





# Evaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique

## Phase 1 : bibliographie et retours d'expérience

Rapport final

**BRGM/RP-65280-FR**  
Décembre 2015

**Je. Perrin, G. Noury**

**Vérificateur :**

Nom : Y. Caballero

Fonction : Responsable Scientifique  
de Programme

Date : 18/01/2016

Signature :



**Approbateur :**

Nom : S. Lallier

Fonction : Directeur Adj. D3E

Date : 21/01/2016

Signature :



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

**Mots-clés** : karst, effondrements, affaissements, aménagement, prévention, fontis, infiltration

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

**Perrin Je., Noury G.** (2015) – Evaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique. Phase 1 : bibliographie et retours d'expérience. Rapport final. BRGM/RP-65280-FR, 52 p., 29 ill., 4 ann.

## Synthèse

Ce rapport décrit la phase 1 de l'étude, programmée dans le cadre du Programme de Travail sur les Risques Naturels de la DGPR de 2015 et qui a pour objectifs d'évaluer le rôle des aménagements anthropiques sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique (cavités naturelles), par une étude bibliographique et un retour d'expérience. L'étude se focalise sur le rôle de l'infiltration induite dans l'apparition d'effondrements même si les autres facteurs anthropiques (pompages, perturbations physiques du sol) sont abordés plus brièvement.

L'étude bibliographique montre trois grandes catégories d'aménagement pouvant être à l'origine de désordres en contexte karstique : la concentration des eaux d'infiltration, le rabattement de la nappe karstique et les perturbations physiques du sol. Les traitements préconisés pour éviter ou limiter ces effondrements doivent viser à éviter l'infiltration des eaux de surface au travers des formations superficielles couvrant la formation karstifiée, soit par un drainage hors zone, soit par un aménagement court-circuitant la couverture. Des textes réglementaires, des préconisations sous forme de guide méthodologique ou encore des bases de données géographiques ont été mises en place dans les pays occidentaux particulièrement impactés par les effondrements karstiques.

Sur la base des 63 retours d'expérience collectés, les résultats de la phase 1 de cette étude confirment le rôle joué par les aménagements sur l'apparition d'effondrements liés à la présence de karst et, en premier lieu, ceux contribuant à l'augmentation des flux d'infiltration (bassins de rétention, puisards, conduites enterrées, fossés de drainage). Ces résultats sont conformes aux études disponibles dans la bibliographie internationale. Les contextes les plus impactés sont les karsts sous couverture, calcaires ou crayeux. Seuls trois exemples de contexte évaporitique ont été réunis à ce jour.

Dans le cadre de la phase 2 qui sera réalisée en 2016, une consolidation des retours d'expérience devrait permettre d'obtenir une base de données représentative de désordres liés à la présence d'un aménagement. Les problématiques suivantes seront en outre abordées :

- analyse de la répartition géographique des désordres en fonction de la répartition géographiques des régions karstiques et de l'occupation du sol ;
- évaluation de l'impact des désordres sur les aménagements (ceux à l'origine des désordres qui affectent les bassins de rétention mais également les infrastructures, bâti, etc.) ;
- évaluation de la contribution des aménagements à l'augmentation de la fréquence d'apparition des désordres ;
- réflexion sur la dynamique du phénomène depuis la construction de l'aménagement incriminé jusqu'à l'apparition du désordre en fonction du type d'aménagement et du contexte géologique et hydrogéologique.

Ces réflexions viendront alimenter la réalisation d'une modélisation conceptuelle préliminaire des processus afin d'évaluer de manière qualitative des seuils critiques sur des variables identifiées comme ayant déclenché/accélééré l'apparition d'un désordre.

L'ensemble des résultats viendra alimenter une série de recommandations applicables aux travaux d'aménagements en contexte karstique (milieux carbonatés et gypseux) qui constitueront l'aboutissement de la phase 2 de l'étude.



