mètres d'épaisseur de couverture.

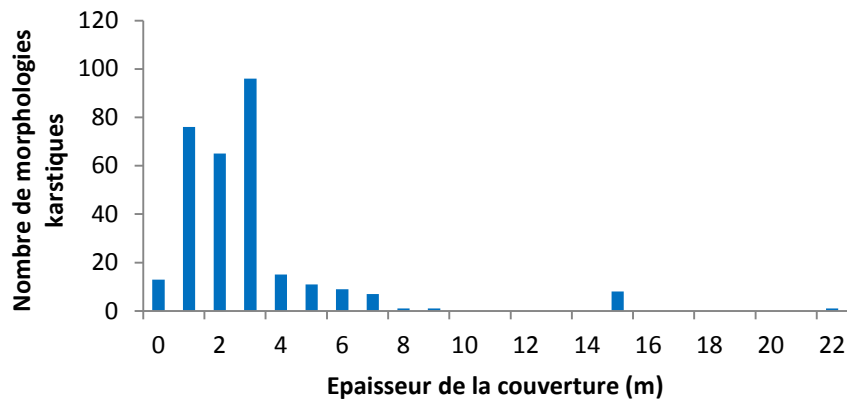


Figure 39 : Proportion des morphologies karstiques en fonction de l'épaisseur de la couverture du Bois de Vau Vauthier

De même que pour le site de la Forêt de Jaulnay, les dolines fermées représentent la majorité des morphologies inventoriées. Leurs diamètres sont compris entre 1 et 35 mètres (Figure 40). 44 % des dolines ont un diamètre inférieur ou égal à 3 mètres, 9 % ont un diamètre supérieur à 10 mètres. Leur profondeur est comprise entre 0,1 et 6,4 mètres, 61 % ne font pas plus de 2 mètres de profondeur (Figure 41).

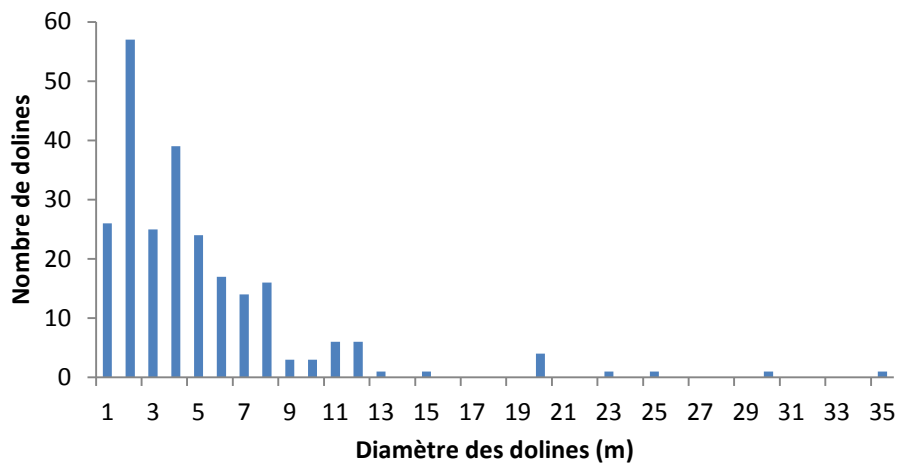


Figure 40 : Répartition des dolines fermées en fonction de leur diamètre dans le Bois de Vau Vauthier

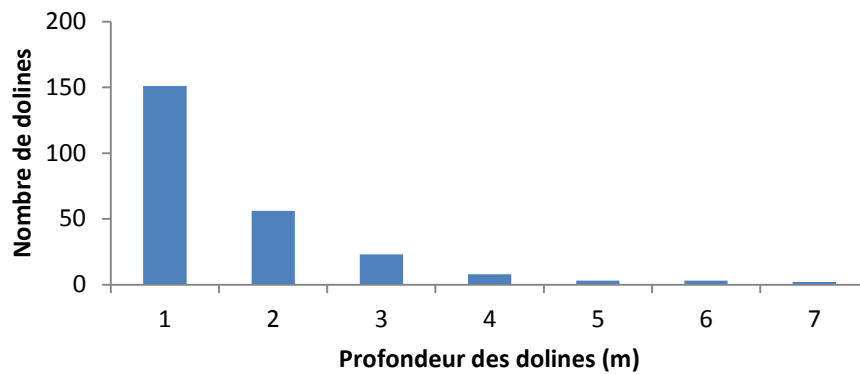


Figure 41 : Répartition des dolines fermées en fonction de leur profondeur dans le Bois de Vau Vauthier

La Figure 42 présente le rapport diamètre/profondeur des dolines fermées en fonction de leur pente. Cette représentation peut indiquer le degré d'activité des dolines : la doline dont la pente est inférieure à 10 degrés et avec un rapport diamètre/profondeur de 17 est peu active, contrairement aux dolines dont la pente est supérieure à 40 degrés et dont le rapport diamètre/profondeur est faible.

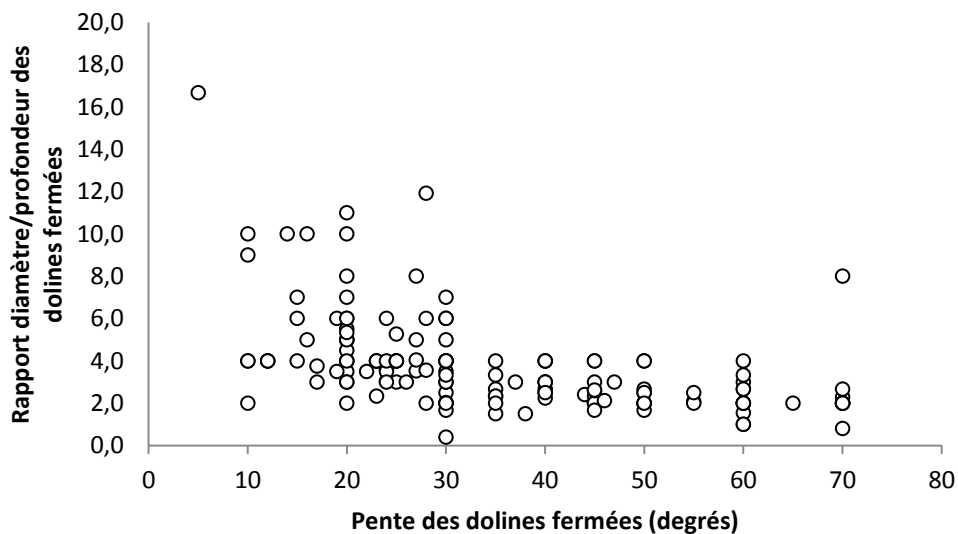


Figure 42 : Rapport des diamètres des dolines fermées sur leur profondeur en fonction de leur pente sur le site du Bois de Vau Vauthier

La Figure 43 met en relation les diamètres des dolines fermées et l'épaisseur de la couverture. Celle-ci est comprise entre 0 (karst nu) et 15 mètres. Les points se concentrent majoritairement entre 0 et 7 mètres de couverture.

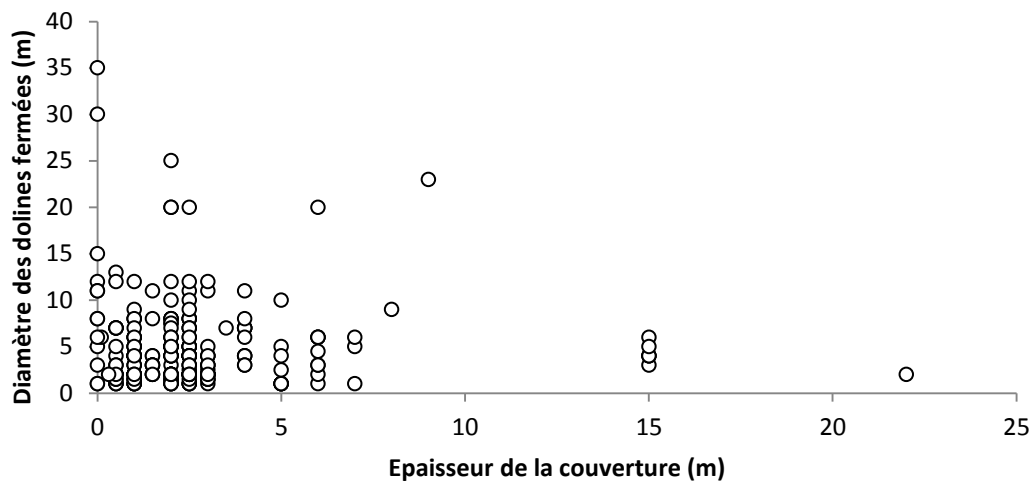


Figure 43 : Graphique montrant la répartition des diamètres des dolines fermées en fonction de l'épaisseur de couverture dans le Bois de Vau Vauthier

2.3.4. Cartographie de la susceptibilité

Sur le site de Vau-Vauthier, l'ensemble de la zone étudiée est karstique. La première étape qui consiste à distinguer les zones karstiques de celles qui ne le sont pas peut donc être escamotée pour directement cartographier les critères explicatifs.

1) Cartographie des critères explicatifs

Une analyse statistique à l'aide de la théorie du poids des évidences a été réalisée afin de déterminer quels sont les critères explicatifs à retenir pour les trois typologies présentes : karst nu, karst de contact lithostratigraphique et karst sous couverture peu perméable. L'intérêt majeur d'étudier ce site est la compréhension ainsi que la sélection de critères pertinents dans un contexte de karst de contact. En effet, ce site est représentatif du liseré karstique typique du karst de contact comme le montrent les points rouges de la Figure 44. L'inventaire, qui recense 664 désordres sur moins de 3 km², est le fruit du travail entre l'exploitation des données du LIDAR et celles obtenues sur le terrain. Il peut être considéré comme quasi exhaustif et constitue une base solide pour le traitement des données par la théorie du poids des évidences.

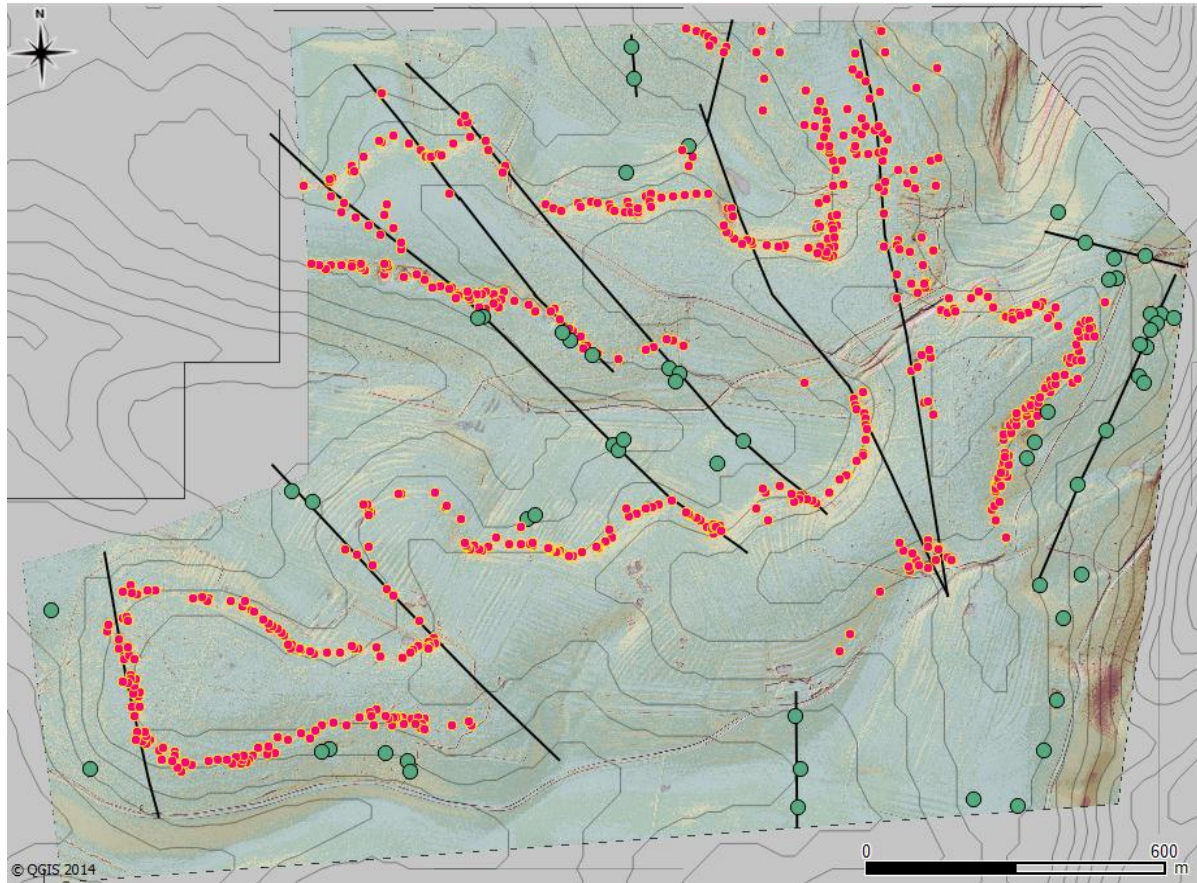


Figure 44 : Rendu cartographique avec MNT ombré et pente (issu du LIDAR) ainsi que les 664 désordres répertoriés sur le site de Vau-Vauthier. Points rouges : désordres sur couverture argileuse (karst de contact et sous couverture). Points verts : désordres sur calcaire (karst nu). Equidistance des courbes de niveau : 5 m. Trait noir épais : faille.

Huit critères explicatifs potentiels ont été testés à l'aide de la théorie du poids des évidences en prenant des pixels unitaire de 25 m par 25 m :

- Typologie des karsts.
- Epaisseur couverture.
- Pente.
- Distance aux zones fracturées.
- Distance aux Talweg.
- Altitude.
- Indice de persistance des réseaux (IDPR).
- Occupation du sol.

Après analyse des résultats, seuls les critères explicatifs retenus sont les suivants :

- Typologie des karsts.
- Pente.
- Distance aux zones fracturées.

Le critère épaisseur de couverture est directement contrôlé, et donc dépendant, par le contact lithologique argile/calcaire. En effet, plus nous sommes proche de ce contact plus l'épaisseur de la couverture argileuse est faible. De même, le paramètre de l'altitude est contrôlé par ce même contact lithologique subhorizontal. L'analyse de l'indice de persistance des réseaux (IDPR) montre une incohérence des résultats à cause d'un effet de site. Le critère distance aux talwegs ne montre quant à lui pas de logique propre avec la compréhension de la localisation des désordres sur ce site.

Le critère typologie de karst (ou lithologique)

La cartographie de la lithologie est prépondérante car c'est la limite argile/calcaire qui conditionne le liseré karstique du karst de contact. Ce liseré est cartographié (Figure 45) à dire d'expert par le géologue en s'aidant d'une part de la présence de désordres et d'autre part des formations géologiques qui affleurent (faciès argileux du Crétacé versus faciès calcaires du Jurassique). Soulignons que ce travail doit s'effectuer sur le terrain afin d'affiner les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} qui sont obsolètes à cette échelle. Par exemple sur ce site, le contact argile/calcaire cartographié sur le 1/50 000^{ème} montre une erreur du tracé pouvant dépasser les 100 m par rapport à la réalité.

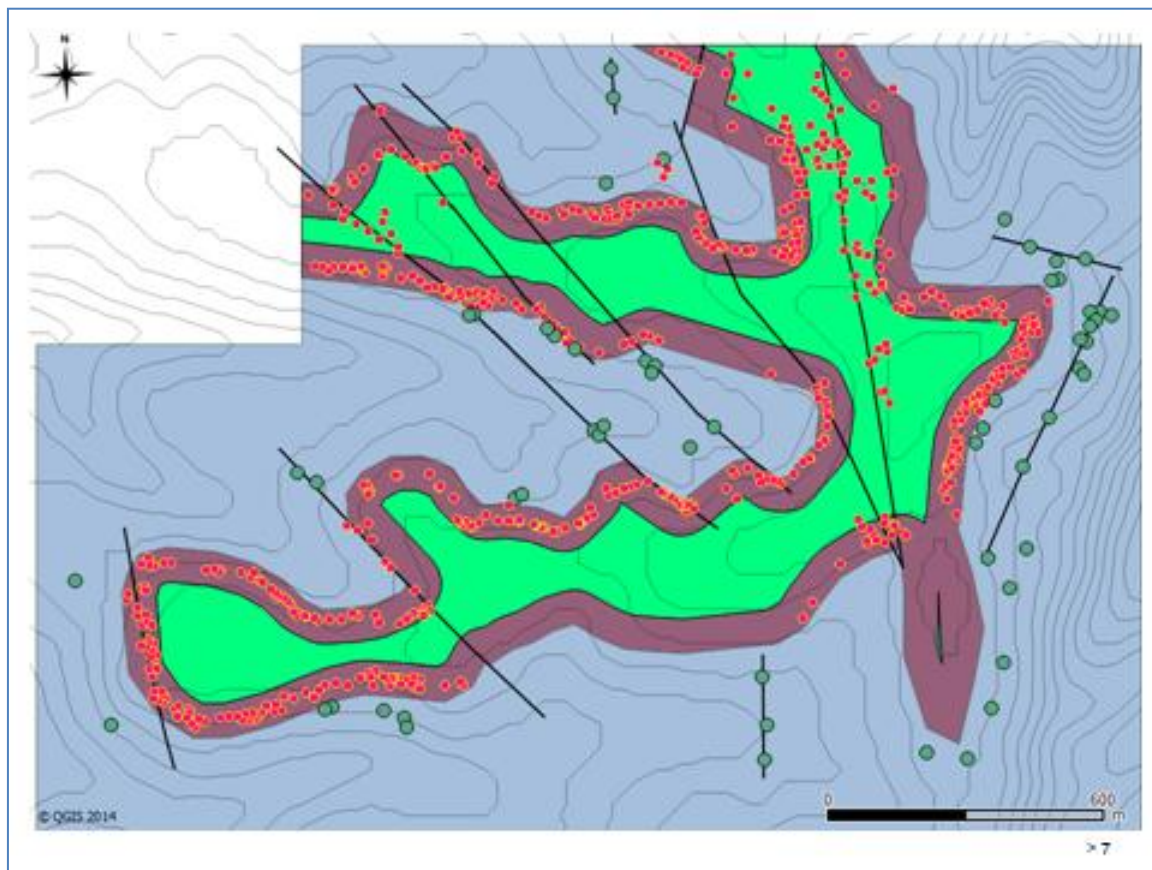


Figure 45 : Carte de la typologie du karst. En bleu clair karst nu, violet : karst de contact, vert : karst sous couverture peu perméable

L'analyse de ce critère par la méthode du poids des évidences permet de confirmer de manière objective la prépondérance du karst de contact sur la distribution spatiale des désordres. Ce type de karst montre une susceptibilité plus forte et se démarque bien des autres types avec un contraste « C » de 2.2 (Figure 46). Le karst sous couverture peu perméable semble jouer un rôle protecteur avec une valeur de contraste négative (-0.16). En effet, l'eau ruisselle sur les formations argileuses au lieu de s'infiltrer. C'est lorsque l'épaisseur est suffisamment faible, proche du contact (karst de contact), que l'eau se concentre au niveau des calcaires et accélère le processus de soutirage des argiles dans les calcaires fracturés. Les zones de karst nu assez pauvre en morphologie comparativement aux autres types apparaissent très peu susceptibles à la formation de désordres avec une valeur de contraste négative (-2.47).

Typologie Karst	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
Karst de couverture	51	11,6%	802	13,3%	0,87	-0,138	0,020	-0,158	0,02094	0,00276	0,15395298	-1,03
Karst de contact	341	77,5%	1662	27,6%	2,81	1,033	-1,169	2,202	0,00369	0,01033	0,11840486	18,60
Karst nu	48	10,9%	3562	59,1%	0,18	-1,690	0,779	-2,469	0,02112	0,00296	0,15516048	-15,91
total	440	100,0%	6026	100%								

Figure 46 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la typologie du karst (ou géologie) par la théorie du poids des évidences

En s'appuyant sur ce critère typologie de karst, une susceptibilité forte est attribuée au type karst de contact, une susceptibilité faible au karst de couverture et très faible au karst nu.

Le critère de pente

Pour l'utilisation de la théorie du poids des évidences, une valeur pente a été affectée à chaque pixel de la grille au pas de 25 m (Figure 47). Cette valeur constitue la moyenne du MNT au pas de 0.5 m obtenu par le LIDAR dans lequel nous avons soustrait les pentes dues aux cônes de soutirage des désordres afin de ne pas biaiser les résultats et de ne prendre que la pente du relief environnant.

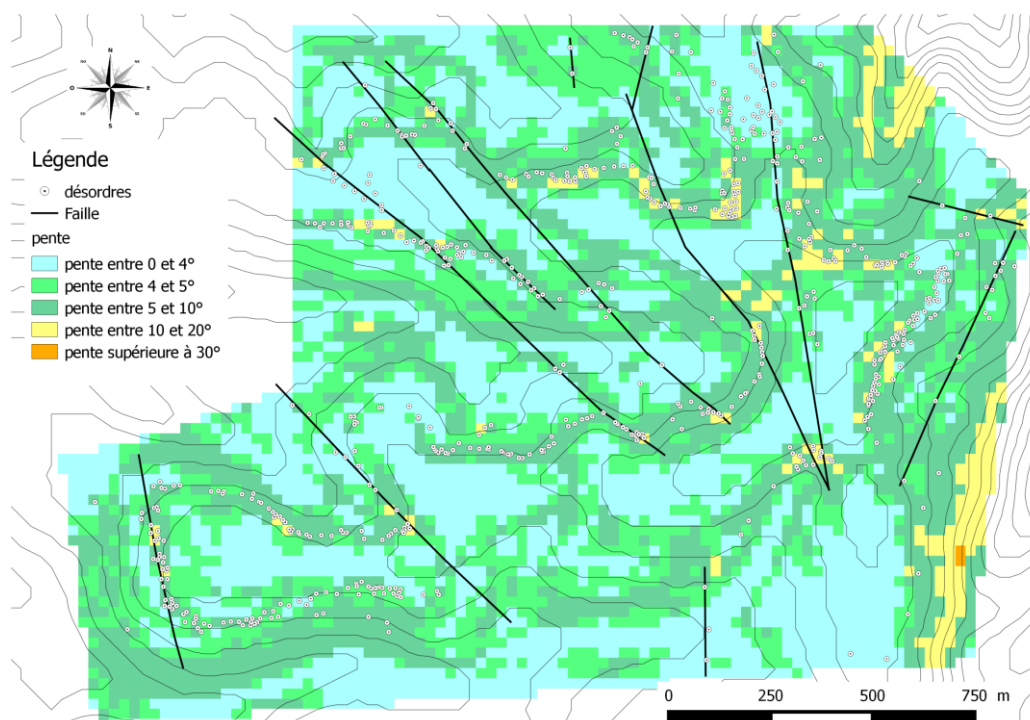


Figure 47 : Cartographie du critère pente sur le site de Vau-Vauthier à partir des données LIDAR moyennées au pas de 25 m (avec filtrage des pentes dues aux désordres).