## Sommaire

<b>1. Introduction : contexte de l'étude et objectifs</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Etude bibliographique</b> .....	<b>15</b>
2.1. PREAMBULE.....	15
2.1.1. Le cas des karsts en contexte évaporitique .....	15
2.1.2. Références générales.....	15
2.2. CONCENTRATION DE L'INFILTRATION.....	18
2.2.1. Gestion des eaux pluviales (drain, injection) et fuites de réseau .....	18
2.2.2. Bassins de rétention .....	20
2.2.3. Canaux et Irrigation.....	21
2.3. PUISARDS ET FORAGES.....	22
2.3.1. Puisards.....	22
2.3.2. Forages .....	23
2.4. BAISSSE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE .....	24
2.5. PERTURBATIONS PHYSIQUES DU SOL.....	25
2.6. TRAITEMENT ET REMEDIATION.....	25
2.7. PRECONISATIONS EXISTANTES .....	27
2.8. SYNTHESE .....	30
<b>3. Retours d'expérience</b> .....	<b>33</b>
3.1. METHODOLOGIE.....	33
3.2. ANALYSE DES RETOURS D'EXPERIENCE.....	33
3.2.1. Analyse de la nature des retours d'expérience.....	33
3.2.2. Répartitions géographique et géologique.....	33
3.2.3. Répartition temporelle.....	35
3.2.4. Répartition par types d'aménagement.....	36
3.2.5. Dimensions des désordres et processus physiques.....	37
3.2.6. Traitements préconisés et réalisés.....	38
3.2.7. Description de cas représentatifs .....	39
3.3. SYNTHESE .....	47
<b>4. Conclusions et perspectives</b> .....	<b>49</b>
<b>5. Bibliographie</b> .....	<b>51</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 – Répartition des effondrements karstiques selon différents facteurs déclencheurs dans quatre régions différentes (Waltham et al. 2005).....	9
Illustration 2 - Répartition des effondrements karstiques selon différents facteurs déclencheurs en Chine pour les périodes 1980-2000 et 2010-2010 (Meng et al. 2012).....	10
Illustration 3 – Liste des principales actions anthropiques induisant l'apparition de désordres en contexte karstique (Waltham et al. 2005). La présente étude se focalise sur la 1 <sup>ère</sup> des 3 catégories (augmentation de l'infiltration) .....	16
Illustration 4 – Facteurs déclencheurs de désordres en contexte karstique ; compilation bibliographique par Gutierrez et al. (2014). Le rectangle orange indique le sujet principal de la présente étude.....	17
Illustration 5 - apparition d'effondrements dans des fossés de drainage (Maryland, Etats-Unis) (Brezinski 2007). .....	19
Illustration 6 - Exemple de la réactivation d'une doline de dissolution par la construction d'un bassin d'eau pluviale (SWRP) dans la doline au Texas. A : situation naturelle avec un remplissage de la doline de près de 20 m (argile de décalcification) ; B : construction du bassin ; C : réactivation de la doline par débouillage du remplissage ; D : traitement (Hunt et al. 2013) .....	21
Illustration 7 – Effondrement des terrains à côté d'un puisard installé pour l'évacuation des eaux pluviales (au niveau de la grille), ville de Bowling Green (Kentucky) (d'après Crawford & Groves 1995) .....	22
Illustration 8 – Puisards pour la réinfiltration des eaux pluviales : les trois cas de gauche présentent des équipements inadaptés pouvant favoriser le soutirage des terrains vers le karst et des désordres en surface ; le cas de droite présente un équipement adapté de l'ouvrage (d'après Waltham et al. 2005) .....	23
Illustration 9 – Effondrement causé par un forage géotechnique lors de la réalisation du métro de Guangzhou, Chine (Meng et al. 2012).....	23
Illustration 10 – Quatre situations menant à un effondrement lors de la réalisation d'un forage (d'après Meng et al. 2012). .....	24
Illustration 11 - A gauche aménagement du drainage d'un secteur imperméabilisé (route, parking) vers un drain karstique ; à droite traitement d'un fontis permettant de préserver son rôle de drainage des eaux superficielles (d'après White et al. 1986) .....	25
Illustration 12 – Design d'un système de traitement des eaux de ruissellement d'une autoroute et réinjection concomitante à la nappe par le biais d'une doline aménagée (Tennessee, Stephenson et al. 1999).....	27
Illustration 13 – Préconisations lors d'aménagements en fonction du contexte géologique (degré de karstification de la dolomie) (Buttrick et al. 2011). .....	29
Illustration 14 – Aménagements à préconiser ou à proscrire (croix rouges) en contexte de fort aléa effondrement karstique (base GeoSure du Royaume-Uni) : à gauche doublets géothermiques, à droite gestion des eaux pluviales (Cooper et al. 2011).....	29
Illustration 15 – Carte à l'échelle nationale montrant le nombre de retours d'expérience obtenus par départements et territoires communaux concernés (en rouge) .....	34
Illustration 16 – Répartition des retours d'expérience par contexte géologique (30 exemples dans le calcaire et la craie et 3 exemples dans le gypse) .....	35
Illustration 17 – Répartition des retours d'expérience par contexte karstologique.....	35
Illustration 18 – Répartition de l'apparition des désordres en fonction des mois .....	36
Illustration 19 – Nombre de retours d'expérience par types d'aménagement et par contexte géologique.....	37