Une analyse est effectuée pour chaque type de karst afin de déterminer le poids du critère de la pente et de connaître quelle classe explique le mieux la répartition des désordres en leur sein (Figure 48). Par une observation détaillée de la distribution des désordres sur la carte des pentes, il s'avère qu'une valeur seuil discriminante de 5° peut être utilisée pour le karst sous couverture et le karst nu et que cette valeur est abaissée à 4° pour le karst de contact. Pour ce cas, 71 % du secteur montre une pente supérieure à 4° et contient 89 % des désordres. Le contraste « C » de ce critère qui dépasse 1 (1.22) montre une bonne susceptibilité de ce dernier à l'apparition des désordres. Sur le terrain, le contact lithologique est souvent marqué par une rupture de pente avec des valeurs plus élevées de la pente du côté des argiles où se forment les désordres. Le karst de couverture montre un contraste qui avoisine 0 (0.51). La pente n'influe donc pas significativement la présence de désordre. Pour le karst nu, l'influence de la pente ne s'explique pas encore bien malgré un contraste de 0.89. Cette valeur n'est cependant pas assez marquée pour que nous sélectionnions le critère pente pour le karst nu.

Il faut préciser que les résultats obtenus ici sont intéressants pour le karst de contact car il montre que la pente est un critère significatif qui influe sur la susceptibilité. La pertinence de ce critère n'est cependant possible que grâce aux données LIDAR au pas de 0.5 m. Le même travail réalisé à partir de la BDalt de l'IGN au pas de 25 m n'est pas concluant. Il serait intéressant de mettre en œuvre la théorie du poids des évidences avec un MNT acquis à la résolution intermédiaire (5 m par exemple avec un LIDAR de moins bonne résolution, photogrammétrie, etc.).

Karst de contact												
Classes pente degre	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0 à 4	37	10,9%	486	29,2%	0,37	-0,99	0,23	-1,22	0,03	0,00	0,18	-6,69
> à 4	304	89,1%	1176	70,8%	1,26	0,23	-0,99	1,22	0,00	0,03	0,18	6,68
total	341	100%	1662	100%								

Karst de couverture												
Classes pente degre	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0 à 5	40	78,4%	688	85,8%	0,91	-0,09	0,42	-0,51	0,03	0,10	0,36	-1,43
> à 5	11	21,6%	114	14,2%	1,52	0,42	-0,09	0,51	0,10	0,03	0,36	1,42
total	51	100,0%	802	100%								

Karst nu												
Classes pente degre	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0 à 5	19	39,6%	1566	61,4%	0,65	-0,44	0,45	-0,89	0,05	0,04	0,30	-2,97
> à 5	29	60,4%	986	38,6%	1,56	0,45	-0,44	0,89	0,04	0,05	0,30	2,97
total	48	100%	2552	100%								

Figure 48 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la pente par la théorie du poids des évidences

Le critère distance aux failles

L'application de la théorie du poids des évidences montre que les failles jouent un rôle dans la distribution des désordres au moins pour les karsts nu et de couverture avec respectivement un contraste de 2.16 et 1.94 (Figure 49) pour une distance à la faille inférieure ou égale à 50 m.

Le tracé des failles sur ce site a été optimisé grâce au données LIDAR et à l'établissement de la carte géologique sur le terrain. C'est le rôle du géologue de proposer un schéma structural pour chaque site étudié.

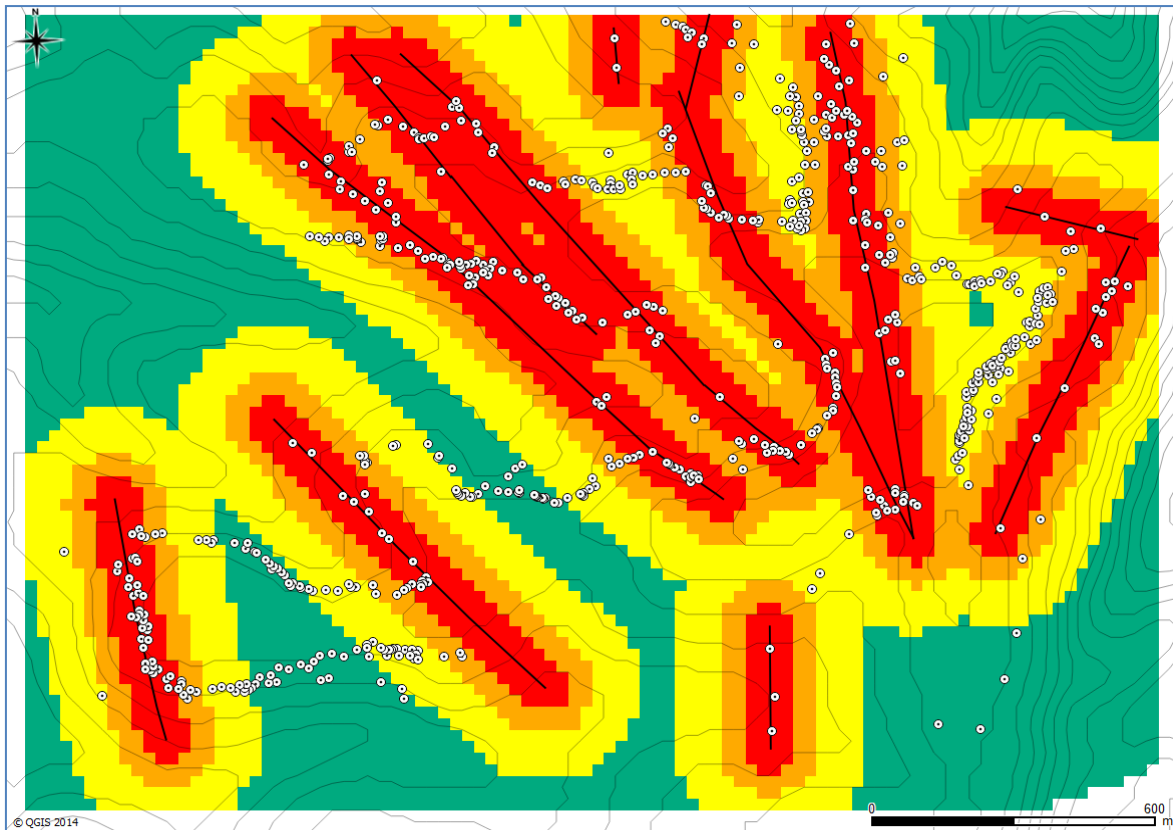


Figure 49 : Carte de la distance aux failles et répartition des désordres associés aux karsts pour le contexte de karst de contact lithostratigraphique

Karst de couverture												
Classes distance faille en m	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0-50	41	80,2%	296	36,9%	2,17	0,777	-1,161	1,937	0,02831	0,10099	0,359580308	5,39
100	9	17,6%	219	27,3%	0,64	-0,439	0,125	-0,564	0,11587	0,02547	0,375953788	-1,50
200	1	2,0%	222	27,7%	0,07	-2,649	0,304	-2,954	1,00452	0,02168	1,013019795	-2,92
>200	0,1	0,2%	65	8,1%	0,02	-3,724	0,083	-3,806	10,01541	0,02096	3,168023519	-1,20
total	51,1	100,0%	802	100%								
Karst de contact												
Classes distance faille en m	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0-50	134	39,3%	573	34,5%	1,14	0,131	-0,076	0,207	0,00974	0,00575	0,124457954	1,67
100	59	17,3%	384	23,1%	0,75	-0,289	0,073	-0,362	0,02003	0,00433	0,156059756	-2,32
200	109	32,0%	496	29,8%	1,07	0,069	-0,031	0,099	0,01176	0,00517	0,130100995	0,76
>200	39	11,4%	209	12,6%	0,91	-0,095	0,013	-0,108	0,03152	0,00400	0,188475113	-0,57
total	341	100%	1662	100%								
Karst nu												
Classes distance faille en m	nombre de pixel avec désordre	%_desordres	nombre total de pixels	%_domaine	Ratio	W+	W-	C	S2 W+	S2 W-	S (C)	C/S(C)
0-50	31	64,6%	619	17,4%	3,72	1,313	-0,847	2,160	0,03396	0,05916	0,305159079	7,08
100	6	12,5%	637	17,9%	0,70	-0,358	0,063	-0,422	0,16825	0,02415	0,438637501	-0,96
200	4	8,3%	1101	30,9%	0,27	-1,311	0,283	-1,594	0,25091	0,02313	0,523493256	-3,04
>200	7	14,6%	1205	33,8%	0,43	-0,841	0,255	-1,097	0,14369	0,02481	0,410495286	-2,67
total	48	100%	3562	100%								

Figure 50 : Résultat de l'analyse sur le critère explicatif de la distance aux failles par la théorie du poids des évidences

2) Carte de susceptibilité

L'analyse multicritères par la théorie du poids des évidences distingue au moins trois critères pour le site de Vau-Vauthier. Le choix d'utiliser un arbre décisionnel (Figure 51) plutôt que d'affecter une formule en fonction des poids de chaque critère est préféré car cette méthode est plus facilement applicable pour d'autres sites qui ont leurs propres caractéristiques et dont les poids des critères peuvent s'avérer différents.

Dans le cas du karst de couverture, la susceptibilité primaire est jugée très faible de par le rôle protecteur de la couverture peu perméable. Une incrémentation de la susceptibilité est opérée lorsque qu'une faille est présente à une distance inférieure ou égale à 50 m.

Dans le cas du karst de contact, zone où les désordres se concentrent, on acte une forte susceptibilité qui sera seulement décrémentée dans les zones à faible pente (< 4°). Le choix de 4° est ici préféré car cette classe concentre la majorité des désordres (304 pixels affectés par des désordres sur 341 pixels affectés au total). Ce qui permet d'obtenir des zones de susceptibilité moyenne (à hauteur d'environ 30 %) au sein même du liseré karstique où les désordres sont absents ou du moins peu présents (37 sur 341 pixels affectés).

Dans le cas du karst nu, la susceptibilité d'apparition de nouveaux désordres est très faible car la vitesse de formation des morphologies karstiques est lente (sur plusieurs milliers d'années). Seul le critère de la distance aux failles incite à incrémenter l'aléa d'un niveau.

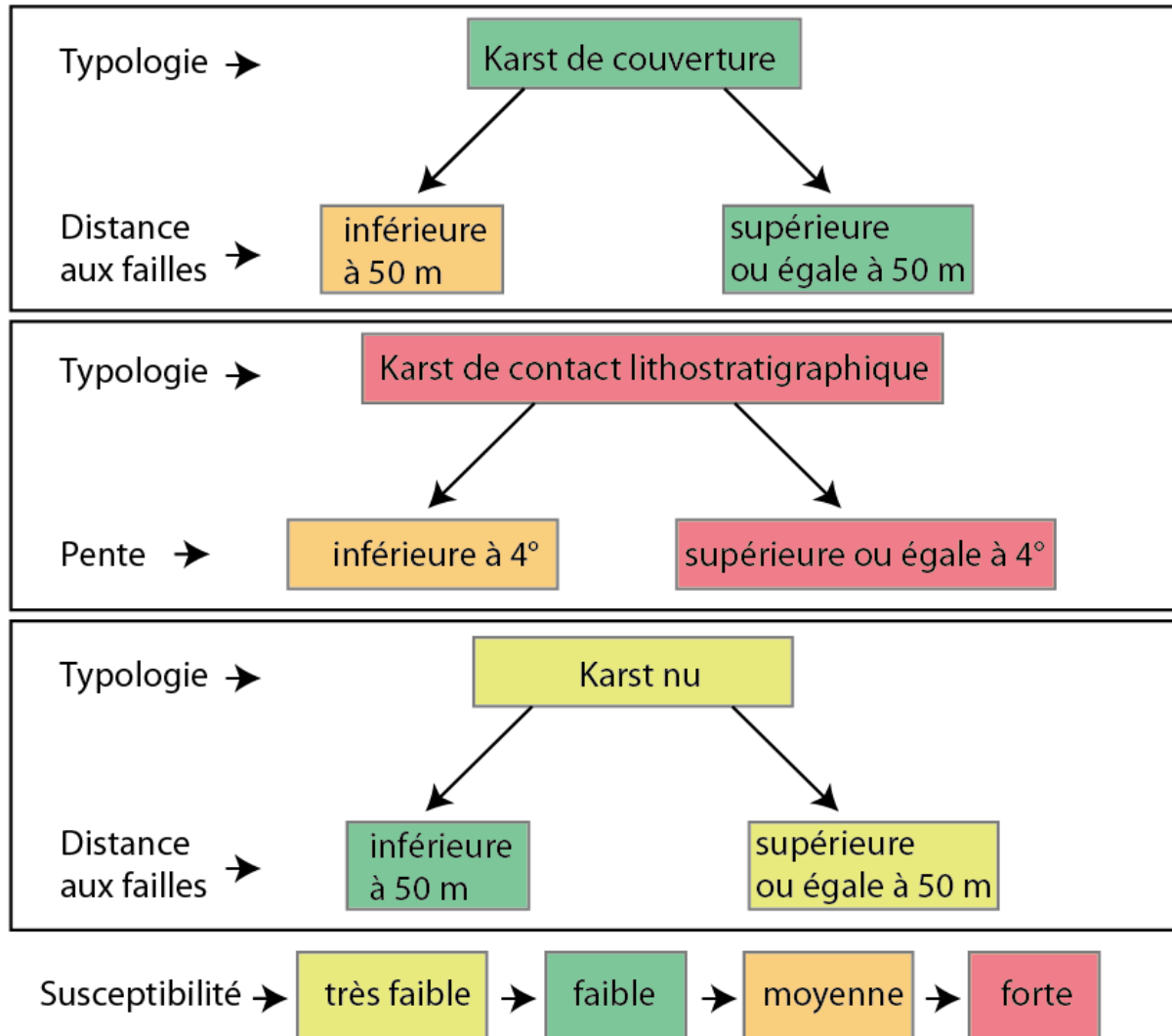


Figure 51 : Arbre décisionnel pour la cartographie de la susceptibilité de présence de désordres liés au contexte de karst de contact lithostratigraphique. Les valeurs seuils de 4° de la pente et de 50 m pour la distance aux failles sont à moduler par un expert pour chaque site étudié

La carte de la susceptibilité est ensuite comparée avec la distribution spatiale des désordres. Sur un total de 440 pixels affectés par des désordres, 304 sont en susceptibilité forte, 78 en moyenne, 41 en faible et 17 en très faible (Figure 52). Le karst de contact, où les désordres peuvent apparaître très rapidement montre des susceptibilités forte et moyenne et concentre ainsi 341 pixels affectés soit plus des trois quart des désordres.

susceptibilité	forte	moyenne	faible	très faible	total
karst de couverture		41	10		51
karst de contact	304	37			341
karst nu			31	17	48
total	304	78	41	17	440

Figure 52 : nombre de désordres par classe de susceptibilité pour le site de Vau-Vauthier

En l'état, l'application de l'arbre décisionnel sur le site de Vau-Vauthier fournit la cartographie suivante (Figure 53).

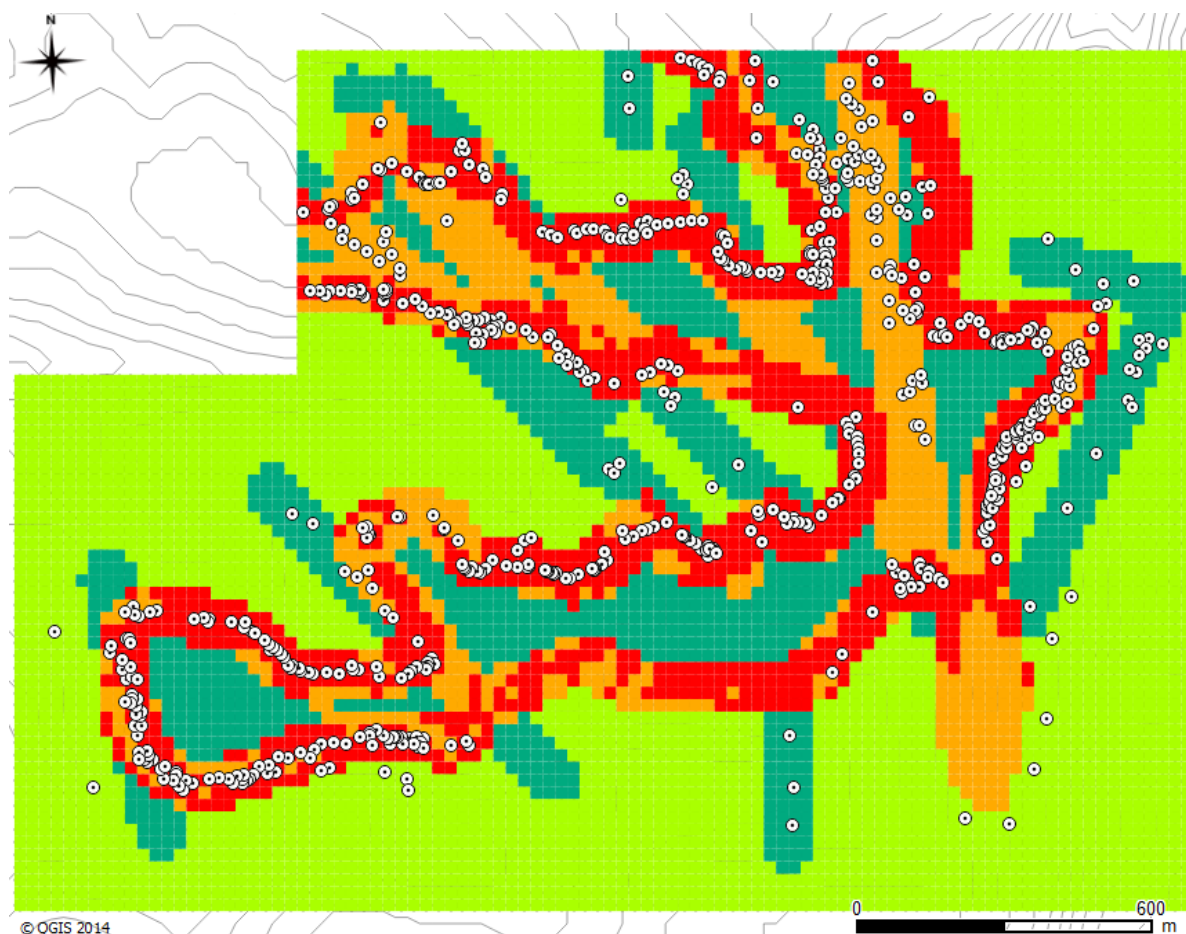


Figure 53 : Carte de la susceptibilité aux désordres liés au contexte de karst de contact lithostratigraphique. Rouge : forte, orange : moyenne, vert foncé : faible, vert clair : très faible. Points blancs : désordres

Le produit final (Figure 53) correspond à une carte de susceptibilité car il est impossible de caractériser l'intensité au stade des connaissances actuelles (surtout dans les zones de karst sous couverture et de contact lithostratigraphique). Nous ne connaissons pas les zones actives qui entraîneraient des mises en pentes évolutives dans le temps. De même nous ne connaissons pas les zones qui pourraient être stables ou faiblement déformées à l'échelle de 100 ans. En l'état des connaissances, la carte de susceptibilité peut être assimilée à une carte d'aléa.

2.4. AQUITAINE : COMMUNE DE ROQUEFORT ET ENVIRONS

Dans le département des Landes, on rencontre des contextes de calcaires karstifiés sous couverture meuble dans différents secteurs. La commune de Roquefort en particulier est impactée par de nombreux désordres liés à la présence de karst (ANTEA 2001, Aubié et al. 2010, Gutierrez 2012, Garnier & Gutierrez 2012). Ce site a donc été choisi comme site complémentaire du contexte de karst sous couverture afin de tester la méthodologie développée dans le contexte du Val d'Orléans et la faire évoluer si besoin.

2.4.1. Délimitation du secteur d'étude

Afin de couvrir un secteur où la prédisposition aux désordres est contrastée, le secteur d'étude comprend la commune de Roquefort et une partie des territoires communaux environnants (Figure 54). Au final, le secteur d'étude couvre une superficie totale de 17 km².

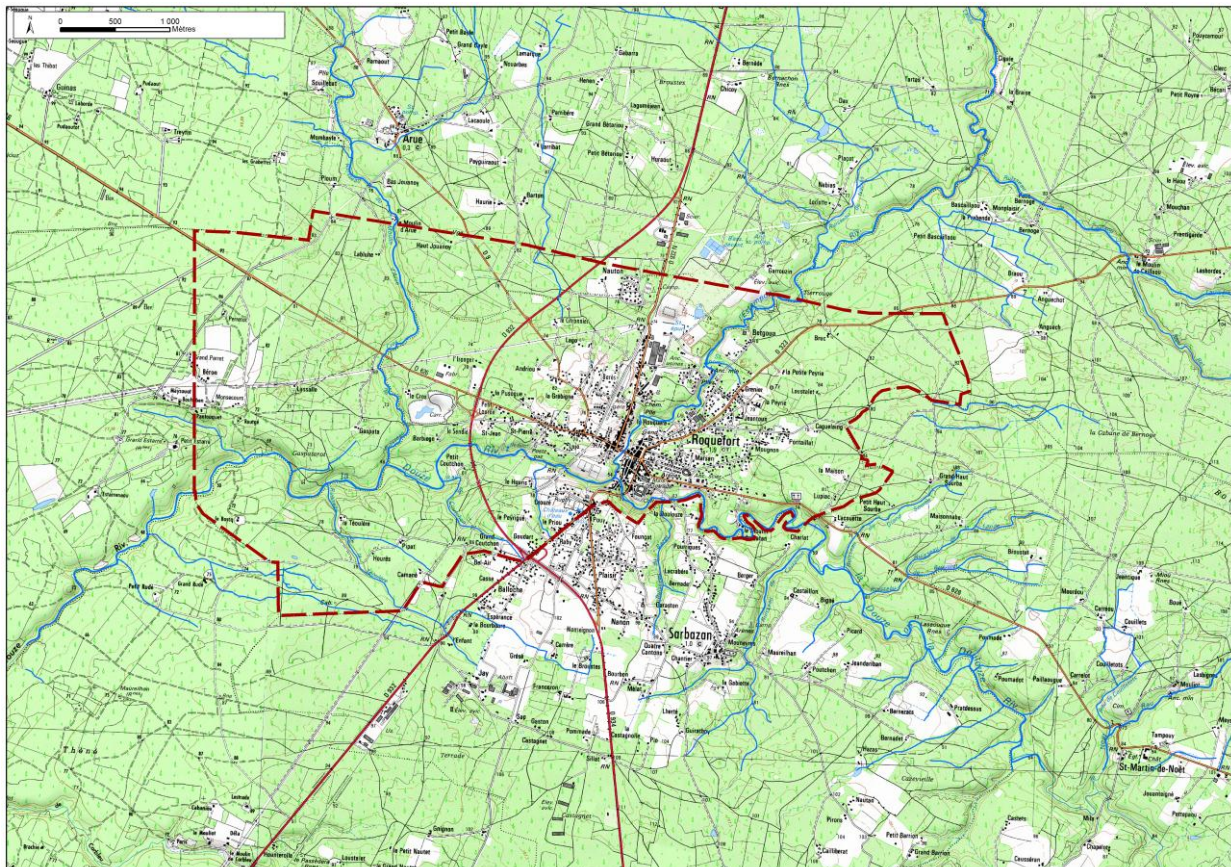


Figure 54 : Délimitation de la zone d'étude (en rouge) de Roquefort (département des Landes)

2.4.2. Contexte géologique

a) Série géologique

La série géologique est présentée sur le log Figure 55, en carte Figure 56 et sur la coupe schématique Figure 57. Les couleurs des couches sur les figures correspondent entre elles. Nous rencontrons de la base vers le sommet :

- **Les calcaires du Crétacé supérieur.** Ils constituent une épaisse série déformée en anticlinal, très karstifiée. Les formations du Cénomanien au Maastrichtien n'ont pas été différenciées pour l'étude : il s'agit des calcaires bioclastiques recristallisés à niveaux de marno-calcaire : Formations de Roquefort, Garrein, Bernadet et de Cousseilhac. Au-dessus des calcaires crétacés déformés, les dépôts tertiaires reposent en discordance et se biseautent en se rapprochant de l'anticlinal.
- **Les dépôts paléocène à éocène** sont constitués de calcaires, sables et grès à la base (Paléocène à Eocène inf.) puis d'une épaisse série molassique (argiles sableuses légèrement carbonatées de l'Eocène). L'Eocène supérieur s'accompagne d'un calcaire crayeux : Le Calcaire de Thétieu. Les dépôts paléocènes et éocènes sont très réduits à l'affleurement. Au droit de l'anticlinal, ces dépôts sont érodés, conservés sous forme de lambeaux dispersés de très faible épaisseur, quasiment toujours lacunaire. Latéralement, sur les flancs Nord et Sud, la série s'épaissit sous la couverture.
- **Les dépôts de l'Oligocène (Rupélien)** sont constitués de calcaires gréseux et grès de la Formation du Moulin de Batan. Ces carbonates reposent en discordance sur les séries crétacées qui s'ajoutent à l'épaisseur de calcaire karstifiable. Ces calcaires affleurent en soulignant l'auréole externe de l'anticlinal.
- **Les Molasses de l'Agenais (Chattien à Aquitanien)** surmontent les Calcaires de la Formation de Batan. Il s'agit d'argiles sableuses dont l'épaisseur augmente sur les flancs de l'Anticlinal.
- **Les faluns du Miocène inf. (Aquitanien-Burdigalien)** sont intercalés dans la série molassique. Il s'agit d'un épisode de dépôt marin qui rassemble les Faluns calcaires de St Avit et les Grès à Miogypsines. Ces dépôts sont karstifiés. Il s'agit de carbonates avec une forte proportion de sables et de niveaux argileux.
- **Les Molasses de l'Armagnac et faluns serravaliens (Burdigalien à Serravalien basal)** surmontent les faluns de la base du Miocène. Il s'agit d'argiles sableuses dont l'épaisseur est constante sur le secteur entre 5 et 15 m en moyenne autour de l'anticlinal. Au sommet des molasses, se dépose un niveau discontinu de Faluns : Faluns du Freches et de Roquefort de quelques mètres d'épaisseur en moyenne, avec une épaisseur maximale dans le secteur de 8 m, très localisée.

- **Série continentale dite du « Plio-Quaternaire » (Serravalien, Pliocène à Pléistocène inférieur).** A la fin du Miocène (Serravalien), une succession de dépôts continentaux se dépose après incisions des séries précédentes, recouvrant quasiment tout le secteur dans un nappage de sables « Plio-quaternaires » dont la géométrie et l'épaisseur est très variable. Ces dépôts forment un ensemble complexe à dominante sableuse de quelques mètres à 30 m d'épaisseur. On regroupe dans cet ensemble (de la base vers le sommet) :
 - Les Sables Fauves (Miocène, Serravalien) : sables grossiers et sables argileux. Ils sont discordants et présentent une base érosive très marquée. Ils sont très représentés à l'affleurement autour et sur l'Anticlinal.
 - Les Glaises Bigarrées (Miocène, Tortonien) : argiles plastiques présentes au Sud-Est de l'anticlinal, intercalé dans les sables.
 - La Formation d'Arengosse (Pliocène) : sables blancs grossiers à moyens à intercalations argileuses.
 - La Formation d'Onesse (Pléistocène inf., Prétiglien supposé) : sables blancs moyens
 - Puis les dépôts de terrasses fluviales et les sables éoliens (Pléistocène moyen à supérieur).

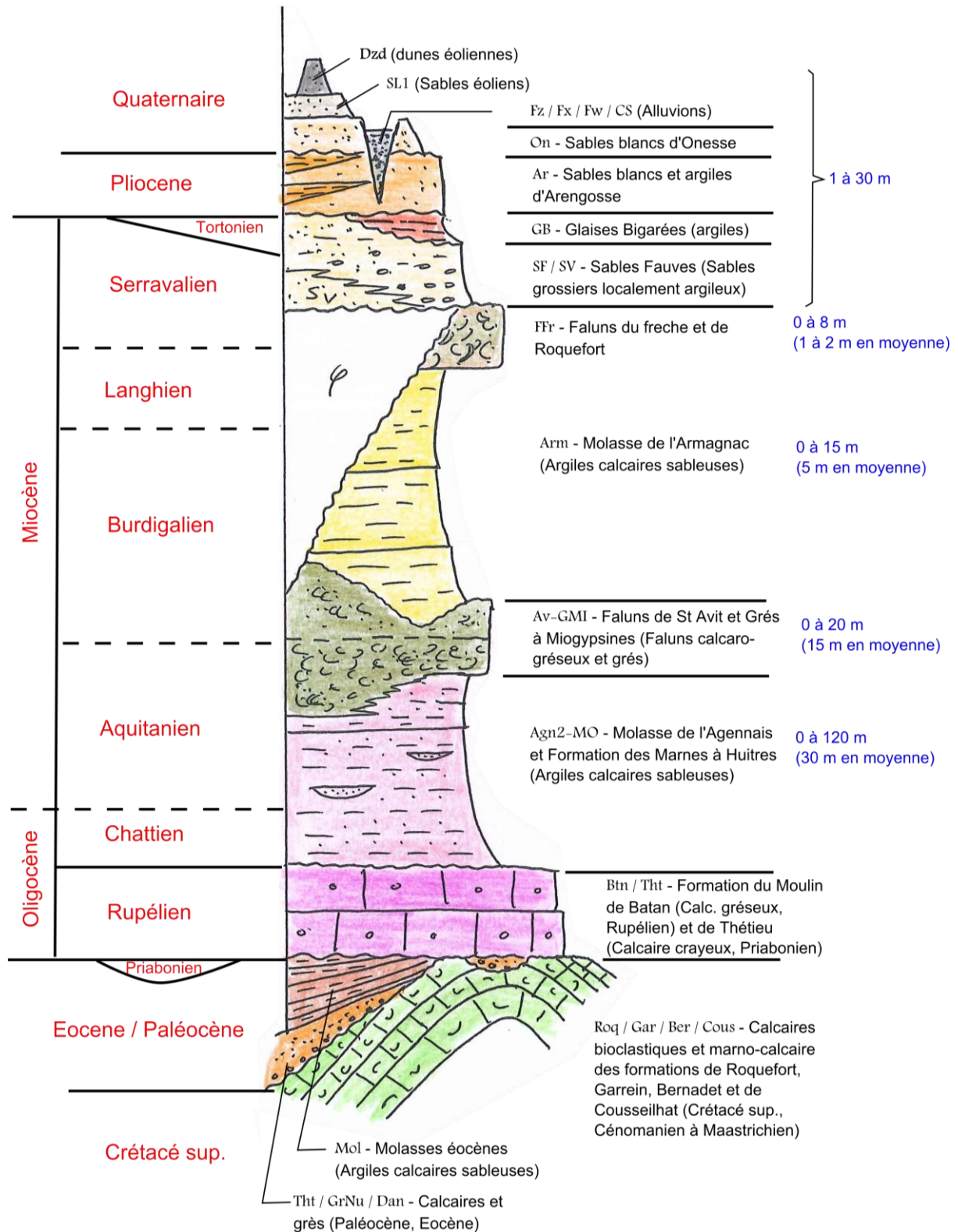


Figure 55 : Log schématique du secteur de Roquefort (département des Landes)

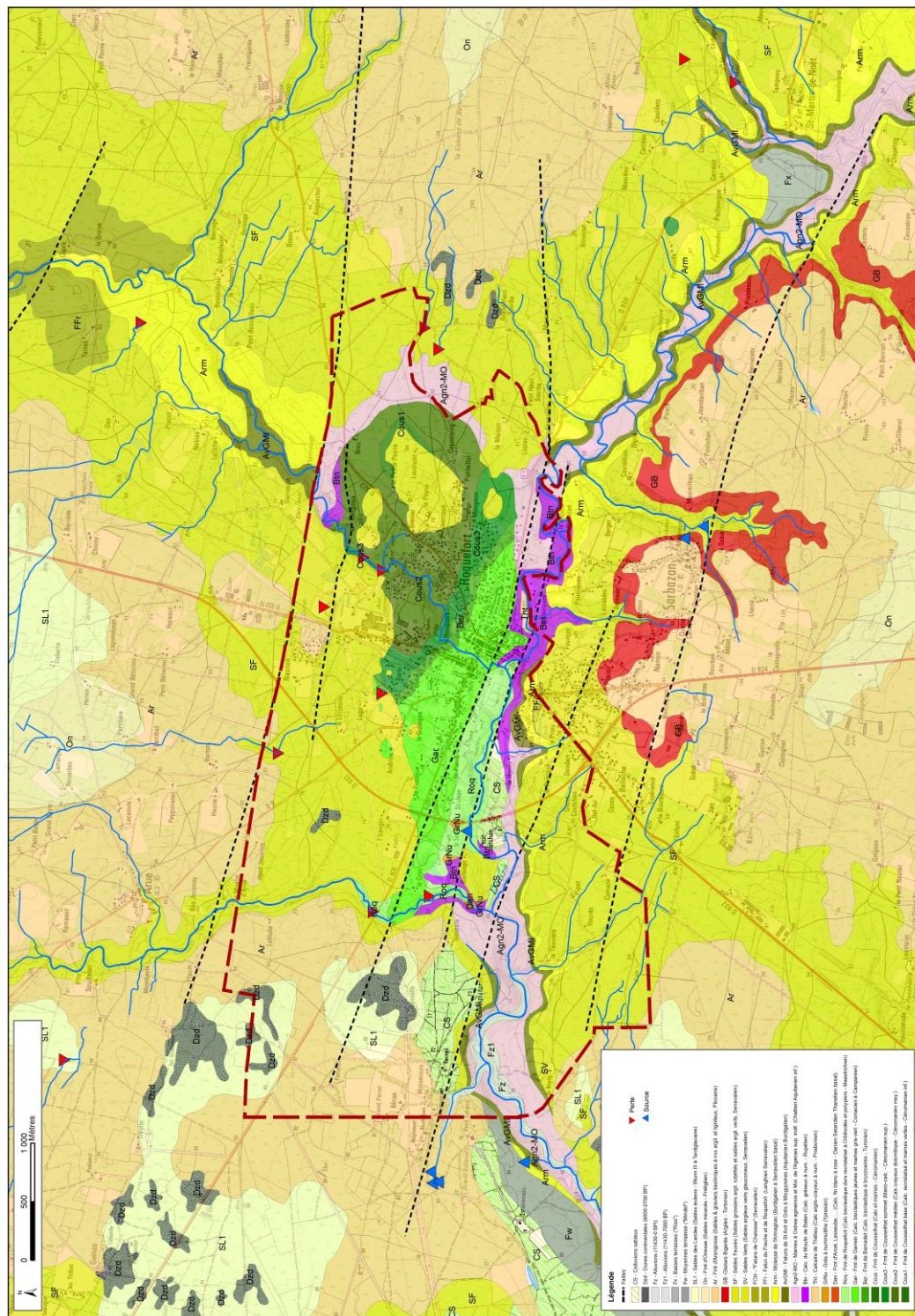


Figure 56 : Carte géologique de la zone d'étude de Roquefort (département des Landes)

b) Ensemble karstifiées et sectorisation en fonction de la répartition des niveaux calcaires

Deux niveaux présentent une karstification importante :

- Les calcaires crétacés surmontés des calcaires gréseux du Rupélien forment un ensemble très épais et très karstifié.
- Les faluns calcaires du Miocène inférieur constituent un niveau calcaire peu épais, de 15 m en moyenne (0 à 20 m). Il présente également de nombreux insolubles (sables, argiles). Malgré cela, ils sont associés à des manifestations karstiques.

Les Faluns du Freches et de Roquefort, ne mesurant que quelques mètres en moyenne d'épaisseur, de même que les lambeaux, très localisés, de calcaires éocènes sont négligés pour la caractérisation de la susceptibilité à l'effondrement.

La coupe schématique Figure 57 illustre la compartimentation de la géologie par des failles E-W. Tous ces compartiments sont recouverts de dépôts sableux Plio-quaternaires. Du Sud vers le Nord, on observe les 3 compartiments homogènes suivants :

- **Le compartiment Nord** (en bleu sur la Figure 57) présente 2 niveaux karstifiés : Les Faluns, situés à faible profondeur, et les calcaires crétacés, situés au-delà de 40-50 m de profondeur. Les effondrements dans ce secteur sont rattachés aux karsts dans les Faluns.
- **Dans le compartiment central** (secteur de Roquefort en vert sur la Figure 57), les faluns et les molasses de l'Armagnac ont été érodés. Il existe un seul niveau calcaire constitué de l'ensemble Crétacé + Oligocène.
- **Dans le Compartiment Sud** (Barbazan, en jaune sur la Figure 57) situé au Sud de La Douze, nous rencontrons la même configuration que le compartiment Nord, avec la présence d'un niveau argileux intercalé : Les Glaises Bigarrées.

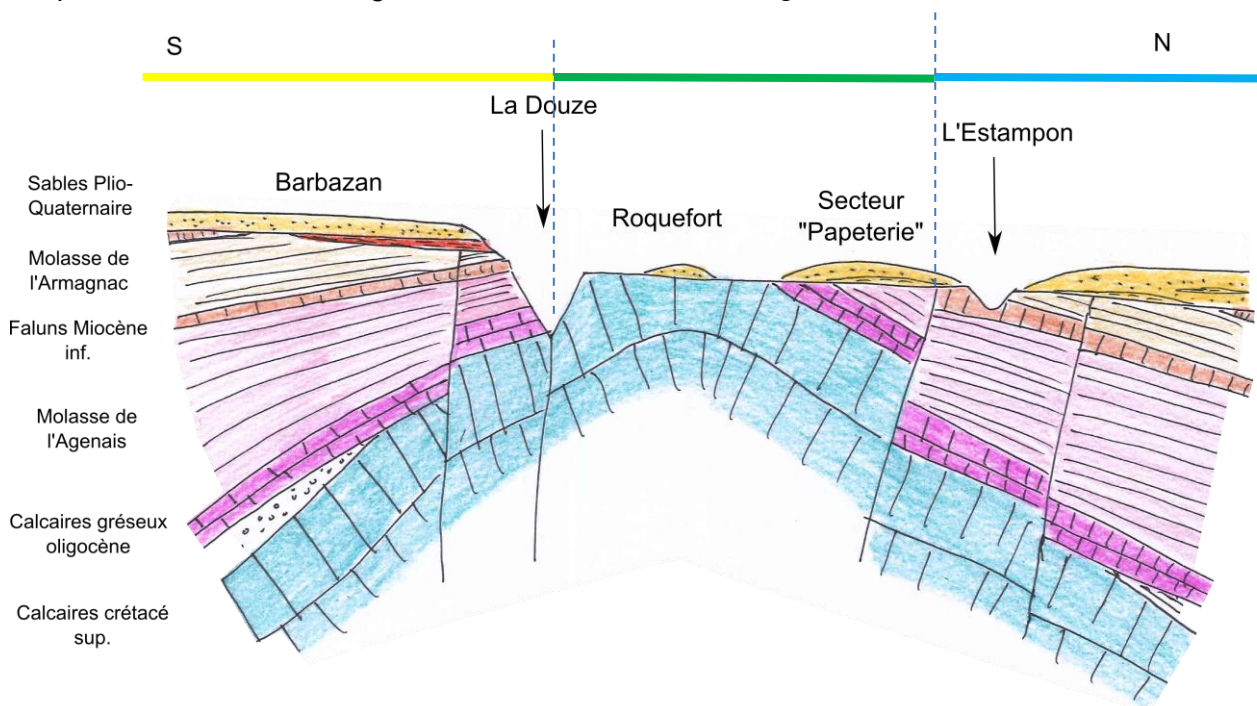


Figure 57 : Coupe schématiques N-S de Roquefort (département des Landes)

c) Epaisseur de recouvrements

La compartimentation présentée dans le paragraphe précédent s'illustre également à travers 2 cartes :

- La carte de l'épaisseur de la couverture (Figure 58). Cette carte présente l'épaisseur de la couverture sablo-argileuse au-dessus du premier niveau de carbonates karstifiés rencontré en profondeur (Faluns ou Crétacé + Oligocène).
- La carte de l'épaisseur du premier banc de marne rencontré en profondeur (Figure 59).

Cette cartographie a été réalisée à partir de forages connus de la BSS (Banque du Sous-sol : <http://infoterre.brgm.fr>). Ces sondages sont indiqués sur les cartes par des points auxquels sont associées les valeurs d'épaisseur objective repérées en sondage.

Concernant le recouvrement, nous observons un recouvrement croissant en s'éloignant de l'anticlinal, il peut atteindre 50 à 60 m par endroit.

L'épaisseur du premier banc marneux dans la couverture est :

- Régulière dans le compartiment nord. L'épaisseur est inférieure à 10 m en moyenne (de 0 à 35 m). Il s'agit des Molasses de l'Armagnac.
- Très variable dans le compartiment central (de 0 à 60 m). Il s'agit des Molasses de l'Agenais.
- Régulière dans le compartiment Sud de 0 à 20 m d'épaisseur (Glaize Bigarrées et Molasse de l'Armagnac)

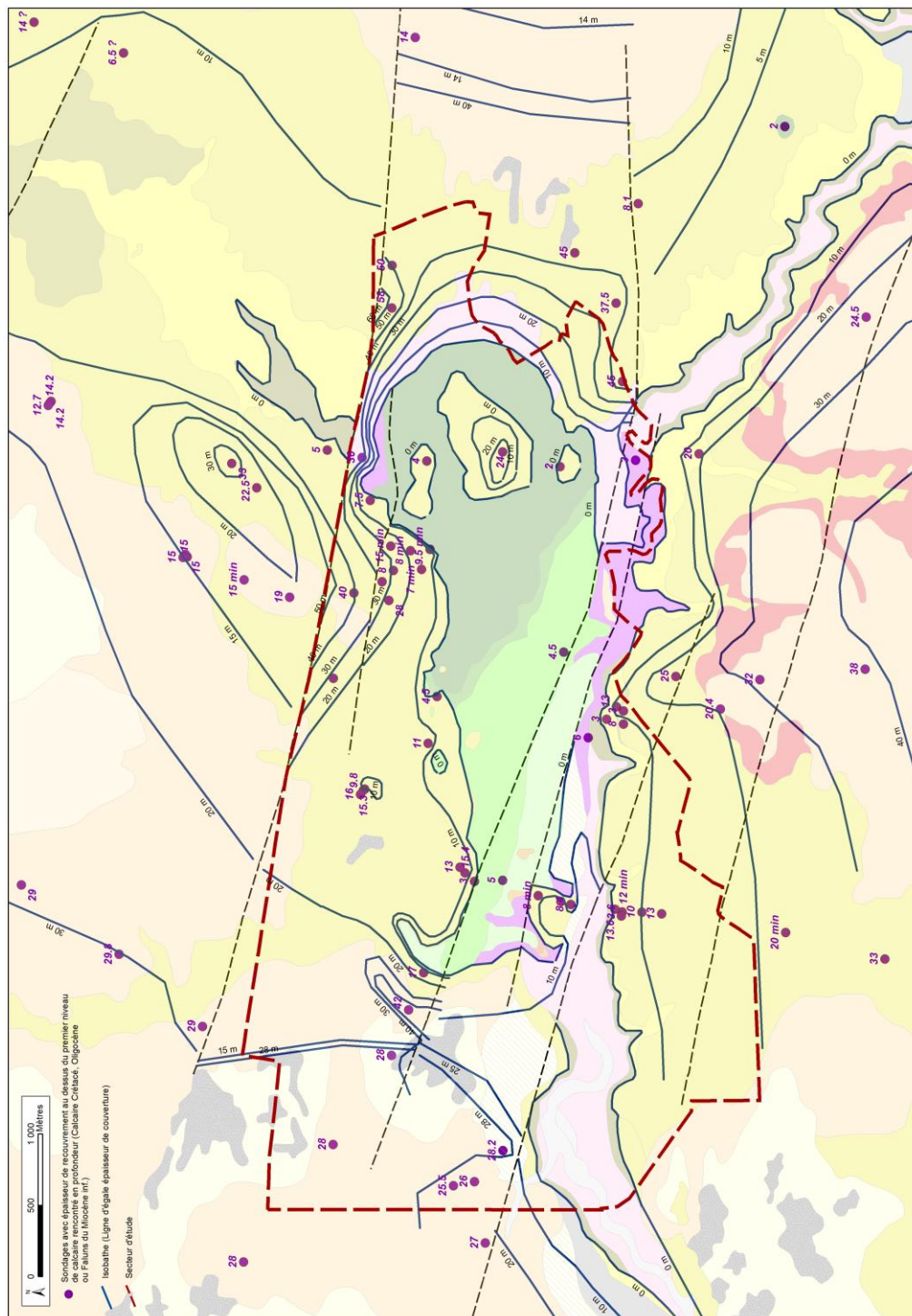


Figure 58 : Carte de l'épaisseur de la couverture au-dessus des premiers bancs de carbonates à Roquefort (département des Landes)

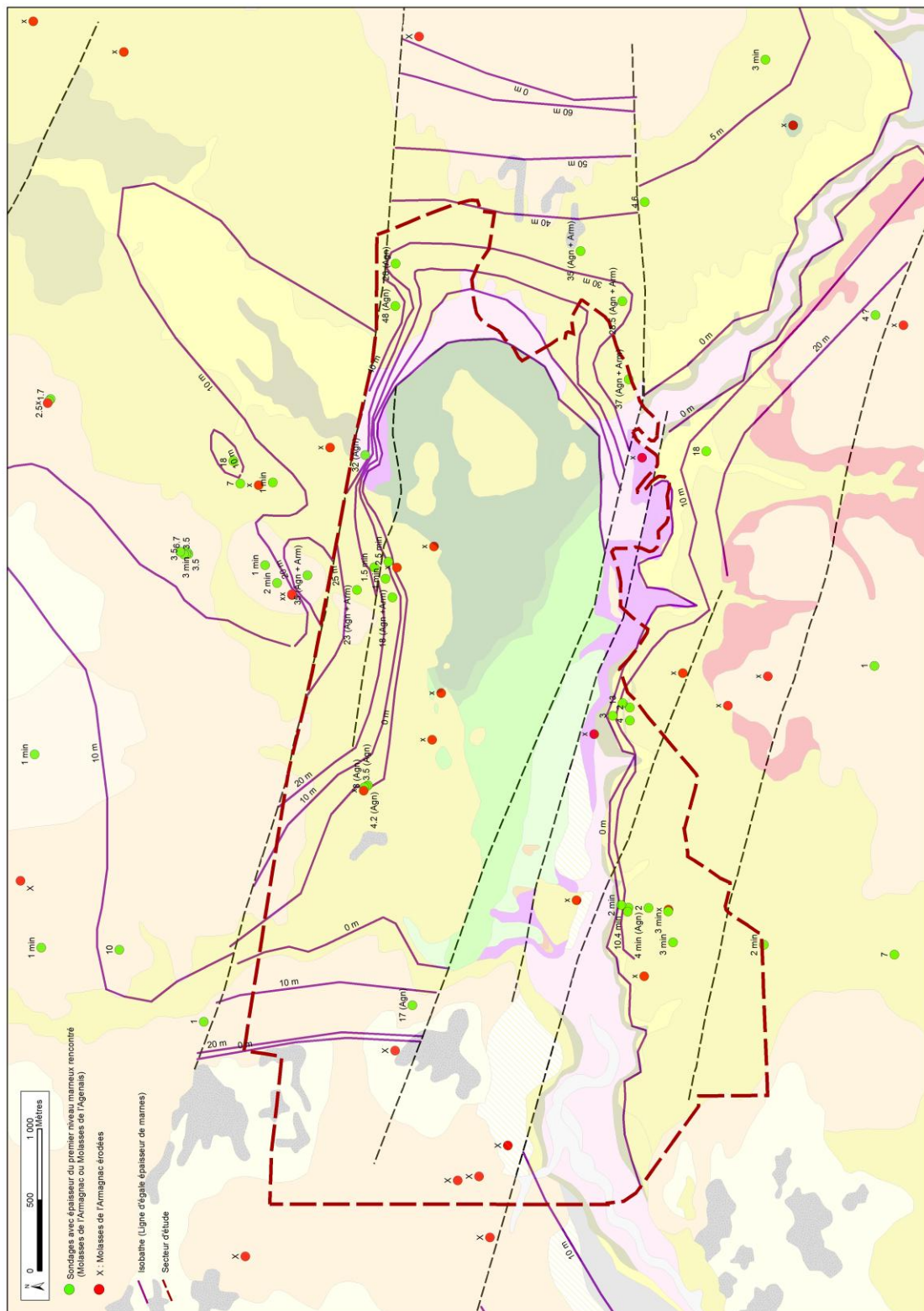


Figure 59 : Carte de l'épaisseur des premières couches marneuses dans la couverture à Roquefort (département des Landes)

d) Origine et évolution de la forte karstification sur Roquefort

La karstification de ce secteur résulte de l'exondation polyphasée de ce secteur. La karstification est liée à une histoire géologique complexe présentant une alternance de périodes de raccourcissement et d'extension (Figure 60). Son histoire justifie la karstification très supérieure à la normale, enregistrée dans les anticlinaux landais. Cette karstification est accentuée également par la couverture sableuse acide.