Illustration 20 – Diamètres et profondeurs des effondrements/affaissements en contexte de carbonaté ; en vert désordres dans le contexte de la craie, en bleu désordres dans le contexte calcaire .....	38
Illustration 21 – Localisation des 73 STEP touchées par la présence de bétoires (les points rouges correspondent à des sites étudiés plus en détail) (d'après Topin 2007) .....	40
Illustration 22 – Localisation des 62 ouvrages de lutte contre les inondations (bassins de rétention) impactés par une ouverture de bétoire (David et al. 2010 d'après étude AREAS 2001) .....	40
Illustration 23 – Carte montrant le tracé du canal de la Neste et les désordres recensés dans le cadre d'un projet de PRR (carrés bleus) (Bouroullec 2014) .....	41
Illustration 24 – Impact des désordres sur le bâti du village de Hèches ; les désordres se situent à proximité immédiate du canal de la Neste (Bouroullec 2014) .....	41
Illustration 25 – Localisation des principaux effondrements apparus sur le secteur d'étude (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA) .....	43
Illustration 26 - Schéma de principe du traitement des effondrements par comblement en matériaux granulaires (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA) .....	43
Illustration 27 - Contexte géologique du site de Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) (d'après Bayle 2008) .....	44
Illustration 28 - Carte de localisation des désordres apparus sur la commune de Bonnevent-Veloreille (d'après Bayle 2008) .....	44
Illustration 29 - Distribution chronologique des principaux désordres survenus au nord de l'agglomération parisienne et corrélation avec l'évolution piézométrique de la nappe du Lutétien : a : désordres identifiés par un numéro ; b : volumes annuels prélevés à la nappe pour des usages industriels (données accessibles depuis 1968) ; c : évolution piézométrique de la nappe éocène – rue Réaumur (d'après Toulemont 1987) .....	46

## Liste des annexes

Annexe 1 Gestion des eaux de ruissellement en contexte karstique et liste des « hot spots »	55
Annexe 2 Fiche pour la collecte de retours d'expérience .....	59
Annexe 3 Tableau de synthèse des retours d'expérience .....	65
Annexe 4 Préconisations pour l'aménagement des bétoires en Haute Normandie .....	69

**Note :** cette étude a bénéficié des informations et échanges avec les personnes suivantes que nous tenons à remercier : Frédéric Clément (CEREMA), Bernard Collet (DDT70), Guy Forestier (CG70), Mathieu Liniger (CG25), Paul-Henri Mondain (Calligée), Philippe Muet (GINGER CEBTP).