Phase d'exondation

Les phases d'exondation correspondent à une remontée des terrains ou un abaissement du niveau marin. Ces phases conduisent à une karstification des **carbonates** situé au-dessus du niveau de base (niveau marin + pentes des cours d'eau principaux). Les dépôts les plus superficiels s'érodent et on enregistre dans la pile lithologique des **surfaces d'érosions** : C'est, par exemple, le cas du Campanien qui ne mesure que quelques décimètres dans la Carrière du Cros à Roquefort alors que dans le reste du bassin, son épaisseur dépasse plusieurs centaines de mètres.

Le moteur de l'exondation peut être variable :

- L'eustatisme (variation du niveau marin). Il est, à l'échelle globale, limité à quelques dizaines de mètres (une centaine de mètres au maximum). Il s'agit d'un paramètre limité en amplitude, peu influent. Seuls les bassins endoréiques (cas de la crise messénienne en Méditerranée) peuvent conduire à une forte karstification sur des épaisseurs importantes en lien avec l'eustatisme. Le cas des bassins endoréiques est rare et limité dans l'espace.
- La tectonique en extension : L'ouverture océanique s'accompagne d'un bombement de la croûte au droit des dorsales, et latéralement tout un secteur jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres peuvent être exondés dans un contexte de tectonique en extension. C'est le cas actuellement de la Mer Rouge qui correspond à un rift océanique en ouverture où on observe de part et d'autre des chaînes de montagne de 500 à plus de 2000 m d'altitude sur la bordure Ouest de l'Arabie Saoudite et la bordure Est de l'Égypte (influence d'environ 800 km de part et d'autre du rift). Il est possible que ce soit le cas en Aquitaine à la fin du Jurassique sup. et au Crétacé inf. (Ouverture de l'Atlantique Nord).
- La tectonique en contexte de raccourcissement est, de loin, le moteur majeur de l'exondation qui conduit à un très fort abaissement du niveau de base.

Lors des périodes de raccourcissement, les failles du secteur de Roquefort ont un jeu inverse.

Les périodes de raccourcissements présentent souvent des périodes de temps courtes dans le Campanien, le Paléocène-Eocène, le Miocène sup./Pliocène et probablement le Quaternaire (supposé, non documenté en Aquitaine).

On suppose que la surface de décollement de l'anticlinal de Roquefort est, comme on l'observe ailleurs, lié à des évaporites. Ces mêmes évaporites ont pu être dissoutes et remplacées par des brèches constituées des terrains environnant le diapir (« caprock ») effondrés à cause du déficit de matière créé par la dissolution.

Phase de distension

Lors des périodes d'extension les failles du secteur ont un jeu normal. Il en résulte un jeu actuel de ces failles qui est la combinaison de remontées et d'abaissements successifs.

Lors de la relaxation des contraintes, l'anticlinal de Roquefort « s'effondre », les fractures en extension peuvent favoriser les infiltrations. On enregistre une forte subsidence (effondrement du bassin) qui favorise le dépôt et la conservation des sédiments. Sur le secteur de Roquefort les périodes de distension sont : le Crétacé (anté-Campanien), le Maastrichien, l'Eocène sup, l'Oligocène, le Miocène inf.

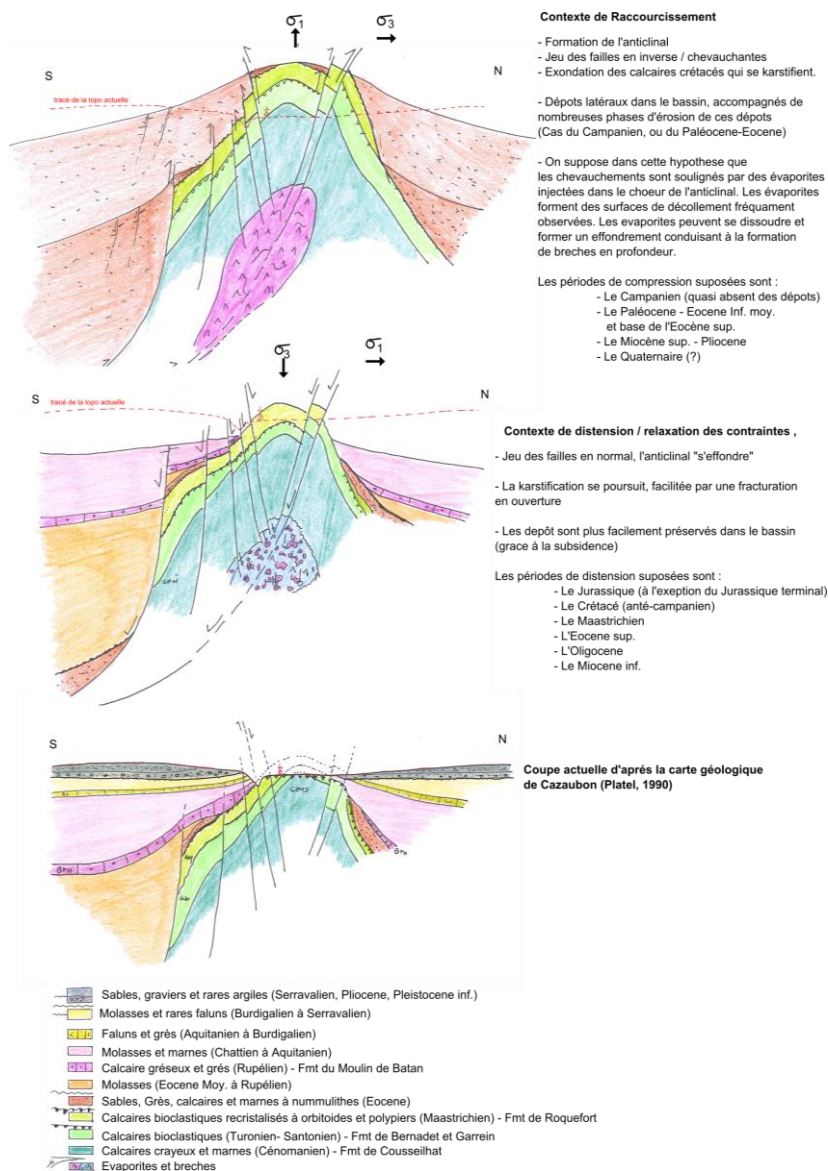


Figure 60 : Coupes géologique reconstituant l'histoire de la karstification du secteur de Roquefort (département des Landes)

2.4.3. Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique a pu être appréhendé sur la base des données hydrogéologiques existants dans la BSS (données piézométriques, pertes, sources). Ces informations sont reportées sur la carte Figure 61. L'aquifère de base, le plus productif, est constitué par les calcaires karstifiés du Crétacé. Cette nappe est drainée par le cours d'eau principal La Douze. Les affluents de la Douze drainent la nappe superficielle dans les formations de couverture perchée par rapport à la nappe karstique. Les affluents en rive droite viennent alimenter la nappe karstique par des pertes dans le secteur où la couverture devient de faible épaisseur voire disparaît. L'Estampon est un bon exemple avec deux pertes dans son lit à proximité des premiers affleurements calcaires.

Les isopièzes de la nappe des calcaires sont peu contraintes dans le secteur nord du fait de l'absence de piézomètres. De plus l'apparition d'une nappe dans les Faluns rend le schéma de fonctionnement hydrogéologique plus complexe.

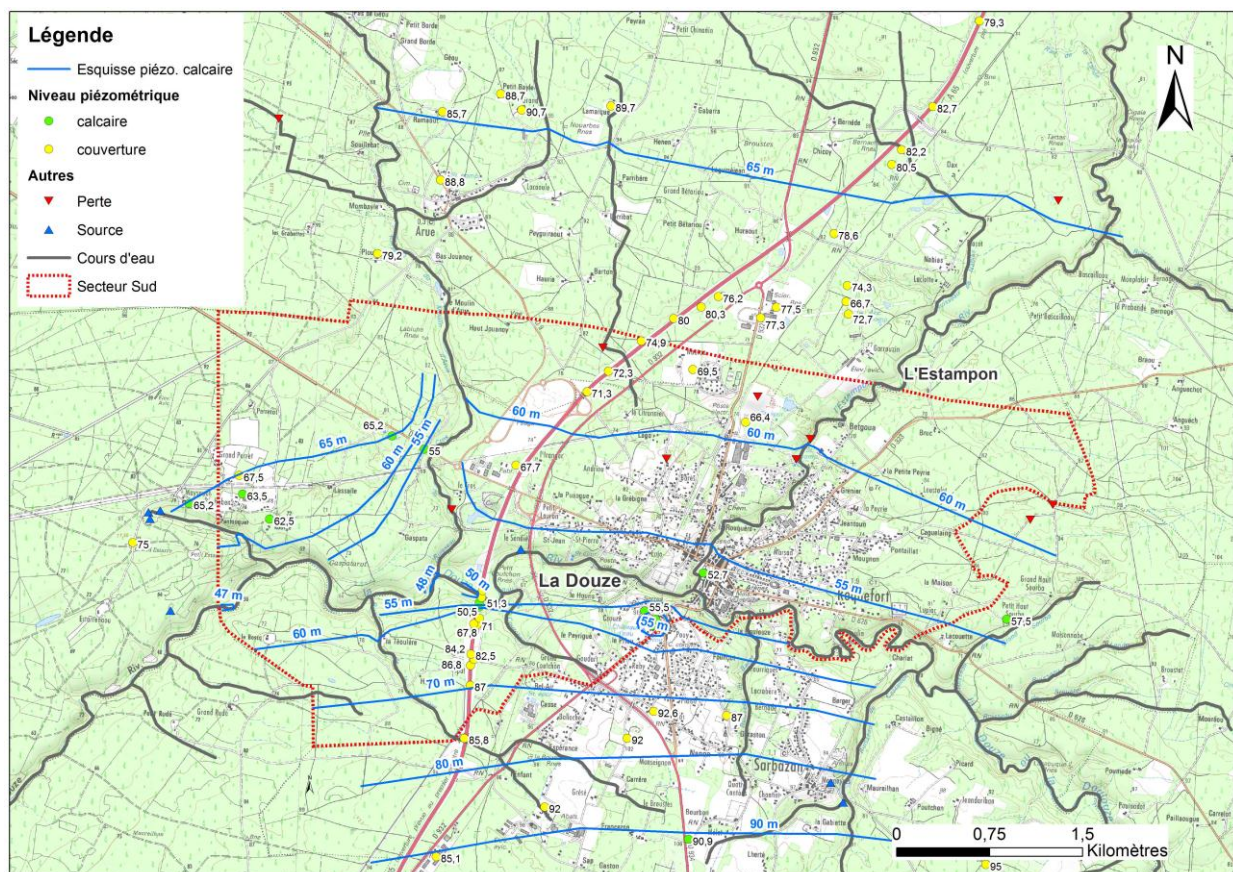


Figure 61 : Carte hydrogéologique du secteur d'étude montrant une esquisse de la piézométrie de la nappe karstique du Crétacé, les niveaux piézométriques mesurés dans le calcaire et l'aquifère superficiel (couverture), les cours d'eau avec les pertes principales qui alimentent le karst et les sources

2.4.4. Inventaire des désordres d'origine karstique

a) Cartographie et données disponibles

Les désordres et des relevés géomorphologiques ont été recueillis à partir de données bibliographiques et d'un relevé sur le terrain sur 5 jours. Les données bibliographiques concernent les bases de données BD-cavités et BD-MVT ainsi que les différents rapports géotechniques et d'expertise sur le secteur.

208 éléments positionnés sur la Figure 62 ont été relevés sur le secteur :

	Eléments repérés / validés sur le terrain	Biblio et cartes (non vérifié / non vérifiable)
Pertes	5	3
Sources	5	2
Fontis & dolines	129	64

b) Analyse et répartition

Les désordres se répartissent quasi exclusivement sur la moitié nord du secteur. Les relevés montrent deux échelles de distributions :

- A l'échelle hectométrique : les dolines s'alignent souvent le long de failles cachées sous la couverture qui doivent jouer un rôle de drains karstiques. Ces failles, orientées E-W, induisent un alignement de désordres E-W (Figure 62, Figure 64).
- A l'échelle kilométrique, la majorité des dolines forment un croissant (Figure 62) qui accompagne la rive droite de la ligne de drainage qui traverse le secteur : L'Estampon et La Douze. Pour expliquer la répartition des désordres à cette échelle dans le secteur Nord le rôle de l'hydrogéologie est avancé avec deux nappes impliquées :
 - L'écoulement de la nappe crétacée s'effectuant vraisemblablement du Nord vers le Sud, drainé au Sud par La Douze.
 - La présence de nappe d'eaux perchées dans la couverture Plio-quadernaire s'écoulant vers le Sud et le Sud-Est.

En revanche les paramètres suivants semblent limiter l'apparition de désordres :

- Forte épaisseur de couverture (cas lorsqu'on s'éloigne de l'anticlinal), renforcé par la présence de couches argileuses épaisses formant un écran aux infiltrations de la surface.
- Nappe de l'aquifère crétacé en charge (cas du Sud de Roquefort)

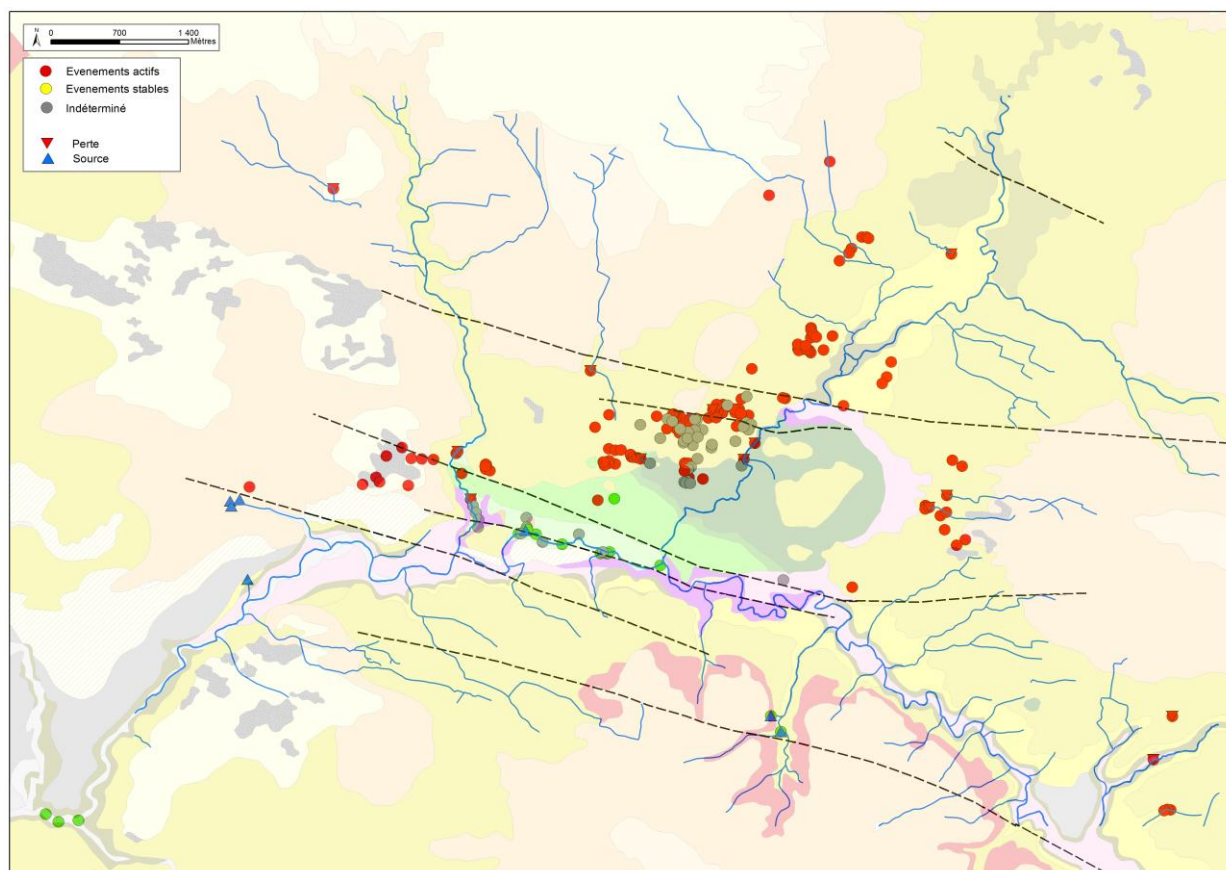


Figure 62 : Carte des désordres connus sur le site de Roquefort (département des Landes)

c) Descriptions désordres (Origine, Intensité, ...)

Les désordres du secteur présentent une évolution, observée durant les expertises qu'effectue le BRGM dans ce secteur depuis 2012 et confirmée par les données bibliographiques plus anciennes qui mentionnaient déjà ces désordres.

La forme et la taille des désordres sont variables et dépendent de la profondeur du calcaire, de la nature de la couverture et du temps écoulé depuis l'apparition du désordre.

Il est possible d'observer des dolines aux parois verticalisées : des fontis (Figure 63) qui correspondent à un effondrement brutal souvent récent, généralement rencontré sur substrat argileux ou argilo-sableux (« cohésif »).

Il existe également un grand nombre de désordres (Figure 66) à pente plus ou moins forte (1 à 30°), souvent remplies d'eau (nappe aquifère superficielle). Il s'agit soit d'un soutirage plus lent ou d'un ancien fontis dont les pentes se sont rééquilibrées avec le temps. On rencontre ces événements sur substrat sableux (« frottants »).

Le mécanisme proposé pour les dolines sous-couverture de Roquefort est un soutirage de la couverture dans le karst soit par le battement de la nappe crétacé soit par le transfert d'eau de surface (zone urbanisée) ou de la nappe des sables Plio-quaternaire vers le karst crétacé.

L'intensité des désordres dans le secteur, ne semble pas répondre à une logique évidente. Les désordres les plus petits mesurent un demi-mètre de diamètre et les plus grands une soixantaine de mètres, avec une moyenne qui se situe entre 15 et 20 m. La profondeur maximale mesurée est de 15 m pour une moyenne autour de 2,5 m de profondeur.

d) Conclusions

Dans un premiers temps, les conclusions que nous apporte l'étude de ce site sont :

- Des désordres peuvent survenir malgré une épaisse couverture (jusqu'à 30-40 m).
- De faibles épaisseurs de couches calcaires suffisent à produire des karsts qui induisent des désordres. C'est le cas des faluns qui mesurent moins de 20 m d'épaisseur et ne sont pas des carbonates purs. Ils renferment en effet une fraction assez importante de sables et d'argiles.
- Le rôle de l'hydrogéologie est un facteur majeur dans la distribution et la prédictibilité des désordres.
- L'urbanisation de secteurs karstifiés est un élément déclencheur de désordres par l'apparition de concentrations d'écoulements depuis la surface, susceptibles de réactiver des karsts colmatés (Figure 65).



Figure 63 : Photo d'un fontis en 2012 sur le site de l'ancienne papeterie de Roquefort (département des Landes). Substrat argileux ou argilo-sableux.



Figure 64 : Deux fontis alignés selon une direction E-W, apparus sur l'avenue Gaston Lescouzeres en 2012 à Roquefort (département des Landes)



Figure 65 : Fontis de petite taille au droit d'une gouttière (Roquefort, département des Landes)



Figure 66 : Doline noyée (nappe) sur la commune de Roquefort (département des Landes)

2.4.5. Cartographie de la susceptibilité à l'effondrement

a) Délimitation des zones karstifiées

Comme déjà mentionné, la partie nord du secteur d'étude est mal connue d'un point de vue hydrogéologique du fait de l'absence de points d'observation dans la nappe des Faluns. Il a donc été décidé de focaliser l'analyse de la distribution spatiale des désordres et la cartographie de la susceptibilité à l'effondrement dans le secteur sud pour lequel : 1) la formation carbonatée karstifiée est unique et constituée par les calcaires Crétacé, 2) deux typologies de karst coexistent : karst nu et karst sous couverture, 3) les désordres sont nombreux, 4) le contexte hydrogéologique est mieux connu.

Ce secteur sud correspond à une large partie du territoire communal de Roquefort et de la partie sud de la commune d'Arue (au Nord de Roquefort). Cette délimitation permet de s'affranchir de la présence de Faluns karstifiés qui sont également à l'origine de désordres. L'intégralité du secteur sud est considérée comme karstifiée (karst nu et karst sous couverture).

b) Cartographie des typologies de karst

Les deux typologies de karst du secteur d'étude sont le karst nu et le karst sous couverture (Figure 67). La délimitation des deux typologies est basée sur :

- la carte géologique harmonisée à 1/50 000 mise à jour en 2014 pour les besoins du projet,
- des observations de terrain réalisées en 2014,
- des coupes de sondages de la BSS (Banque du Sous-Sol) incluant les sondages de l'autoroute Langon-Pau.

Le karst nu est constitué par les lithologies suivantes (par ordre d'importance) :

- calcaires bioclastiques et marno-calcaires du Crétacé supérieur,
- les calcaires gréseux : Formation du Moulin de Batan (Oligocène, Rupélien),
- calcaires fin et argilo crayeux du Paléocène et de l'Eocène ainsi que les faluns calcaro-gréseux du Miocène inférieur (présents localement sur le secteur d'étude).

Dans le secteur de karst sous couverture, la couverture est constituée de terrains principalement meubles des formations suivantes (par ordre d'importance) :

- sables grossiers localement argileux : Sables Fauves (Miocène, Serravalien),
- sables blancs fluviatiles : Formation d'Arengosse (Pliocène),
- sables fins éoliens et dunes sableuses continentales (Quaternaire, Holocène),
- argiles sableuses des Molasses de l'Agenais (Oligocène) et de l'Armagnac (Miocène inférieur),
- alluvions et colluvions sableuses (Quaternaire, Holocène).