# 1. Introduction : contexte de l'étude et objectifs

Ce rapport décrit la phase 1 de l'étude, programmée dans le cadre du Programme de Travail sur les Risques Naturels de la DGPR de 2015 et qui a pour objectifs **d'évaluer le rôle des aménagements anthropiques sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique** par une étude bibliographique et un retour d'expérience. Cette première phase sera prolongée en 2016 (phase 2) par des compléments au retour d'expérience, une modélisation conceptuelle préliminaire des processus et la rédaction d'une série de préconisations qui pourront, au-delà du projet, venir alimenter un document méthodologique présentant des recommandations pratiques pour les travaux d'aménagements en contexte karstique. Conformément au cahier des charges, **l'étude est focalisée sur le rôle de l'infiltration induite dans l'apparition d'effondrements** même si les autres facteurs anthropiques (pompages, perturbations physiques du sol) sont abordés plus brièvement. L'étude bibliographique ne concerne que les contextes carbonatés alors que les retours d'expérience traitent tous les contextes karstiques (carbonaté et évaporites).

Une étude précédente (Perrin et al. 2014) propose une trame méthodologique d'évaluation et de cartographie de l'aléa effondrement lié à la présence de karst. Les contextes géologiques les plus sensibles sont les karsts sous couverture ; un facteur aggravant est la présence de circulation d'eau facilitant le soutirage des matériaux de la couverture vers l'aquifère karstique. Au contraire de l'aléa effondrement lié à des cavités artificielles dont la localisation est en principe connue, la localisation des vides karstiques n'est pas prévisible à cause de l'extrême hétérogénéité de leur distribution au sein du massif, à moins de mettre en œuvre des méthodes d'investigations coûteuses (sondages, géophysique spécifique). De fait, lors de la réalisation de cartes d'aléa par une approche classique, les secteurs à aléa moyen ou fort pourront être relativement étendus car ils seront essentiellement déterminés sur la base des contextes géologique et hydrogéologique.

Cependant, il existe des **pistes de réduction de l'aléa** basées sur la préconisation de certaines mesures de mitigation dans les secteurs à aléa marqué. **L'objectif de ce travail est de faire émerger de telles pistes**, en particulier en lien avec **les aménagements**, par une analyse bibliographique et un retour d'expérience à l'échelle nationale.

En effet, la proportion de désordres induits par des causes anthropiques est de 87% en Chine sur la base d'une analyse robuste de près de 45000 désordres et de 58% en Pennsylvanie sur la base de l'analyse de 1574 désordres (Illustration 1). En Chine, l'essentiel des désordres induits est lié au rabattement de la nappe karstique par pompages alors qu'en Pennsylvanie l'essentiel des désordres est lié à des modifications du ruissellement et du drainage.

Location	China	Alabama	Missouri	Pennsylvania
Water table decline (including mine drainage)	80.0%	87%	8%	n.a.
Water impoundment	3.4%	12%	21%	
Construction works and drainage modifications	3.6%	1%	71%	58%
Total induced	87.0%			58%
Natural	6.2%	n.a.	n.a.	42%
Unknown	6.8%			
Total number of sinkholes	44,904	1,324	87	1,574

n.a. refers to statistics that are not available.

*Illustration 1 – Répartition des effondrements karstiques selon différents facteurs déclencheurs dans quatre régions différentes (Waltham et al. 2005)*

Une autre analyse statistique des causes d'effondrements karstiques survenus en Chine est proposée par Meng et al. (2012) (Illustration 2) pour deux périodes temporelles. Les résultats vont dans le même sens que l'analyse précédente avec seulement 22 à 25 % des désordres d'origine naturelle alors que tous les autres sont causés par l'activité humaine avec en premier lieu le pompage (27-48% des désordres totaux), puis les vibrations (3-9 %), les réservoirs (4-8 %) et les forages (4%).

**Table 1** The types of sinkholes from 1980 to 2000 in China

Total (cases)	Types						
	Natural	Human activity					Uncertainty
		Tunnel and mine excavation	Pumping	Reservoir impounding	Vibration loading	Waste liquid infiltration	
1,446	332	326	411	125	145	21	86
Percentage	21.99	21.59	27.22	8.28	9.60	1.39	5.70

**Table 2** The types of sinkholes from 2000 to 2010 in China

Total (cases)	Types						
	Natural	Human activity					Drilling operations
		Tunnel and mine excavation	Pumping	Reservoir impounding	Vibration loading	Waste liquid infiltration	
919	154	385	300	24	17	13	26
Percentage	24.88	62.20	48.47	3.88	2.75	2.10	4.20