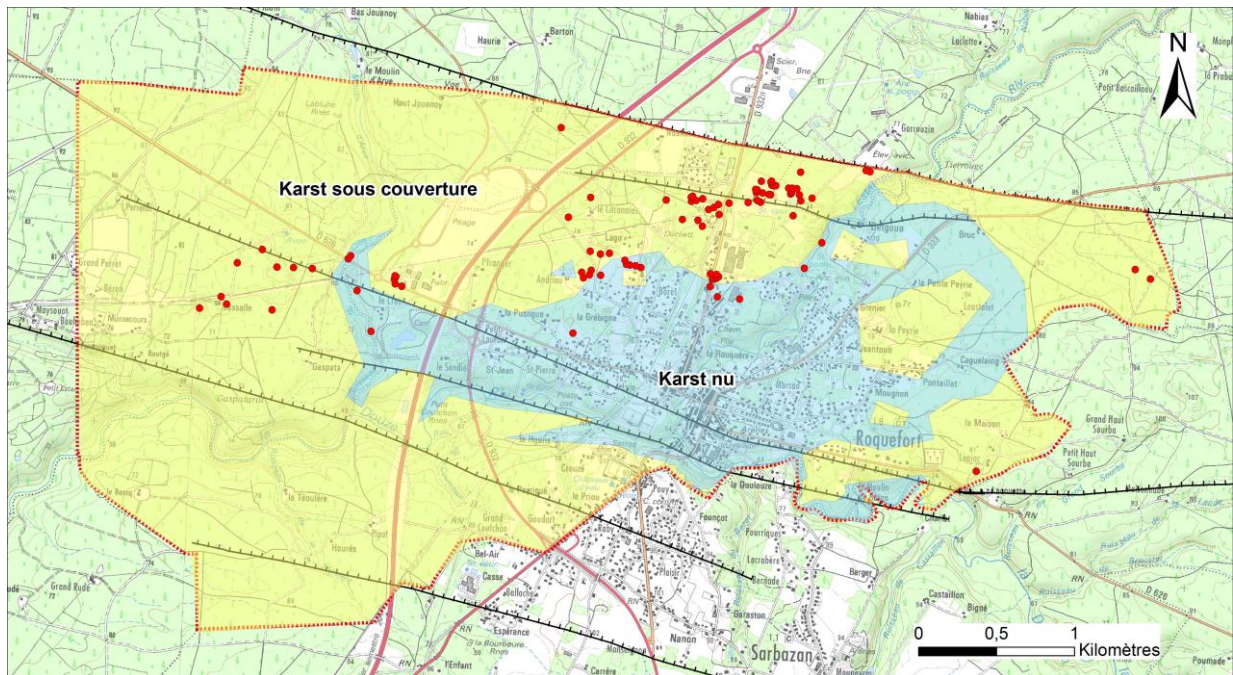


Figure 67 : Carte des typologies de karst pour le secteur d'étude de Roquefort et répartition des désordres liés à la présence de karst. Les points rouges représentent les désordres inventoriés

c) Cartographie des critères explicatifs

- Karst nu

Le nombre de désordres est faible (16) et ne se prête pas à une analyse statistique par le poids des évidences. Par contre, une cartographie multicritères peut être réalisée en partant du constat que 14 des 16 désordres sont soit situés à une distance de moins de 100 m d'un cours d'eau perché (les désordres sont des pertes dans la plupart des cas) soit dans des zones construites (zone urbanisée ou zone industrielle). Il est donc raisonnable de cartographier la susceptibilité en fonction du critère distance aux cours d'eau alimentant le karst (tampon de 100 m autour des cours d'eau) et du critère occupation du sol (secteurs anthropisés à plus forte susceptibilité, utilisation de la BD Corine LandCover).

La carte de susceptibilité résultante (Figure 68) présente deux classes de susceptibilité :

- une classe de susceptibilité faible correspondant aux zones anthropisées à moins de 100 m des cours d'eau perchés et/ou à une zone construite et
- une zone à susceptibilité très faible où l'on ne peut exclure des effondrements mais où aucun critère déclencheur potentiel n'est présent.

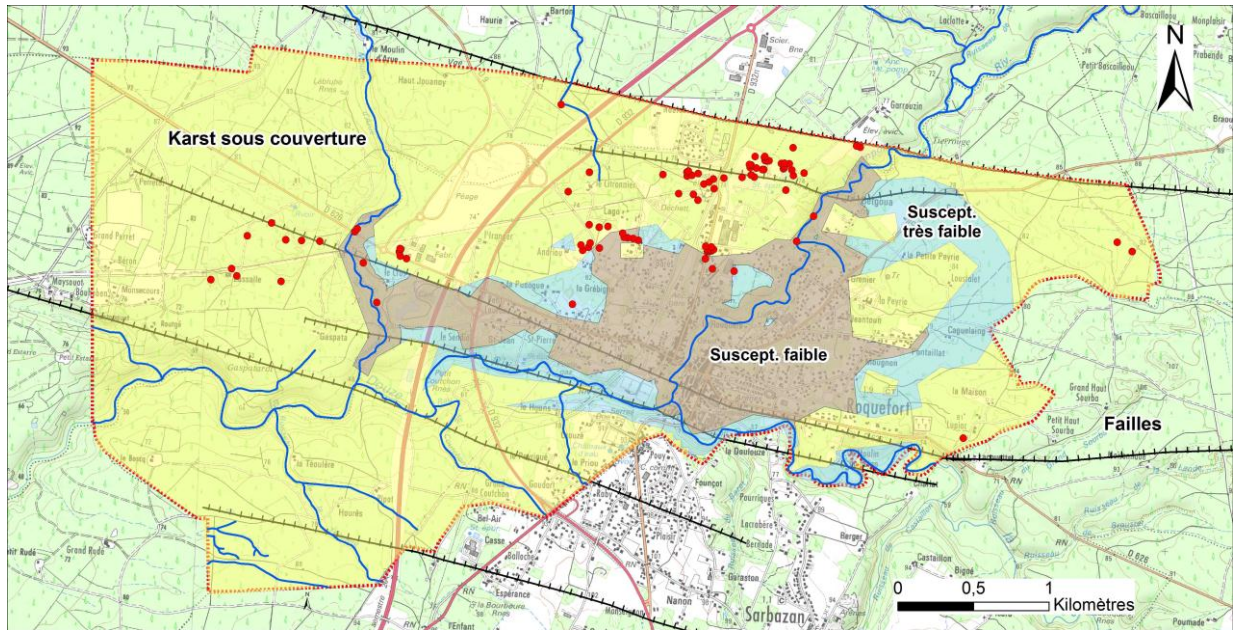


Figure 68 : Carte de la susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour les zones en karst nu : la susceptibilité passe de très faible (en bleu) à faible (en beige) pour les zones construites et/ou à proximité des cours d'eau perchés

- Karst sous couverture

Les critères à cartographier pour ce type de karst sont le contexte nappe/couverture/toit du calcaire, l'épaisseur de la couverture peu perméable, et la distance aux failles.

Contexte nappe/couverture/toit du calcaire

Une cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture a été réalisée à partir de l'esquisse piézométrique de la nappe des calcaires (Figure 61) et de la carte de l'épaisseur de recouvrement (Figure 58).

La Figure 69 montre la cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et la répartition des désordres avec une plus forte densité de désordres quand la couverture est au moins partiellement saturée puis très peu de désordres quand l'épaisseur saturée passe au-delà de 14 m.

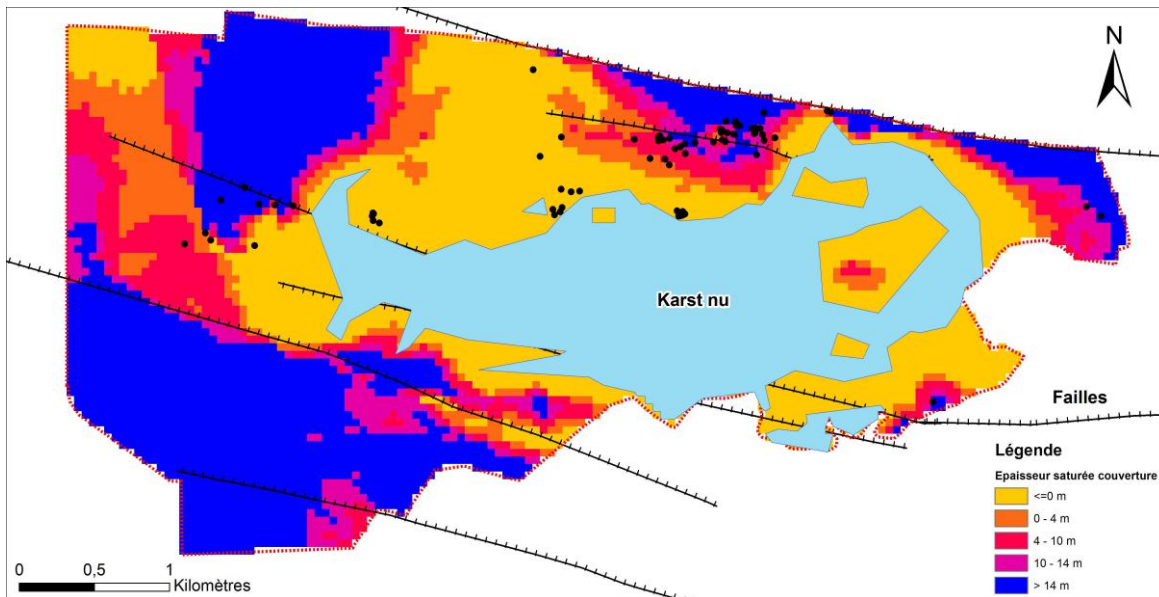


Figure 69 : Cartographie de l'épaisseur saturée de la couverture et répartition des désordres liés à la présence de karst dans le contexte de karst sous couverture (points noirs)

Epaisseur de la couverture peu perméable

Les formations peu perméables qui vont empêcher les flux d'eau et de particules vers le calcaire sont constituées par les molasses de l'Armagnac et/ou de l'Agenais (Figure 55). La cartographie de l'épaisseur de cette formation est présentée Figure 59.

La carte résultante est présentée à la Figure 70. Lorsque l'épaisseur des marnes dépasse 20 m, le nombre de désordres est significativement réduit (2 désordres inventoriés à l'Est). Pour information, au Sud-Est du secteur analysé, il semble que l'épaisseur de marnes au-delà de laquelle les désordres ne se manifestent quasiment plus est de 30 m.

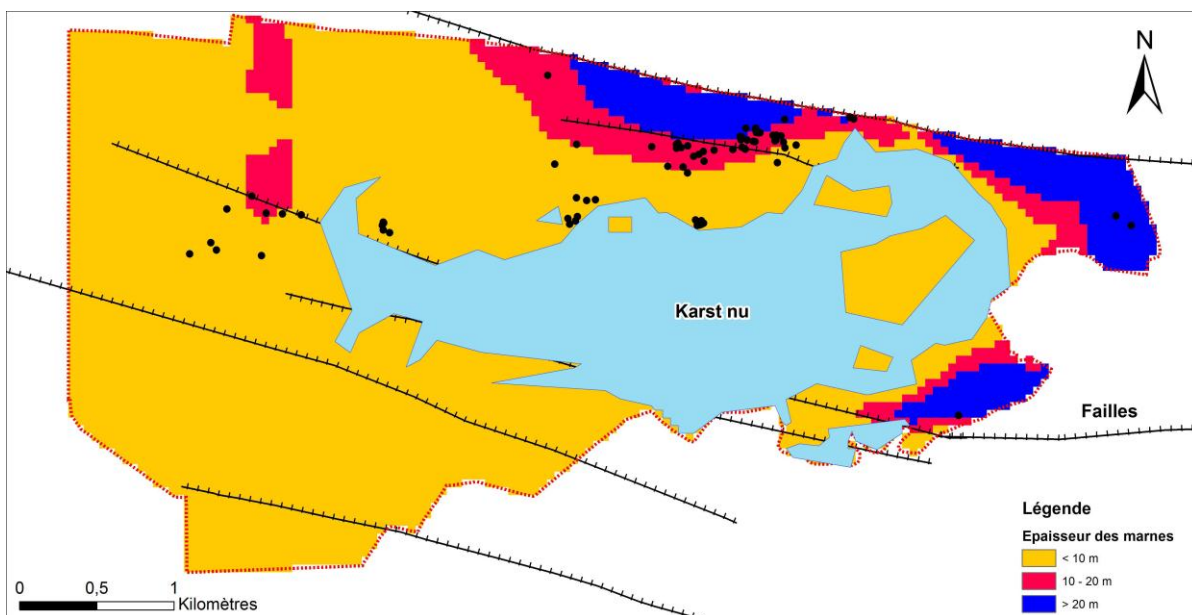


Figure 70 : Carte de l'épaisseur des marnes et de la répartition des désordres associés à la présence de karst dans le contexte de karst sous couverture (points noirs)

Distance aux failles

Les failles cartographiées sont celles de la carte géologique harmonisée à 1/50 000 et de nouvelles interprétations suite à la campagne de terrain.

La distance aux failles a été calculée sous ArcGIS par la distance euclidienne depuis chaque linéaire de faille cartographié. Trois classes de distance sont présentées à la Figure 71 : inférieur à 100 m, entre 100 et 300 m, et plus de 300 m. Les désordres sont clairement plus abondants à proximité des failles (classe de distance inférieure à 100 m).

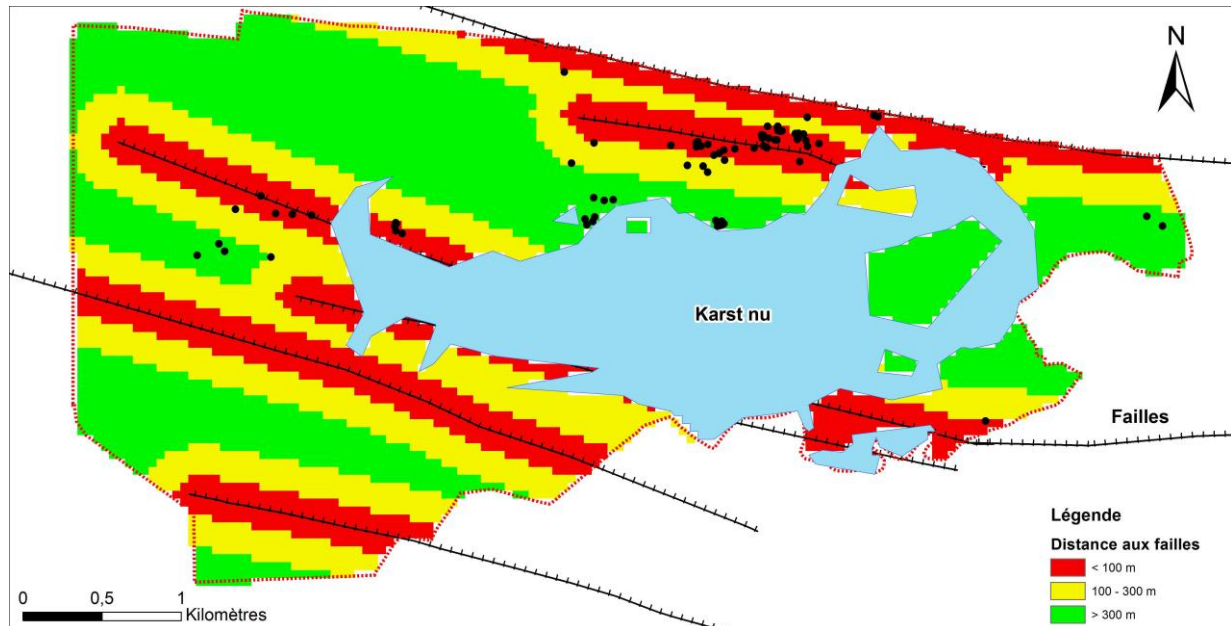


Figure 71 : Carte de la distance aux failles et répartition des désordres associés à la présence de karst pour le contexte de karst sous couverture (points noirs)

d) Evaluation des critères par la méthode du poids des évidences

L'analyse des données par la méthode du poids des évidences (cf. Annexe 2) permet de confirmer de manière objective la prépondérance de certaines classes de critères sur la distribution spatiale des désordres (Figure 72). La distance aux failles montre une susceptibilité plus forte pour des distances inférieures à 100 m du cours d'eau (contraste de 1.52). L'épaisseur de la formation peu perméable joue un rôle protecteur au-delà de 20 m d'épaisseur avec une valeur de contraste négative (-1.23). Ce rôle protecteur n'est toutefois pas bien validé statistiquement puisque la surface de la zone d'étude correspondant à cette classe d'épaisseur supérieure à 20 m est faible (8 % du secteur analysé, soit 420 pixels). Pour ce qui est du critère épaisseur de saturation de la couverture, on voit que la plus forte susceptibilité est constituée par le cas de la couverture faiblement saturée (0-14 m d'épaisseur saturée) et qu'au-delà de 14 m, la susceptibilité devient faible (nappe captive).

Critère	Classes	Nombre de désordres	Répartition des désordres [%]	Nombre de pixels zone d'étude	Répartition des classes zone d'étude [%]	Ratio	W+	W-	Contraste (C)	Variance W+	Variance W-	Ecart-type C, S(C)	C/S(C)
Distance aux failles	≤100 m	47	61.0%	1282	25.5%	2.40	0.87	-0.65	1.52	0.022	0.034	0.24	6.46
	100-300 m	11	14.3%	1727	34.3%	0.42	-0.88	0.27	-1.14	0.091	0.015	0.33	-3.49
	>300 m	19	24.7%	2028	40.3%	0.61	-0.49	0.23	-0.72	0.053	0.018	0.27	-2.71
Epaisseur Fm. peu perméable	0-10 m	33	42.9%	4029	79.9%	0.54	-0.62	1.05	-1.67	0.031	0.024	0.23	-7.16
	10-20 m	42	54.5%	593	11.8%	4.64	1.53	-0.66	2.20	0.026	0.029	0.23	9.42
	>20 m	2	2.6%	420	8.3%	0.31	-1.17	0.06	-1.23	0.502	0.014	0.72	-1.71
Epaisseur sat. de la couverture	≤0 m	25	32.5%	1660	33.0%	0.98	-0.02	0.01	-0.03	0.041	0.020	0.25	-0.10
	0-14 m	37	48.1%	1519	30.2%	1.59	0.46	-0.30	0.76	0.028	0.025	0.23	3.30
	>14 m	15	19.5%	1848	36.8%	0.53	-0.64	0.24	-0.88	0.067	0.016	0.29	-3.03

Figure 72 : Résultat de l'analyse des trois critères explicatifs pour le contexte de karst sous couverture par la théorie du poids des évidences. En rouge contraste (C) le plus fort (classe la plus susceptible), en vert contraste le plus faible (classe la plus protectrice). Si la valeur de la dernière colonne (C/S(C)) est supérieure à 1,96, la probabilité que le contraste (C) soit différent de 0 est supérieure à 99,5 %

Le test d'indépendance sur les trois critères explicatifs montre que l'état de saturation de la couverture et la distance aux failles sont deux critères indépendants (chi-carré total inférieur à 6,63) par contre il existe une corrélation entre état de saturation et épaisseur de la formation peu perméable (Figure 73). Géologiquement cette corrélation s'explique facilement : les secteurs où la couverture est peu ou pas saturée correspondent aux secteurs à faible épaisseur de couverture en général et à faible épaisseur de formation peu perméable en particulier.

		Couverture pas/peu saturée			Nappe karstique captive (Esat>14 m)			Chi-carré total
		Observé	Théorique	chi-carré	Observé	Théorique	chi-carré	
Distance failles	<=100 m	34	38	0.39	13	9	1.61	
	>100 m	28	24	0.61	2	6	2.53	
	Totaux	62	62	1.00	15	15	4.14	5.14
Epaisseur Fm. peu perméable	<=20 m	61	56	0.38	9	14	1.58	
	>20 m	1	6	3.81	6	1	15.76	
	Totaux	62	62	4.20	15	15	17.34	21.54

Figure 73 : Résultats du test d'indépendance entre le critère saturation de la couverture et les deux autres critères envisagés (distance cours d'eau et épaisseur formation peu perméable). Seul le critère distance aux failles est statistiquement indépendant du critère saturation de la couverture (valeur de chi-carré total inférieur à 6,63)

e) Carte de susceptibilité et validation

Afin d'appliquer la trame méthodologique proposée, une cartographie de la typologie de la couverture a été réalisée à partir des informations géologiques et hydrogéologiques (Figure 69, Figure 70) selon la classification proposée dans le volume 1 du rapport (cf. Figure 19). La carte résultante (Figure 74) montre quatre typologies de couverture en fonction de la position de la nappe et de la présence significative de marnes (couverture hétérogène) ou non (couverture homogène).

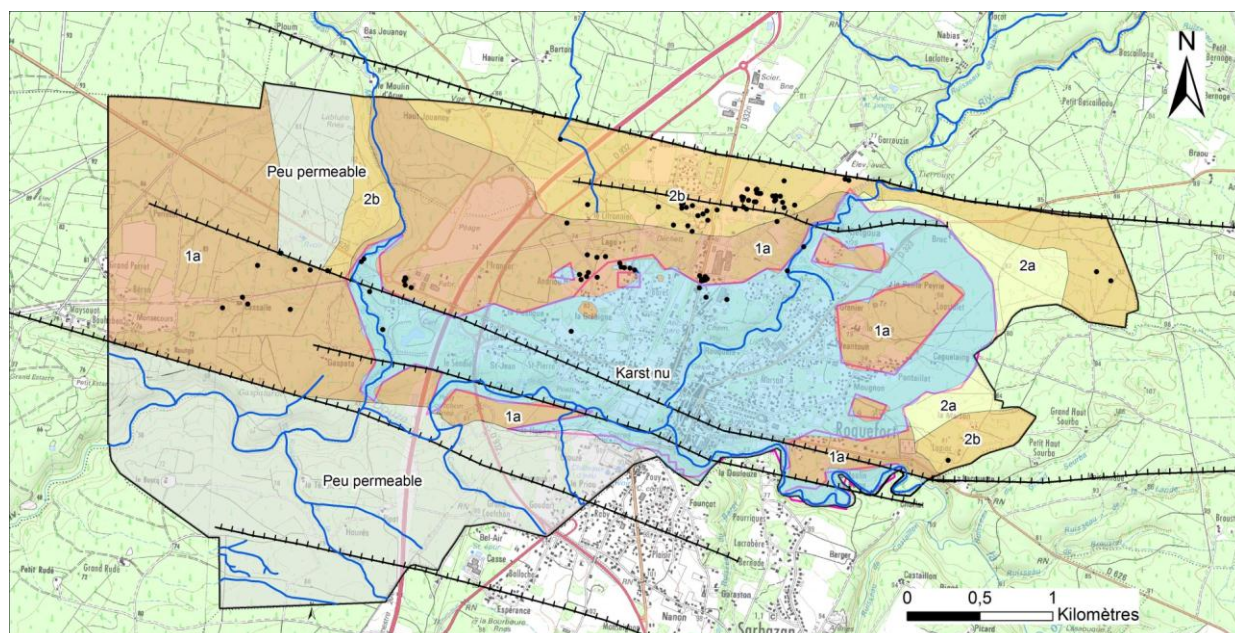


Figure 74 : Typologie de la couverture (1a : couverture homogène / nappe dans le calcaire (marron foncé), 2a : couverture hétérogène / nappe karstique libre (jaune), 2b : couverture hétérogène / nappe karstique captive (orange), couverture peu perméable (gris))

La carte de susceptibilité est ensuite réalisée (Figure 75) en combinant les critères typologie de la couverture et distance aux failles pour le karst sous couverture et la carte de susceptibilité réalisée pour le contexte de karst nu (Figure 68). Cinq classes de susceptibilité allant de très faible à fort sont ainsi délimitées.