*Illustration 2 - Répartition des effondrements karstiques selon différents facteurs déclencheurs en Chine pour les périodes 1980-2000 et 2010-2010 (Meng et al. 2012)*

Même si ces proportions sont très variables selon les études (variabilité probablement liée aux contextes locaux), ces chiffres **montrent clairement l'influence considérable des aménagements anthropiques dans l'apparition de ces effondrements.**

Outre son rôle essentiel dans les processus de karstification, l'eau est l'agent principal qui provoque le mouvement de terrain, si les conditions de son transfert de la surface vers le sous-sol se révèlent favorables (Clément 2014).

Sur la base des études bibliographiques et retours d'expérience menés dans le cadre de ce projet et du projet précédent sur l'aléa effondrement (Perrin et al. 2013, 2014), l'impact du rabattement de la nappe karstique (hors fluctuations d'origine naturelle) sur l'apparition d'effondrements est un scénario très limité sur le territoire métropolitain<sup>1</sup>. Il ne sera donc pas abordé en détail dans cette étude. L'accent est mis sur le processus principal qui est l'infiltration des eaux et leur cheminement à travers la couverture jusqu'à l'aquifère karstique.

L'infiltration induite a également des conséquences sur la vulnérabilité des aquifères karstiques (Ford & Williams 2007) et sur la problématique des inondations en région karstique (Zhou 2007) car elle pourra aussi bien favoriser la circulation rapide de contaminants depuis la surface vers l'aquifère ou augmenter la recharge de la nappe et donc les niveaux piézométriques. Ces deux aspects ne sont pas abordés dans la présente étude, cependant il ne faut pas perdre de vue les liens qui peuvent exister entre mitigation des effondrements, vulnérabilité de l'aquifère, et/ou gestion des inondations lors d'aménagements.

<sup>1</sup> Pour rappel (§ 2.1), ce constat s'applique uniquement aux karsts en contexte carbonaté (qui font seuls l'objet de cette étude bibliographique). Il n'est plus vrai pour les karsts en contexte évaporitique (cf. § 3)

### ***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.

Bétoire : perte (terme en usage en Normandie) et par extension effondrement : l'ouverture de bétoires en zone urbanisée à proximité d'infrastructures représente un risque géotechnique majeur.

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 débouillage.

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.).

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.

Forage : action de forer un trou dans le sous-sol pour différents objectifs (sondage géotechnique, forage d'eau, mesures) et modifications du sous-sol résultant de sa réalisation

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.

Puisard : Ouvrage en principe vertical (forage ou puits) construit dans le but d'évacuer les eaux de surface (eaux pluviales, eaux usées, autres).

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.



## 2. Etude bibliographique

L'étude bibliographique s'est appuyée sur plusieurs bases de données et moteurs de recherche, soit internes au BRGM, soit externes (Geosciences World et Georef (articles scientifiques) et Google (tous types de références)). Les listes bibliographiques d'ouvrages et d'articles de référence ont en outre été analysées. Après une synthèse des références générales (2.1), ce chapitre est organisé selon la nature des aménagements incriminés - concentration de l'infiltration (2.2), forages (2.3), baisse du niveau piézométrique (2.4), perturbations physiques du sol (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) puis des éléments sur le traitement et la remédiation (2.6) ainsi que sur les préconisations existantes (2.7) sont donnés.

### 2.1. PREAMBULE

#### 2.1.1. Le cas des karsts en contexte évaporitique

Pour rappel, cette partie bibliographique de l'étude s'intéresse uniquement aux karsts en contexte carbonaté. Les karsts en contexte évaporitique n'y sont pas traités.