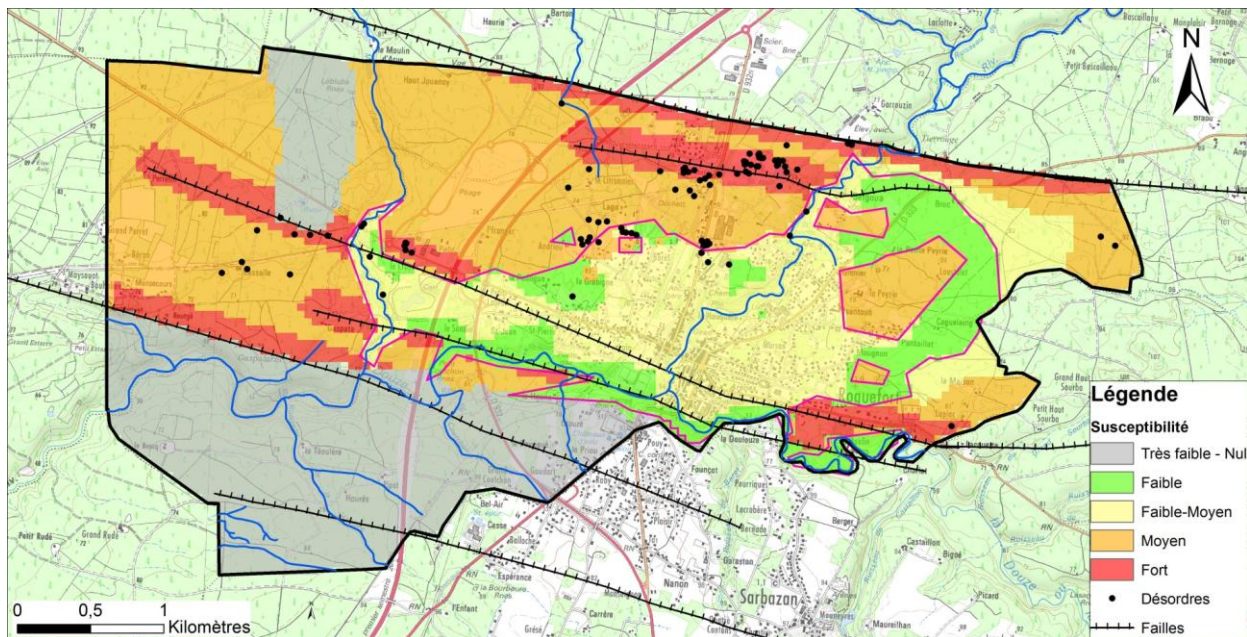


Figure 75 : Carte de susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst pour le site test de Roquefort

La carte de susceptibilité est ensuite validée par la distribution spatiale des désordres répertoriés (93 au total, représentés Figure 75) : 84 % des désordres sont situés en susceptibilité moyenne et forte.

L'intensité des effondrements sur le site test de Roquefort est difficile à caractériser car les désordres sont soit des affaissements, soit des effondrements, soit des affaissements qui ont évolués en effondrements. Les morphologies observées actuellement sont généralement héritées d'un processus évolutif plus ou moins long (par exemple un phénomène ancien de faible intensité, pourra présenter un diamètre important tandis qu'un phénomène de forte intensité, initié très récemment, présentera de faibles manifestations mais évoluera vers une intensité croissante). Une évaluation pertinente de l'intensité des désordres nécessiterait une étude plus détaillée au cas par cas afin d'évaluer leur nature et prévoir leur évolution probable.

En l'état des connaissances et comme pour le site test de Vau Vauthier, la carte de susceptibilité peut être assimilée à une carte d'aléa.

2.4.6. Conclusion

L'étude du site complémentaire de Roquefort a permis de confirmer le rôle prépondérant de la couverture sur les occurrences de désordres. Elle confirme également le rôle de l'épaisseur d'une formation peu perméable au sein de la couverture et de la position du toit de la nappe karstique. Il faut noter toutefois que les épaisseurs seuils de la formation peu perméable sont très différentes de celle observée pour le cas du Val d'Orléans (de l'ordre de 8 m) puisqu'à Roquefort cette épaisseur seuil est de 20 m. Ce résultat indique que dans la trame méthodologique finale, cette valeur seuil doit être modulable en fonction du contexte local.

2.5. FRANCHE COMTE

Cette quatrième zone d'étude se situe à cheval sur les départements du Doubs (25) et de la Haute-Saône (70) et correspond au regroupement de 27 communes. Elle s'étend des plateaux de la Haute-Saône au Nord, à la ville de Besançon au Sud et couvre une superficie de 259 km² (Figure 76).

Une telle délimitation a été choisie afin de réunir une variété de contextes géologique et karstologique (karst nu, sous couverture, karst de contact) et car des études antérieures avaient été réalisées sur une partie du territoire : Mania et al. (2001), Atlas départemental des mouvements terrain (com. pers. DDT25, 2013), PLU ville de Besançon (2013).

Sur ce site, l'approche méthodologique régionale est mise en œuvre.

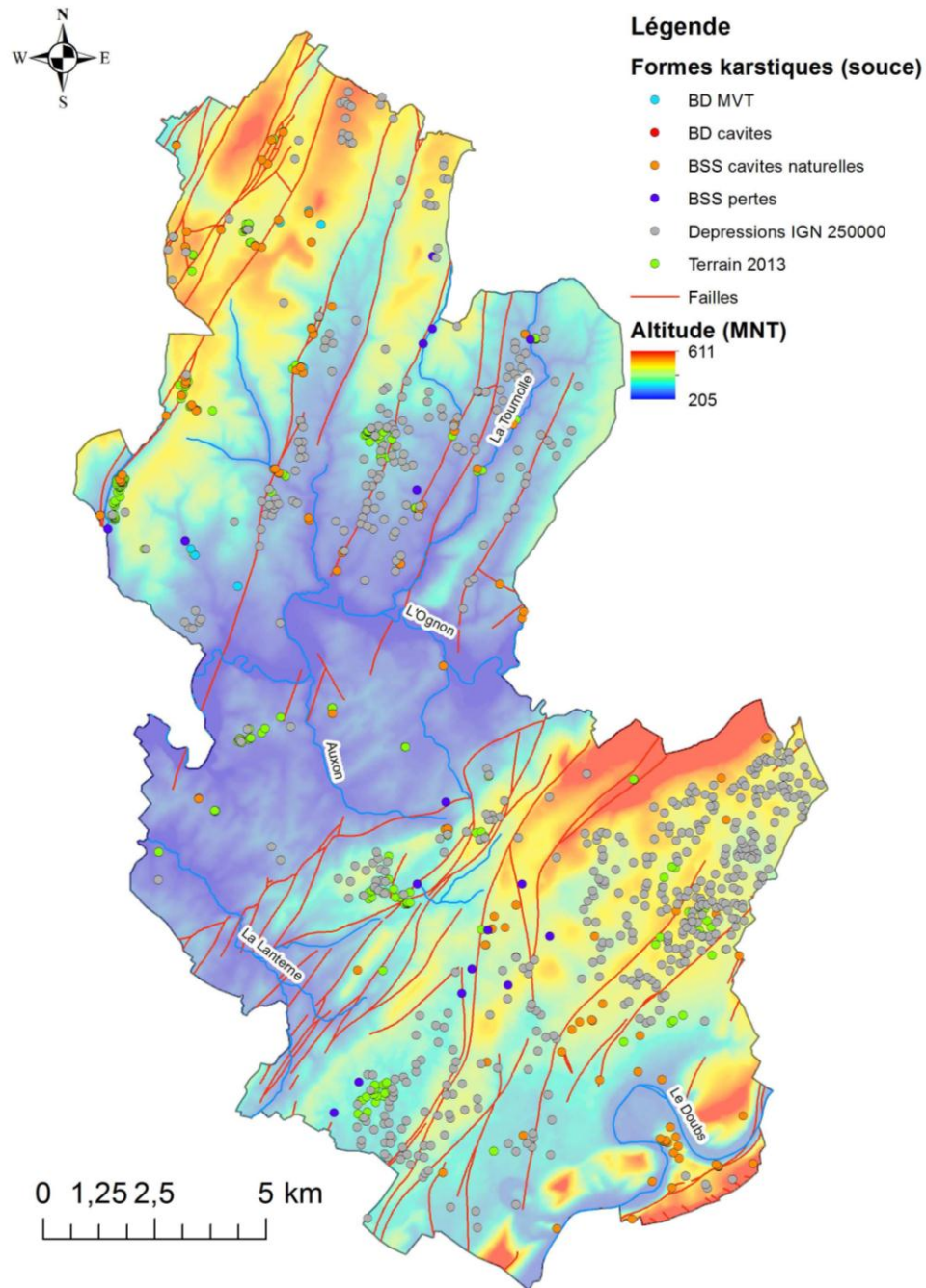


Figure 76 : Carte de la zone d'étude Franche-Comté montrant les formes karstiques répertoriées dans différentes sources d'information

2.5.1. Contexte géologique

Trois grands ensembles s'individualisent du Nord au Sud de la zone d'étude (Figure 77) :

- Les plateaux entre Saône et Ognon, caractérisés par un jeu de failles en « touches de piano » orientées NNE-SSO, qui séparent des compartiments parfois subdivisés par des failles secondaires de directions très variables.
- La vallée de l'Ognon, marquée par les synclinaux de Vitreux et de Chaucenne.
- Les Avants-Monts et le Jura externe. Les Avants-Monts sont limités au Nord par l'accident chevauchant de l'Ognon. Le faisceau comprend l'anticlinal du fort de Chailluz, dont le noyau triasique chevauche un synclinal couché de Jurassique supérieur avant d'atteindre le plateau de Besançon et le faisceau bisontin au sud de la zone.

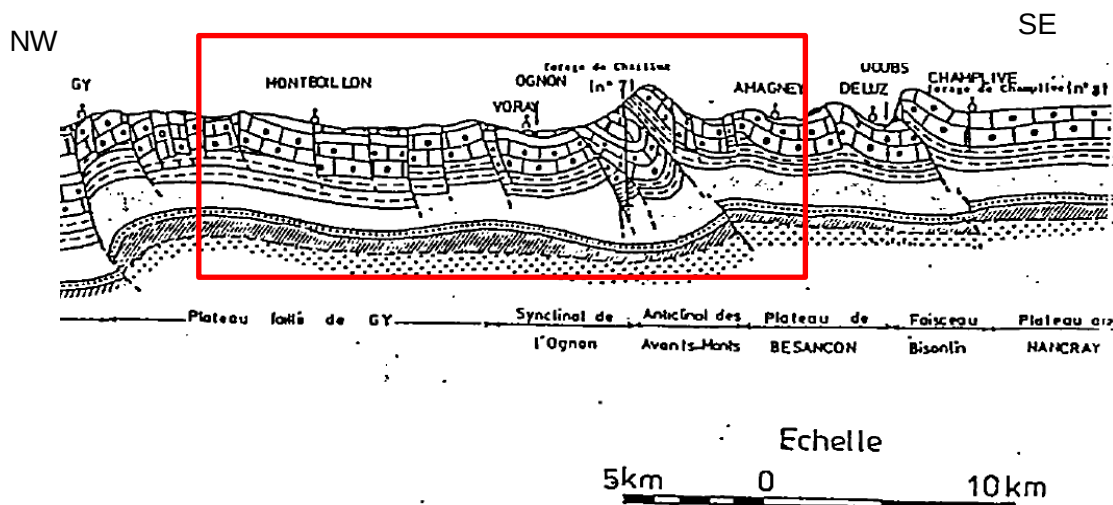


Figure 77 : Coupe géologique passant par le secteur d'étude indiqué par le rectangle rouge

Le socle ancien est constitué de terrains primaires cristallins (gneiss, micaschistes, granites), ayant subi l'orogénèse hercynienne. Au secondaire, la région est le siège d'une sédimentation marine de type épicontinentale. Les dépôts du Trias sont tout d'abord détritiques (grès du Buntsandstein), puis carbonatés (Muschelkalk) et évaporitiques (gypse du Keuper). A dominance calcaire (exemple des calcaires compacts du Bathonien de la citadelle de Besançon), le Jurassique compte un épisode marneux à l'affleurement dans notre site d'étude correspondant au Callovien supérieur et à l'Oxfordien inférieur. Il s'agit d'un faciès de marnes à *Creniceras renggeri*, à nodules calcaires et à oolithes ferrugineuses, allant jusqu'à 20 mètres d'épaisseur. Il repose sur le faciès de la « Dalle nacrée » (calcaire à oolithes et entroques, à stratifications entrecroisées et débit en dalles).

Le Crétacé est marqué par le retour de la mer dans le Jura, donnant des dépôts peu puissants, mais très fossilifères. Puis la mer se retire définitivement à la fin du Crétacé, soumettant la région à une évolution continentale, avec un creusement des vallées par l'altération météorique.

Durant le Tertiaire, une tectonique compressive se met en place, avec plusieurs phases de surrections, plissements et fracturations, résultant d'une poussée dirigée vers le Nord-Ouest, d'où une orientation des structures suivant un axe préférentiel NE-SO.

Les formations géologiques principales rencontrées dans la zone d'étude sont les suivantes (Figure 78) :

L'ensemble des marnes et calcaires du Lias et du Dogger comprend de la base au sommet :

Une dizaine de mètres de marnes et quelques bancs calcaires du Lotharingien, des marnes et un banc calcaire riche en Bélemnites du Carixien, 20 à 30 mètres de marnes grises plastiques et 10 à 15 mètres de marnes micacées sableuses renfermant des bancs de calcaires argilo-sableux du Domérien.

La formation principale des marnes du Lias (I), de 60 à 70 mètres de puissance, est composée de « schistes carton » à la base (Pliensbachien), de marnes à petits nodules rouille, de couches riches en lamellibranches et gastéropodes et de marnes micacées du Toarcien et de l'Aalénien au sommet. Une surface rubéfiée termine la série.

La formation calcaire du Bajocien inférieur (j2a) est constituée de calcaire à entroque à stratifications entrecroisées à la base, et de calcaires à Polypiers au sommet. Ce dernier comprend des formations coralligènes dans des calcaires fins et des calcaires oolithiques, des silex apparaissent sporadiquement. Le sommet est rubéfié et érodé.

Les calcaires du Bajocien supérieur (j2OM, jb) sont des calcaires oolithiques bicolores (Grande oolithe), puissants de 55 à 60 mètres, à stratification entrecroisées, se débitant en plaquettes en surface et se désagrégeant parfois en graviers fins.

Le Bathonien (j3, j3b, j3c), d'une puissance de 60 à 70 mètres est composé de calcaires compacts (Calcaire de la Citadelle). A passée oolithiques et bréchiques avec reste de polypiers dans sa partie inférieure, il est sublithographique dans sa partie moyenne, et composé de calcaires bréchiques dans sa partie supérieure. Au sommet, la surface est corrodée.

La formation des marnes du Callovien supérieur et de l'Oxfordien inférieur (j4-5O, j5abA), d'une vingtaine de mètres de puissance, regroupe les marnes à Crinoceras de l'Oxfordien, les calcaires à oolithes ferrugineuses de l'Oxfordien et du Callovien et les calcaires argileux de l'Oxfordien.

L'Oxfordien moyen-sup. (aussi appelé « Argovien ») (j5MC), est marneux à la base puis contient ensuite des marno-calcaires bien stratifiées, parfois feuilletés, dans lesquels s'intercalent des bancs de 15 à 30 cm, plus compacts, renfermant des chailles et des fossiles silicifiés. Le sommet calcaire est souvent recouvert d'argiles à chailles provenant d'une altération sur place. Ces argiles ont subi des remaniements plus importants, résultant de ruissellements ou même d'un entraînement par les cours d'eau. Elles se trouvent ainsi loin des gisements d'Argovien, soit en direction de l'Ognon, soit vers le NW, au-delà de la bordure des plateaux (Dreyfuss & Kuntz 1970).

L'unité géologique j4-5 regroupe les formations allant de la dalle nacrée callovienne (j4), les argiles à Creniceras oxfordienne (j5abA) et les calcaires marneux de l'Oxfordien moyen-sup. (j5MC).

Les alluvions du Pliocène (p-IV SS), particulièrement développées au Sud de la vallée de l'Ognon, sont constituées de sables, de cailloutis, de galets centimétriques à décimétriques de quartzite, de radiolarite avec une matrice sablo-argileuse rouge et de chailles.

Au Quaternaire, les alluvions se sont développées dans la vallée de l'Ognon (F, Fz) sous forme de graviers siliceux et sont essentiellement calcaires dans celle du Doubs. Les ruisseaux affluents de l'Ognon déposent surtout des matériaux argileux provenant des marnes du Lias.

Notation	Lithologie	Age	Superficie [%]	Formes karstiques [%]	Typologie karst
E-S	Eboulis, groise, grès consolidés	Quaternaire	0.3%	0.0%	s/c perméable
i	Argiles d'altération sur terrains variés		2.6%	3.2%	karst nu
Fz	Alluvions récentes indifférenciées, graviers, sables, argiles	Quaternaire	6.4%	0.9%	s/c perméable
F	Alluvions fluviales anciennes indifférenciées	Pléistocène	1.8%	0.8%	s/c perméable
Fy2	Alluvions calcaires anciennes: graviers, sables, argiles	Würm	0.6%	0.1%	s/c perméable
Fy1	Graviers, sables, silts, argiles (terrasse haute)	Würm	0.8%	0.0%	s/c perméable
p-IV SS	Sables et cailloutis, galets de grès parfois	Pliocène	8.1%	5.0%	s/c perméable
m6	Poudingues continentaux calcaires à chaille ou limonite	Miocène sup.	0.0%	0.0%	s/c peu perméable
g	Conglomerats à éléments calcaires	Oligocène	0.0%	0.0%	s/c peu perméable
RC	Argile résiduelle d'altération, à chailles	Cénozoïque	4.0%	3.3%	karst nu
c1	Calcaires marneux, crayeux, altérables	Cénomanien	0.1%	0.0%	karst nu
n6	Sables verts glauconieux de la vallée de l'Ognon	Albien	0.1%	0.0%	s/c peu perméable
n3	Calcaires bioclastiques glauconieux ou ferrugineux, associés à des marnes	Hauterivien	0.1%	0.0%	karst nu
j7	Calcaires à tubulures café-au-lait flammés	Tithonien	0.3%	0.0%	karst nu
j6	Calcaires massifs à débris, calcaires grés-marneux	Kiméridgien	0.8%	0.6%	karst nu
j6a-c	Calcaires glauconieux, marnes et calcaires à Pterocères / Exogyra virgula	Kiméridgien	0.4%	0.2%	karst nu
j5c-6aR	Calcaires graveleux plus ou moins crayeux, gréseux et marnes	Oxfordien sup. - Kim. inf.	0.0%	0.0%	karst nu
J6a2	Calcaires massifs à passées oolithiques, calcaires en dalles à débris marneux	Sequanien sup.	1.8%	0.5%	karst nu
j5CC	Calcaires oolithiques à Polypiers	Oxfordien sup.	8.0%	8.5%	karst nu
j5SQ	Calcaire fin, marnes, calcaires à Astartes et grès	Oxfordien sup.	4.6%	8.5%	karst nu
j5c1R	Calcaires oolithiques, calcaires récifaux	Oxfordien sup.	0.8%	0.1%	karst nu
j5MC	Ensemble calcaréo-marneux dit "Argovien"	Oxfordien sup.	11.0%	5.4%	s/c peu perméable
j5abA	Marnes bleues pyriteuses plastiques à entroques, calcaires argilo-siliceux gris	Oxfordien inf. et moy.	0.8%	0.2%	s/c peu perméable
j4-5O	Marnes à Creniceras renggeri, marnes à nodules calcaires	Callovien sup.-Oxfordien inf.	4.0%	8.2%	s/c peu perméable
j4-5	Calcaires argileux oolithiques et marnes à Creniceras renggeri	Callovo-Oxfordien	1.1%	0.1%	s/c peu perméable
j4D	Dalle nacrée	Callovien inf.	1.2%	1.8%	karst nu
j4a	Calcaires localement oolithiques, "Dalle nacrée"	Callovien inf.	1.0%	0.6%	karst nu
j3	Calcaires compacts oolithiques, marnes, calcaires à silex	Bathonien	10.1%	23.5%	karst nu
j3b	Calcaire compact	Bathonien moyen	0.0%	0.0%	karst nu
j3C	Calcaire compact, Oolite blanche	Bathonien inf.-sup.	4.1%	3.1%	karst nu
jb	Calcaires oolithiques, marnes à O. acuminata	Bajocien sup.	8.7%	13.1%	karst nu
j2OM	Calcaire oolithique, "Marnes vésuliennes" à Ostrea acuminata	Bajocien sup.	0.6%	0.0%	karst nu
j2a	Calcaires à entroques, calcaires à silex, calcaires spathiques	Bajocien inf.	8.0%	11.1%	karst nu
j	Marnes	Lias indifférencié	4.1%	1.1%	s/c peu perméable
j3	Calcaires argileux, marnes, oolites ferrugineuses, calcaires	Pleinsbachien	1.2%	0.0%	karst nu
j1-2	Calcaires à Gryphées, marnes, calcaires argileux	Hettangien-Sinemurien	0.6%	0.1%	karst nu
lt	Marnes et calcaires	Lias et Trias indiff.	1.1%	0.1%	non karstique
t7	Argiles brun-rouge, argilites et grès grossiers, schistes noirs, bone-beds	Rhétien	0.4%	0.0%	non karstique
t6-7	Argiles et marnes bariolées dolomitiques, Argiles	Keuper sup.	0.2%	0.0%	non karstique

Figure 78 : Colonne stratigraphique pour le site d'étude Franche-Comté. Les formations non karstifiées sont en blancs, les formations calcaires karstifiées sont en bleu et les formations constituant la couverture du karst sont en vert (couverture peu perméable) et en jaune (couverture perméable). (s/c = sous couverture)

2.5.2. Contexte hydrogéologique

La zone d'étude comprend trois domaines hydrogéologiques : le plateau de Besançon et le flanc sud-est de l'anticlinal des Avants-Monts, le flanc nord-ouest de l'anticlinal jusqu'à la vallée de l'Ognon, et les plateaux de Haute-Saône (Figure 77). L'aquifère karstique dans le secteur de Besançon se caractérise par une zone non-saturée épaisse (> 50 m) et des émergences situées au niveau du Doubs. Plusieurs essais de traçage ont permis de définir les bassins d'alimentation des différentes émergences (Tinette 1981, PLU-Besançon 2013).

Le secteur entre le faite de l'anticlinal des Grands-Monts et l'Ognon se caractérise par la présence de nombreuses pertes de ruisseaux et de sources karstiques indiquant l'existence de plusieurs petits systèmes karstiques compartimentés par les failles et la nature réservoir (calcaires) ou imperméable (marnes) de la lithologie. Les sources alimentent plusieurs cours d'eau qui sont autant d'affluents de l'Ognon : la Lanterne, le ruisseau d'Auxon, le ruisseau de la Voie (Figure 76).

Le secteur des plateaux de Haute-Saône comprend plusieurs aquifères karstiques compartimentés par des failles et qui alimentent plusieurs émergences situées sur des failles (Nicod2010). Ces émergences donnent naissance à des cours d'eau qui peuvent alimenter à nouveau des pertes vers l'aval (successions lithologiques calcaires-marnes-calcaires d'amont en aval causées par les grandes failles subméridiennes). In fine les eaux alimentent l'Ognon par plusieurs ruisseaux dont le plus important est la Tournolle (Figure 76).

Les contextes géologique et hydrologique des deux derniers secteurs (deux rives de l'Ognon) sont favorables à la présence de karsts de contact.

2.5.3. Inventaire des formes karstiques et désordres d'origine karstique

Lors du travail de terrain, 236 formes karstiques ont été inventoriées. Il s'agit de 219 dolines fermées (92 % de l'échantillon), 4 dolines-perte, 5 dolines-trou, 3 mardelles et 5 fontis liés à des effondrements récents.

Pour compléter la base de données, d'autres sources d'informations ont été utilisées : la BSS (cavités naturelles, pertes), la BD cavités, la BD mouvements de terrain (BD-mvt), et les dépressions dessinées sur la carte IGN à 1/25 000.

La Figure 79 donne le nombre de points pour ces différentes sources d'informations :

Source	Formes karstiques	Dont désordres
Terrain 2013	236	100
IGN 1/25 000	582	
BSS cavités naturelles	111	
BSS pertes	18	18
BD cavités	41	
BD MVT	7	7
TOTAUX	1005	125

Figure 79 : Inventaire des formes karstiques sur le site Franche-Comté

Les désordres ont été classés en différents types de morphologie (Figure 80) : les dolines fermées (77 objets), les dolines trou (5), les dolines pertes (4), les pertes (27) et les fontis (12).

Les dolines fermées correspondent essentiellement à des dolines de soutirage dans un contexte de karst sous couverture, les dolines trou, les dolines pertes et les pertes sont situées dans un contexte de karst de contact et les fontis ont été observés en contexte de karst sous couverture meuble et de karst de contact. Par contre les dolines de dissolution ne sont pas considérées comme des désordres (cf. Volume 1 du rapport).

Les dimensions des désordres (diamètre en surface et profondeur) ne sont connues que pour ceux observés lors de la campagne de terrain 2013 (Figure 81). Il apparaît que les dolines fermées sont les désordres qui peuvent atteindre les plus grandes dimensions (jusqu'à 150 m de diamètre dans un cas, mais généralement entre 5 et 30 m), puis les dolines pertes et dolines trous ont des tailles plus réduites (5-15 m de diamètre) alors que les fontis ont des dimensions métriques. Ces résultats préliminaires sur l'intensité des désordres sont toutefois basés sur trop peu d'objets pour être représentatifs.



Figure 80 : Illustrations des différents types de désordres observés en Franche-Comté :
a) *doline fermée de grandes dimensions, Montboillon, Haute-Saône à gauche et doline fermée à*
soutirage très actif en bordure d'une route départementale, Dép. du Doubs à droite
b) *doline perte en Haute-Saône*
c) *fontis récent dans un champ (Chaucenne, Doubs) à gauche et fontis en bordure de la chaussée sur*
la commune de Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) à droite

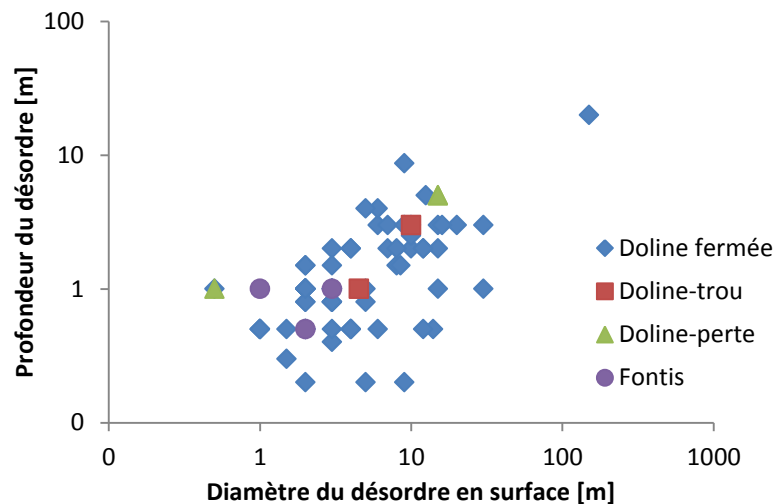


Figure 81 : Dimensions des désordres observés en Franche-Comté lors de la campagne de terrain 2013

2.5.4. Analyse de la distribution des désordres et typologie du karst

Les observations de terrain et l'analyse de documents bibliographiques montrent le contrôle de la typologie du karst sur la distribution des désordres. A titre d'exemple la Figure 82 montre la présence de désordres (pertes et fontis) au niveau de karsts de contact de nature lithostratigraphique dans le cas de Pirey (25) et de nature tectonique dans le cas de Bonnevent-Veloreille (70).

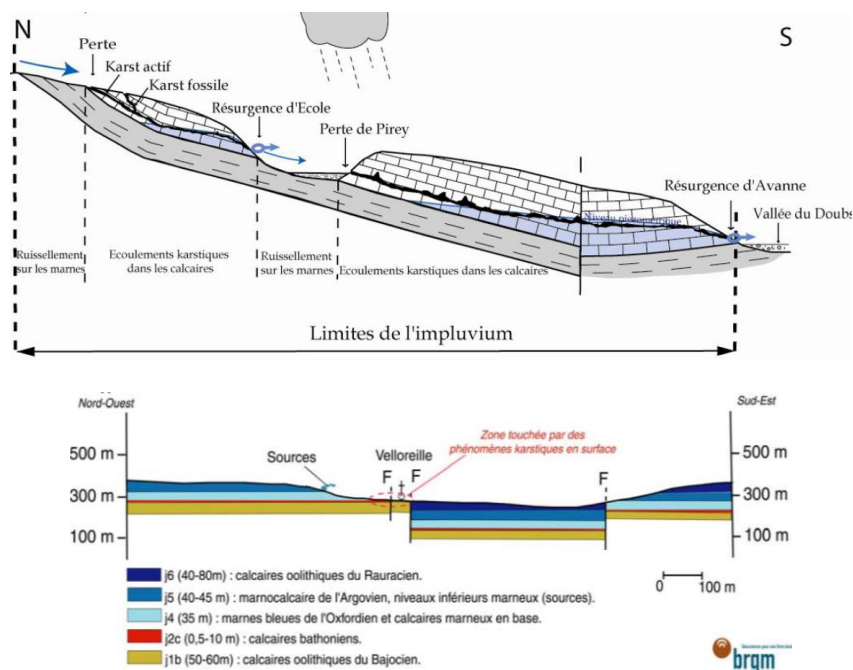


Figure 82 : Deux exemples de présence de désordres en contexte de karst de contact : en haut pertes au contact marnes du Lias – calcaires du Jurassique moyen (extrait du PLU ville de Besançon) ; en bas fontis au contact tectonique marnes de l'Oxfordien – calcaires du Jurassique moyen (extrait de Bayle 2008)

La Figure 83 illustre le développement de désordres (dolines actives) en contexte de karst développé dans la dalle nacrée du Callovien (j4D) sous couverture argileuse de l'Oxfordien (j4-50).

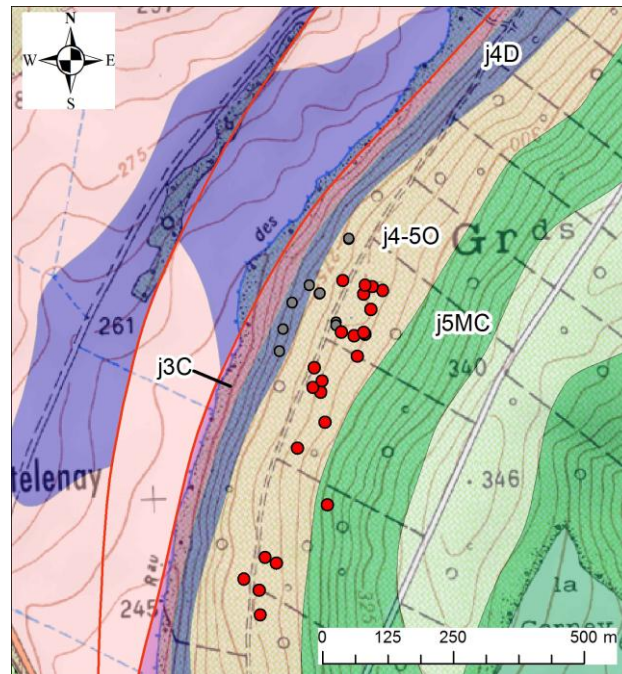


Figure 83 : Exemple de désordres (points rouges) dans un contexte de karst de contact (j3C : calcaires compacts du Bathonien, j4D : Dalle nacrée du Callovien) au contact avec une couverture argileuse (j4-50 : marnes du Callovien sup.-Oxfordien inf.) en amont. Site à proximité du village de Gézier (70). Les points gris indiquent les dolines colmatées (essentiellement en karst nu)

L'importance de la typologie du karst sur la distribution des désordres actifs a été évaluée en procédant à la traduction de la carte géologique à 1/50 000 (Figure 84) en une carte de la typologie des karsts (Figure 85) par regroupement des lithologies en 5 classes (Figure 78) :

- Karst nu (calcaires et calcaires sous argiles d'altération).
- Karst sous couverture perméable (alluvions).
- Karst sous couverture peu perméable (Marnes et argiles du Callovien sup.-Oxfordien inf. marnes de l'Oxfordien supérieur ou « marnes de l'Argovien »).
- Karst de contact.
- Zones non karstiques.

Le karst nu correspond à toutes les formations cartographiées comme calcaire et également les calcaires sous résidus d'altération (argiles d'altération). Cette typologie s'illustre par l'abondance de formes karstiques (78 % de toutes les formes karstiques recensées, Figure 78).

Le karst sous couverture perméable correspond essentiellement aux formations calcaires recouvertes d'alluvions dans les vallées de l'Ognon et du Doubs ; le karst sous couverture peu perméable correspond aux affleurements des marnes du Lias et du Jurassique moyen à supérieur (Callovien-Oxfordien).

Le karst de contact a été délimité en utilisant la méthodologie décrite en Annexe 3 du volume 1 du présent rapport. Finalement les formations non karstifiées sont celles de la base de la pile sédimentaire (Trias et Lias).

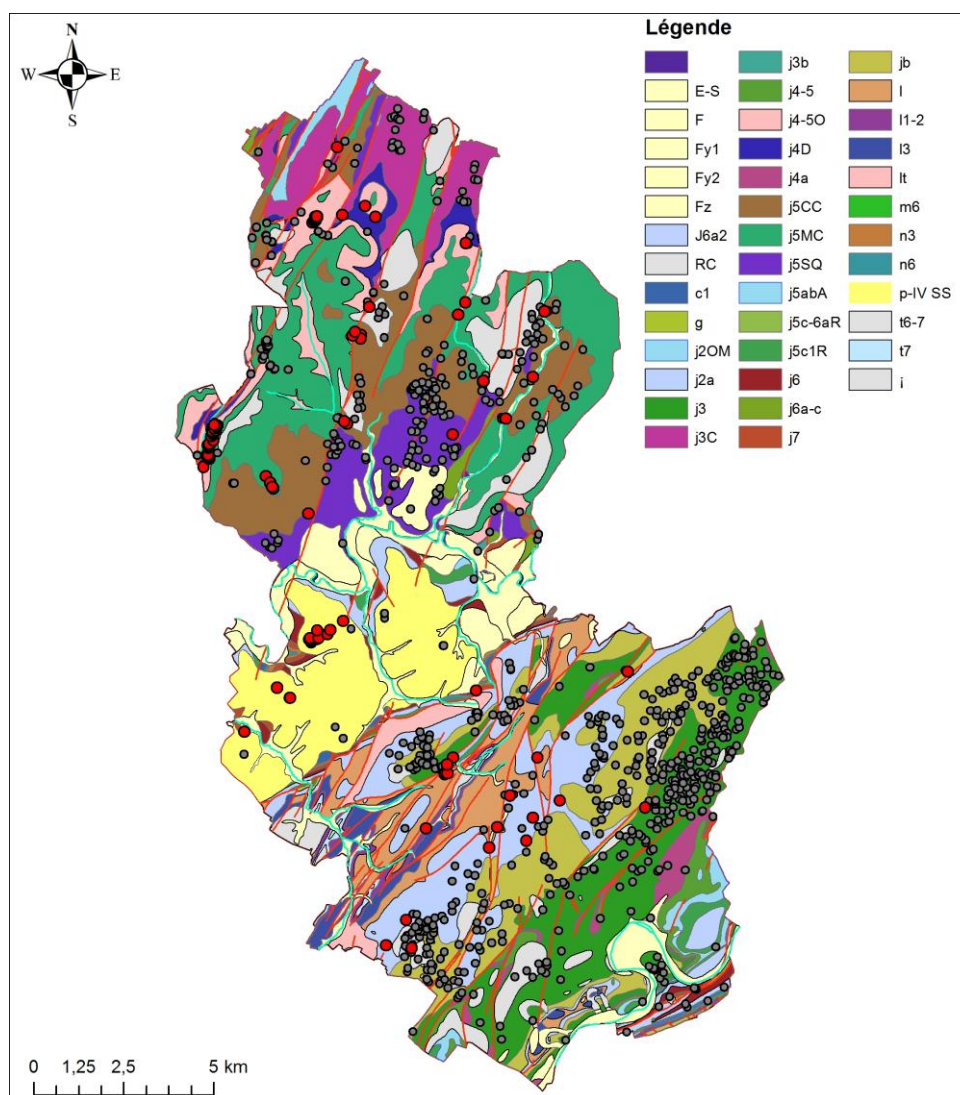


Figure 84 : Carte géologique à 1/50 000 de la zone d'étude (cf. Figure 78 pour notice de la légende) et report des formes karstiques (points gris) et désordres actifs liés à la présence de karst (points rouges). Les traits rouges représentent les failles principales

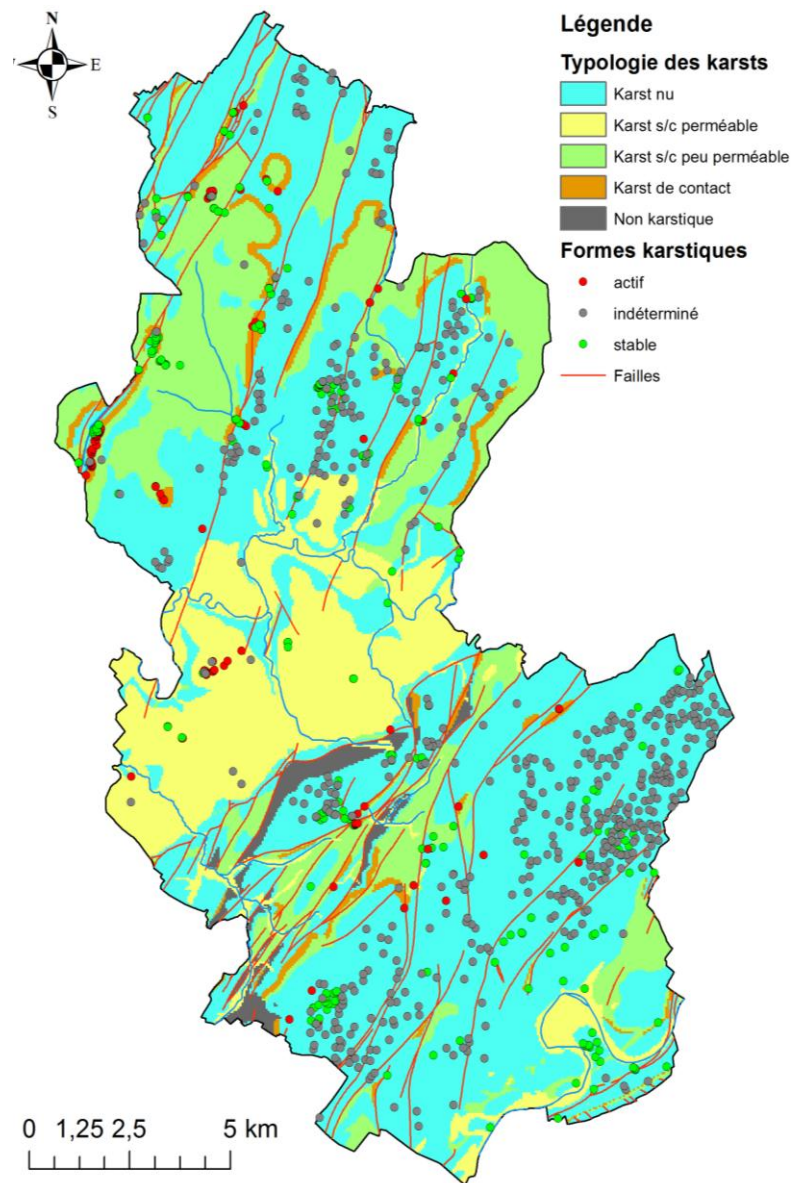


Figure 85 : Carte des typologies de karst de la zone d'étude établie suite à une reclassification des différentes formations géologiques cartographiées (Figure 78) et une cartographie du karst de contact

	Nbre de pixels (50x50 m)	Surface [%]	Désordres	Désordres [%]
Karst nu	60752	58.7%	15	12.0%
Karst sous couverture perméable	18600	18.0%	36	28.8%
Karst sous couverture peu perméable	19185	18.6%	5	4.0%
Karst de contact	3220	3.1%	69	55.2%
Non karstique	1653	1.6%	0	0.0%

Figure 86 : Comptage pour chaque typologie de karst du nombre de pixels (surface respective de chaque typologie) et de désordres. Les désordres sont observés essentiellement dans le contexte de karst de contact et karst sous couverture perméable (alluvions)

2.5.5. Carte de susceptibilité et validation

La carte de susceptibilité à l'effondrement lié à la présence de karst est construite en croisant le critère principal, la typologie du karst (karst nu et karst sous couverture peu perméable = susceptibilité très faible, karst sous couverture perméable = susceptibilité moyenne, karst de contact = susceptibilité forte), avec deux critères aggravants appliqués sur les contextes de karst nu et de karst sous couverture peu perméable uniquement (la susceptibilité passant de très faible à faible) : proximité de cours d'eau perchés (susceptibilité faible à moins de 50 m des cours d'eau) et occupation du sol anthropisée (susceptibilité faible, données CORINE Landcover). Pour ces deux cas, la présence d'eau en surface, naturelle ou induite par l'activité humaine, peut contribuer au soutirage de particules solides vers le karst et résulter en une déstabilisation des terrains.

En outre le karst sous couverture perméable de la vallée du Doubs est considéré comme très peu susceptible à l'effondrement car il constitue le niveau de base régional de l'aquifère karstique impliquant des flux d'eau et de matière solide du karst vers la surface, contexte défavorable à l'effondrement (karst de vallées).

Sur la base de ces considérations, la carte de susceptibilité est constituée de quatre classes, en dehors des zones non karstiques où la susceptibilité est évidemment nulle : très faible, faible, moyen, fort (Figure 87).

Une validation de la carte est réalisée en utilisant un jeu de désordres indépendants (non utilisés pour l'élaboration de la carte). Ces informations sont issues d'une enquête auprès des mairies (24 désordres), un travail de terrain (20 désordres), des archives du CG25 (3 désordres) et de l'inventaire spéléologique du Doubs (tome 5 publié fin 2012, 3 désordres), soit un total de 50 désordres.

Le calcul de la courbe de ROC (Figure 88) illustre la robustesse de la carte de susceptibilité avec une aire sous la courbe de 0.84 (84% de la localisation des désordres bien prédit par la carte).

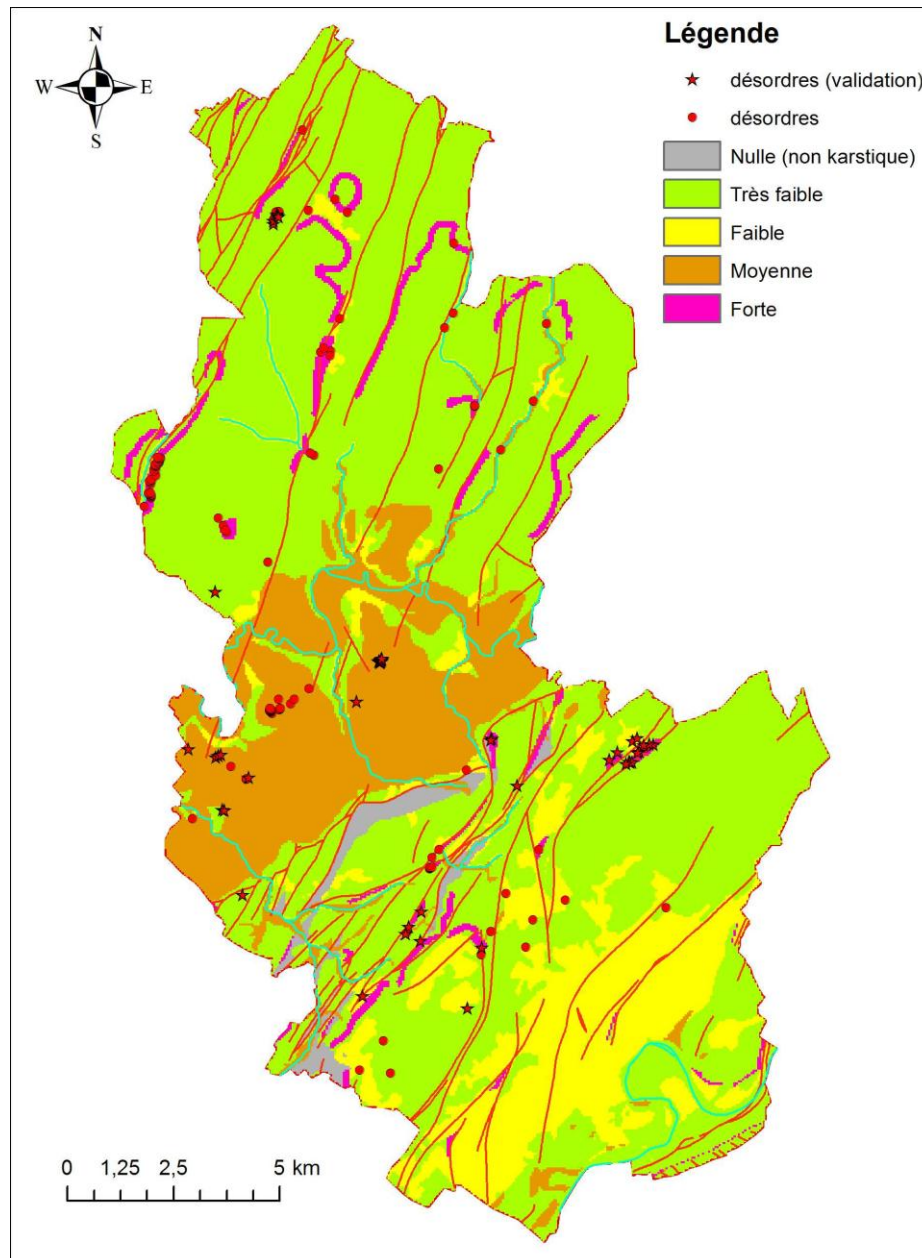


Figure 87 : Carte de susceptibilité à l'effondrement liée à la présence de karst pour le site test de Franche-Comté (approche régionale). Les désordres utilisés pour l'analyse des critères et l'élaboration de la carte sont indiqués par les ronds rouges et les désordres utilisés pour la validation de la carte sont représentés par les étoiles rouges

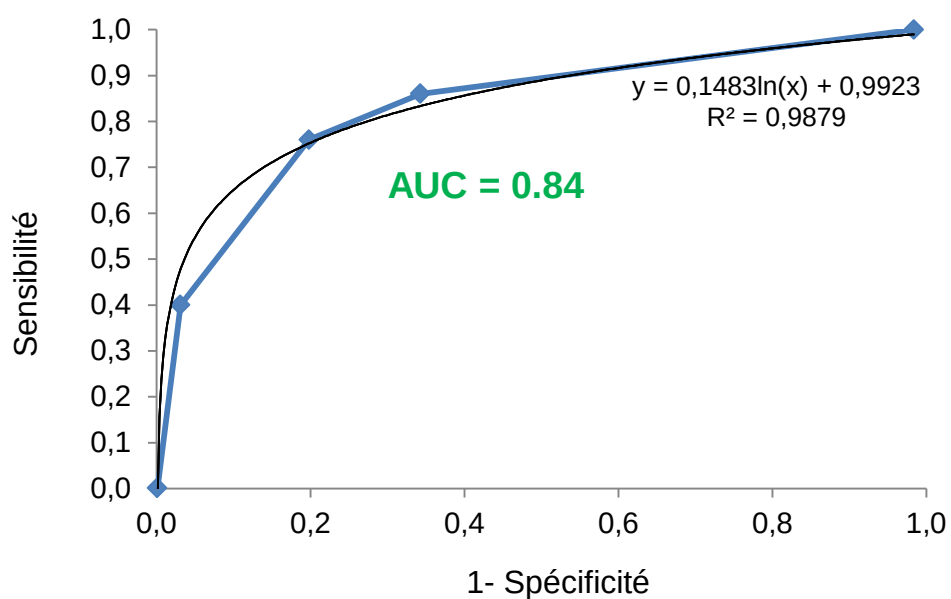


Figure 88 : Courbe de ROC permettant de tester la robustesse de la cartographie de la susceptibilité du site test Franche-Comté. L'aire sous la courbe (AUC=0.84) indique que 84 % des 50 désordres utilisés pour la validation sont bien prédits

3. Conclusions et Perspectives

Les études de sites ont permis de confirmer la prépondérance de la typologie du karst sur la distribution et la fréquence des désordres observés avec la grande majorité des désordres en domaine de karst de contact et de karst sous couverture et très peu de désordres en contexte de karst nu (même si les formes karstiques sont particulièrement bien exprimées).

Trois sites d'étude (val d'Orléans, Vau-Vauthier, Roquefort) ont permis de développer l'approche locale de cartographie de la susceptibilité et pour le site du val d'Orléans une étape de validation a pu être réalisée en utilisant un inventaire indépendant de désordres. Un quatrième site (Franche-Comté) a permis de tester et valider l'approche régionale proposée dans la méthodologie.

Pour le site du val d'Orléans, la susceptibilité de présence est déterminée par le croisement des critères typologie de la couverture (position de la nappe, présence de niveaux peu perméables), distance aux cours d'eau et zone anthropisée (critère uniquement pour le karst nu). Le modèle de susceptibilité final prédit correctement 75 % des désordres (aire sous la courbe ROC = 0.75, procédure de validation). Un modèle d'intensité de l'aléa basé sur l'épaisseur de la couverture et une formule empirique reliant épaisseur et diamètre d'effondrement permet de proposer une cartographie de l'aléa par croisement des modèles de susceptibilité de présence et d'intensité.

Pour le site de Vau-Vauthier (Lorraine), une cartographie de la susceptibilité d'effondrement est réalisée en considérant le critère distance aux failles comme facteur aggravant pour les contextes de karst nu et de karst sous couverture peu perméable et le critère pente pour le contexte de karst de contact.

Pour le site de Roquefort (Landes), les critères distance au cours d'eau, typologie de la couverture et distance aux failles (contexte de karst sous couverture) et zones anthropisées (contexte de karst nu) permettent de proposer une carte de susceptibilité à l'effondrement (84% des désordres se situent en susceptibilité forte ou moyenne).

Pour le site de Franche-Comté, l'approche méthodologique régionale est mise en œuvre avec une cartographie des typologies de karst puis la prise en compte des facteurs aggravants distance aux cours d'eau perchés et aux failles pour les contextes de karst nu et karst sous couverture peu perméable. Le modèle de susceptibilité à l'effondrement final permet de prédire correctement 84 % des désordres répertoriés (aire sous la courbe ROC = 0.84, procédure de validation).

L'application de la trame méthodologique sur quatre sites montre la pertinence des critères explicatifs retenus pour des contextes géologiques et hydrogéologiques variés. Une différence notoire est l'épaisseur seuil de couverture peu perméable au-delà de laquelle la susceptibilité devient faible. Cette épaisseur est de l'ordre de 8 m pour le site du Val d'Orléans et de 20 m pour le site de Roquefort.

Ce constat montre l'intérêt de la trame méthodologique proposée dans le volume 1 du présent rapport qui ne nécessite pas d'inventaire représentatif des désordres pour sa mise en œuvre : les critères explicatifs sont croisés pour aboutir à une carte de susceptibilité/aléa puis la carte est vérifiée à posteriori en la comparant avec la localisation de désordres connus. Pour cette étape de vérification, il convient de souligner l'intérêt de techniques de télémétrie telles que le Lidar pour optimiser une mission de terrain visant à décrire formes karstiques stables et désordres.

Cette trame méthodologique nécessite d'être testée sur des sites additionnels et pourra être adaptée au contexte de la craie particulièrement sensibles aux effondrements liés au karst. Sur cette base la rédaction d'un guide méthodologique pour la cartographie de l'aléa effondrement en contexte karstique carbonaté (calcaire et craie) pourra être envisagée. Un tel guide pourra trouver des applications dans le cadre de l'élaboration de PPRN ou de documents de gestion à des échelles administratives plus régionales (p.ex., cartographie départementale).

4. Références bibliographiques

- ANTEA 2001. Commune de Roquefort (40) : mise à jour des connaissances sur les effondrements d'origine karstique. Rapport A24910/A
- Aubié S., Platel JP., Clément F., Gardet S. 2010. Effondrements de terrain survenu le 18 juin 2010 sur la commune de Saint-Maixant en Gironde. Rapport BRGM/RP-58705-FR. 25 p
- Bayle E. 2008. Bonnevent-Veloreille (70) : Avis géologique sur des phénomènes karstiques – BRGM/RP-56955-FR. Avis du BRGM, rapport final : 24 p.
- Beck, B. F. and Sayed, S. 1991, The Sinkhole Hazard in Pinellas County: A Geologic Summary for Planning Purposes. Florida Sinkhole Research Institute. Report, no. 90-91-1 : 140 p.
- Blanchard Raoul. 1903. Le Val d'Orléans. In: Annales de Géographie.t. 12, n°64: 307-323.
- Bonham-Carter G. 1994. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. New York, Pergamon.
- Bonham-Carter G., Agterberg F., Wright D. 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. In Atgerberg & Bonham-Carter (Eds.), Statistical applications in the Earth Sciences: Geol. Surv. of Canada, Paper 89-9: 171-183.
- Castanet. C., Garcin. M., Burnouf. J., Carcaud. N. 2003. Le Val d'Orléans : dynamique fluviale tardiglaciaire et holocène, interaction entre facteurs géodynamiques et anthropiques. Rapport BRGM/RP-52552-FR.
- Cartannaz C., Dolliou V. 2011. Notice explicative de la carte des curiosités géologiques de la Lorraine, BRGM RP/57546-FR : 106 p.
- Cervi, F., Berti, M., Borgatti, L., Ronchetti, F., Manenti, F., & Corsini, A. 2010. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping; a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia province, Italy). Landslides, 7(4), 433-444.
- Chatelain S., Chery JL., Livrozet E. 1981. Le système aquifère karstique du Val d'Orléans. III. Apport d'un double traçage dans l'étude du système Loire-Loiret. Comm. 26^{ème} Coll. Nat. Limnologie, Orléans, juin 1981.
- Chery J.L. 1983. Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (La Loire): Le système des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans. Thèse Université d'Orléans.
- Colleau A., Mathon C., Mirgon C. 2005. Commune de Jargeau (45) : Aléa mouvements de terrain associé à la présence de cavités souterraines – enquête détaillée et cartographie préliminaire. Rapport BRGM RP-53876-FR : 89 p.
- Desprez N. 1967. Etude hydrogéologique du calcaire de Beauce : inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans. Rapport BRGM DSGR 67 A86.
- Desprez N. 1976. Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret) : étude hydrogéologique. Rapport BRGM 76 SGN 109 BDP.
- Desprez N., Martins C. 1977. Aménagement du Val d'Orléans : étude hydrogéologique. Rapport BRGM 77 SGN 582 BDP.
- Donsimoni M., Berthier H., Martin J-C., Nachbaur A. 2008. Détermination de la présence de karsts sous les levées domaniales de la Loire et réduction du risque d'effondrement de la digue

lié à la présence de ces conduits souterrains naturels. Rapport final BRGM RP-55711-FR : 179 p.+annexes.

Dreyfuss M., Kuntz G. 1970. Carte géologique de GY au 1/50 000, BRGM.

Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology* 111: 62–72.

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-F : 167 p. + annexes.

Gigout M. 1972. L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. In : géologie – hydrogéologie applications en construction routière et génie civil. Compte-rendu des journées d'études des 8 et 9 juin 1972 à Blois organisées par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire régional de Blois. P54-59.

Gigout M. 1974. Carte géologique de la France, carte à 1/50 000, feuille de Beaugency.

Giot D., Garcin M. 2002. Le Val de Loire du Miocène à l'Actuel (de Châtillon-sur-Loire à Blois). In : Paysages ligériens

Giot D., Lepretre J.P., Nedellec J.L., Bouchut J., Trouillard C., Imbault M. 2003. Cartographie de l'aléa global relatif à la présence de cavités souterraines et de désordres de surface concernant le département du Loiret. Rapport BRGM/RP-52491-FR

Garnier C., Gutierrez T. 2012. Avis et recommandations suite à des effondrements survenus au niveau de l'avenue Gaston Lescouzères à Roquefort (Landes) le 06 juillet 2012. Rapport BRGM/RP-61332-FR. 26 p., 19 fig.

Gutierrez T. 2012. Avis et recommandations sur des effondrements survenus sur le site de la Société SOCODAC à Roquefort (40), Rapport BRGM/RP-61233-FR. 34 p., 24 fig., 3ann.

Jaillet S. 2000. Un karst couvert de Bas-plateau: Le Barrois; Structure, fonctionnement; évolution. Thèse Laboratoire de géographie physique et appliquée, Université Montaigne Bordeaux 3.

Jaillet S. 2005. Le Barrois et son karst couvert. *Karstologia mémoires* n°12 : 335 p.

Jozja N. et al. 2010. Apport des traçages à la connaissance du système karstique du Val d'Orléans. Historique et nouvelles avancées. *Géologies* 167 : 70-74.

Lepiller M., 2006 : Val d'Orléans. In : *Aquifères et eaux souterraines en France*, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Éditions, 200-214.

Lorrain J.M. (1972). La géologie du calcaire de Beauce. In : géologie – hydrogéologie applications en construction routière et génie civil. Compte-rendu des journées d'études des 8 et 9 juin 1972 à Blois organisées par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire régional de Blois. P14-53.

Macaire 1981. Contribution à l'étude géologique et paléopédologique du Quaternaire dans le sud-ouest du bassin de Paris (Touraine et ses abords). Thèse Université de Tours.

Maget P., Pointet T., 2006 : Beauce. In : *Aquifères et eaux souterraines en France*, tome 1, J.-C. Roux (éd.), BRGM Editions, 191-199.

Mania J., et al. 2001. Investigations et cartographie des aléas karstiques dans une zone tectonisée complexe des avants-monts du Jura nord-occidental (France). *Geologica Belgica* 4/3-4 : 263-274.

Martin J.C., Giot D., Le Nindre Y.M. 1999. Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce. Rapport BRGM R-40571

Nicod J. 2010. Les plateaux de Haute-Saône : transition entre Bassin Parisien et Jura. In Audra P. (Dir.) : Grottes et karsts de France. Association française de karstologie. Karstologia Mémoires 19: 182-183.

Oh H-J., Lee S. 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weight-of-evidence model. *Engineering Geology* 115: 36-48.

Perrin J., Noury G., Cartannaz C., Van Laere A. 2013, ALEA-Karst : vers une approche multicritères de l'aléa lié à la présence de cavités karstiques. Année 1 : bibliographie et étude de sites - Rapport BRGM/RP-62595-FR

Roques et Pasquet 1991. Mairie de Jargeau : analyses géotechniques de maisons fissurées. Rapport BRGM R 33064 CEN 4S/91

Sartain, N., Mian, J., O'Riordan, N., Storry, R. 2011. Case study on the assessment of sinkhole risk for the development of infrastructure over karstic ground.

Tharp, T.M., 1999. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology* 52, 23–33.

Tharp, T.M., 2002. Poroelastic analysis of cover-collapse sinkhole formation by piezometric surface drawdown. *Environmental Geology* 42, 447–456.

Thierry P., Baltassat J-M. 2010. Effondrement à St Pryvé St Mesmin le 22 mai 2010. Avis du BRGM. Rapport BRGM RP 58649-FR.

Tinette R. 1981. Etude des cheminements d'eau souterraine par traceurs: mise en évidence de liaisons autoroute-captages à Besançon: *Bull. LPLC* 113 : 45-52.

Tissoux H., Prognon F., Voinchet P., Lacquement F., Tourlière B., Bahain J-J. 2013. Apport des datations ESR à la connaissance des dépôts sableux Plio-pléistocènes en Sologne, premiers résultats. *Quaternaire*, 24, (2), 141-153

Trautman F. 1974. Les Formations du groupe Beauce (Aquitaniens du Bassin de Paris) caractéristiques, utilisation. Rapport BRGM/74-SGN-358-BSS.

Trouillard-Perrot C., Leprêtre JP., Zornette N. 2003. Inventaire départemental des cavités du Loiret, Rapport final. Rapport BRGM RP-52565-FR.

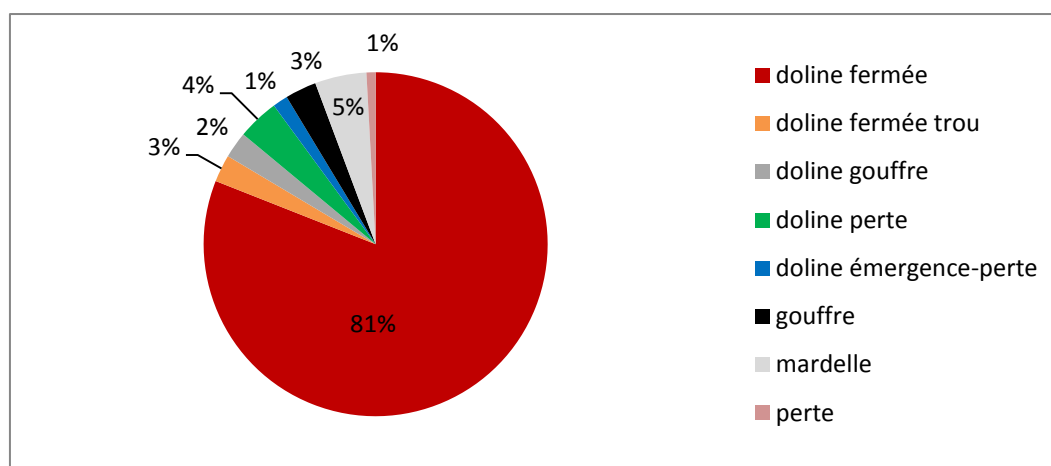
Verachtert E., Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Govers G., Deckers J. 2011. Prediction of spatial patterns of collapsed pipes in loess-derived soils in temperate humid climate using logistic regression. *Geomorphology* 130: 185-196

Annexe 1

Typologie des formes karstiques

Dans la bibliographie, les formes karstiques sont décrites d'après le processus qui les a engendrées. Ainsi, les dolines de dissolution se distinguent des dolines d'effondrement et des dolines de soutirage (cf. 2.3). De même, il existe les gouffres, les pertes, les dolines-pertes, les dolines enfouies et les inversacs.

Sur le terrain, la dénomination s'est faite sur l'aspect purement morphologique. La figure ci-dessous présente le pourcentage de chacun des types de désordres rencontrés sur les sites d'étude de Lorraine et de Franche-Comté.



Proportion des morphologies karstiques dans les sites d'étude de Lorraine et de Franche-Comté

a) Les dolines fermées

Les dolines fermées sont des dépressions de forme circulaire. Sur nos sites d'étude, leur diamètre s'échelonne entre 0,5 et 200 mètres pour une profondeur allant de 0,1 à 20 mètres. Elles représentent 82% de l'inventaire réalisé en Lorraine et en Franche-Comté. Elles peuvent être en forme d'entonnoir, de baquet ou en cuvette. La morphologie à fond plat et revégétalisée est un signe de stabilisation du désordre.



Photographie d'une doline fermée à Montboillon, Haute-Saône

b) Les dolines trou

Elles correspondent à des dolines fermées comme décrites précédemment mais ont la particularité de présenter un trou, probablement formé par les eaux de ruissellement. Ce type de morphologie, en constante évolution via les apports en eau est donc actif. Le diamètre du trou peut être de 0,2 à 4 mètres pour une profondeur s'échelonnant entre 0,5 et 1,5 mètres. Cette morphologie représente 2,6% des formes inventoriées en Lorraine et en Franche-Comté.



Trou en formation

Photographie d'une doline fermée trou dans le Bois de Vau Vauthier en Lorraine

c) Les gouffres

Les gouffres sont des cavités au développement vertical, formées soit par l'effondrement du toit d'une cavité souterraine, soit par l'élargissement par dissolution ou par gélifraction d'une ou plusieurs fractures qui se croisent. Dans notre inventaire, leurs dimensions sont comprises entre 0,2 et 7 mètres de diamètre. La profondeur, bien que difficilement mesurable, du fait de l'obstruction de l'ouverture par des branchages, des ronces, des barbelés ou par absence de visibilité, est comprise entre 1 et 15 mètres.

Ils constituent une base d'information intéressante pour déterminer l'altitude du toit des calcaires, fréquemment visible au niveau des gouffres.



Photographies de gouffre développé au sein d'une fracture en Haute-Saône (à gauche) ; dans le Bois de Vau Vauthier en Lorraine (à droite)

d) Les dolines gouffres

Les dolines gouffres diffèrent des gouffres dans la mesure où le gouffre fait partie intégrante du développement d'une doline. Il peut se placer en son centre ou sur un côté, et se forme préférentiellement dans la partie basse de la doline. Et contrairement aux trous façonnés par les eaux de ruissellement dans les dolines, les gouffres des dolines gouffres présentent des parois subverticales et le toit du calcaire est souvent visible. Leur profondeur est plus importante (2 à 45 mètres) et leurs diamètres sont compris entre 0,4 et 2,5 mètres. Ils sont actifs du fait du phénomène de soutirage affectant la doline.



Photographie d'une doline gouffre dans le Bois de Vau Vauthier en Lorraine

e) Les dolines pertes

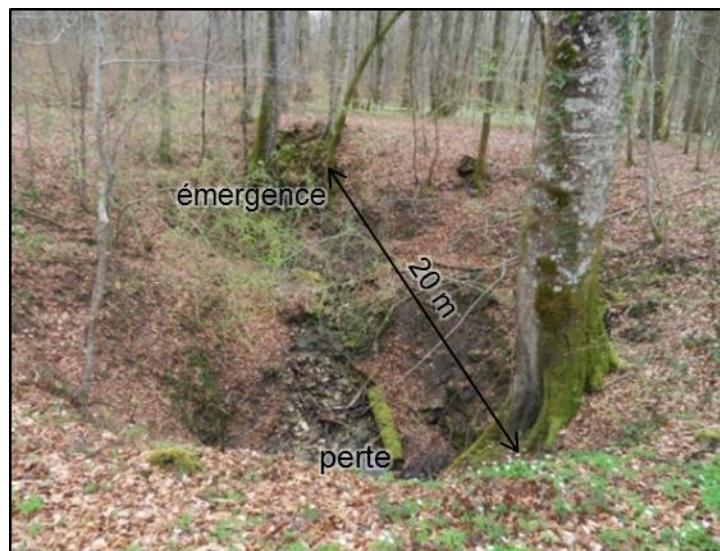
Les dolines pertes sont des dolines dans lesquelles s'infiltrent les eaux de ruissellement de la couverture. Après avoir cheminé dans un ruisseau ou un chenal, l'eau est accueillie par ce réceptacle parfois fermé, parfois ouvert sous forme de gouffre. Cette morphologie représente 4% de notre inventaire.



Photographie de dolines pertes en Lorraine a) dans la Forêt de Fraize b) dans la Forêt de Jaulnay

f) Les dolines émergences-pertes

Cette morphologie karstique correspond au développement en longueur d'une doline, au sein de laquelle l'eau émerge en amont et se perd en aval. La plus grande que nous ayons observée se situe en Franche-Comté et s'étend sur 50 mètres de long. Dans le Bois de Trampot, en Lorraine, elles sont dénommées « fontaines ».



Photographie d'une doline émergence-perte dans le Bois de Trampot en Lorraine

g) Les mardelles

Les mardelles sont des objets circulaires, de 1 à 40 mètres de diamètre dans nos sites d'étude, occupées au fond par un plan d'eau, de 0,2 à 5 mètres de profondeur. Elle se développe sur un substrat imperméable, telles que les argiles ou les marnes et correspondent à des formes de suffosion affectant un micro-karst couvert (P. Gamez). Au nombre de 48 sur les 806 morphologies karstiques relevées, elles constituent une forme plus ou moins stable de désordre lié à la présence de karst.



Photographie d'une mardelle dans la Forêt de Fraize en Lorraine

Annexe 2

Théorie du poids des évidences

Cette méthode est souvent utilisée par les géologues pour mettre en avant des endroits favorables à des phénomènes géologiques telles que la minéralisation (Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter 1994). Cette méthode a été récemment appliquée à la modélisation de la localisation des effondrements en contexte minier par Oh & See (2010).

Pour chaque critère potentiellement explicatif de l'occurrence de désordres, il s'agit de déterminer les poids positifs (W^+) et négatifs (W^-) pour chaque classe (potentiellement discriminante) du dit facteur :

$$W^+ = \ln \frac{P\{E|A\}}{P\{E|\bar{A}\}}$$

$$W^- = \ln \frac{P\{\bar{E}|A\}}{P\{\bar{E}|\bar{A}\}}$$

Avec P la probabilité, E la présence de la classe discriminante, $\bar{E}$ l'absence de la classe discriminante, A la présence de désordres, $\bar{A}$ l'absence de désordres.

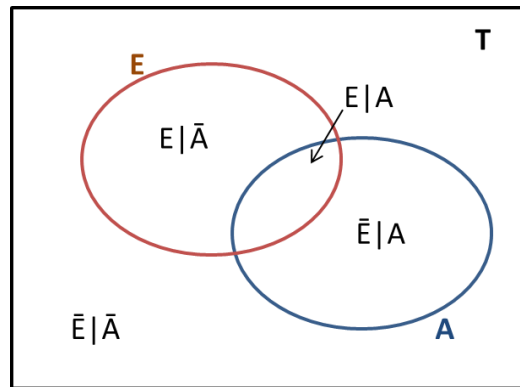


Diagramme de Venn illustrant le principe de calcul du poids des évidences : T représente la zone d'étude

Le contraste (C) de la classe discriminante est donné par :

$$C = W^+ - W^-$$

La valeur normalisée du contraste (selon Student) est le ratio $C/S(C)$ avec :

$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)}$$

$S^2(W^+)$ et $S^2(W^-)$ correspondant aux variances des poids.

Pour chaque classe d'un critère donné, les poids positifs et négatifs sont calculés puis les contrastes calculés. La classe ayant le contraste le plus élevé constitue la classe à retenir comme expliquant le mieux l'occurrence de désordre : les secteurs géographiques correspondant à cette classe sont statistiquement significativement plus sujets à l'occurrence de désordres que les autres secteurs.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34