#### 2.1.2. Références générales

Mouret (1984) est à notre connaissance le premier auteur francophone ayant abordé la question de l'apparition d'effondrements. Il énumère des critères déclencheurs naturels comme par exemple i) les fortes pluies, qui peuvent déstabiliser les terrains par débouillage d'un conduit colmaté sous l'effet de la mise en charge exceptionnelle du réseau karstique, ou ii) les périodes sèches avec création de fentes de dessiccation contribuant à la rupture de voûtes argileuses. Il inventorie également des critères déclencheurs anthropiques comme: la déforestation (augmentation du ruissellement et formation de nouvelles pertes, disparition des racines qui consolidaient le terrain), les vibrations lors de travaux ou celles causées par le trafic, la surcharge occasionnée par les constructions, le détournement de cours d'eau, les fuites de canalisation, le pompage excessif d'aquifères et l'ouverture artificielle de gouffres par travaux de génie civil.

Newton (1987) présente une synthèse sur l'apparition d'effondrements en terrain karstique (calcaire) induits par l'activité humaine à l'échelle de l'Est des Etats-Unis. Il distingue deux grands cas de figure, d'une part, les effondrements causés par le rabattement de la nappe karstique par des pompages et, d'autre part, les effondrements causés par des aménagements en surface: fuites dans le système de drainage des eaux (égouts, eau pluviale, approvisionnement etc.), retenues d'eau, construction d'infrastructures et perturbations physiques du sol. Ces modifications accélèrent les processus naturels. Ainsi, un effondrement se produit 1) là où il ne se serait jamais produit naturellement, 2) là où il se serait produit sur des temps longs (géologiques) et 3) là où un affaissement lent se serait développé au lieu d'un effondrement. Sur 51 cas décrits, 25 effondrements sont causés par le pompage dans la nappe karstique, 16 effondrements par des retenues d'eau, 7 effondrements par les systèmes de drainage et 3 effondrements par des opérations de forage. En Alabama, les désordres liés au drainage ou aux bassins de rétention ont des dimensions généralement modestes: moins de 5 m de diamètre en moyenne (18 m pour le plus large).

Dans leur travail de synthèse, Waltham et al. (2005) consacrent un chapitre aux effondrements karstiques causés par l'activité humaine et proposent un tableau présentant les principaux processus incriminés; trois catégories sont distinguées à savoir: l'infiltration induite, la baisse

des niveaux piézométriques et les perturbations physiques du sol (Illustration 3). L'infiltration induite peut être liée à plusieurs types de configuration (scénarios). Par exemple, Waltham et al. (2005) en distinguent sept (Illustration 3) :

1. Ruissellement non contrôlé d'une surface aménagée
2. Fossé de drainage non imperméabilisé
3. Conduite fissurée/cassée
4. Puits filtrants/puisards dans la couverture
5. Forages non colmatés
6. Irrigation pour l'agriculture
7. Réservoirs et bassins de rétention

<i>Increased water input to soil cover</i> Uncontrolled run-off drainage from a site or structure Installed drainage ditches that are unlined Broken pipelines Soakaway drains (dry wells) within the soil profile Unsealed boreholes Irrigation for agriculture Impoundment of reservoirs and floodwater retention basins
<i>Increased through drainage due to water table decline</i> Over-pumping for groundwater abstraction Well pump-testing De-watering to maintain dry quarry operations De-watering to maintain dry mine workings
<i>Physical disturbance to the ground</i> Partial removal and consequent thinning of the soil profile Partial or total removal of vegetation on the soil cover Vibrations from blasting or plant movements Structural loads on foundations within the soil profile Water table fluctuations.

*Illustration 3 – Liste des principales actions anthropiques induisant l'apparition de désordres en contexte karstique (Waltham et al. 2005). La présente étude se focalise sur la 1<sup>ère</sup> des 3 catégories (augmentation de l'infiltration)*

Gutierrez et al. (2014) présentent également une compilation des scénarios induisant de l'infiltration sur la base d'une étude bibliographique extensive (Illustration 4) ; cette liste est très proche de celle présentée à l'illustration 3 :

1. Irrigation (scénario 6 de Waltham et al. 2005)
2. Fuites de conduites (scénario 3 de Waltham et al. 2005)
3. Fuites de canaux (scénario 2 – fossés de drainage non étanches - de Waltham et al. 2005)
4. Bassins de rétention (scénario 7 de Waltham et al. 2005)
5. Concentration ou détournement des infiltrations (urbanisation, puits filtrants, puisards) (scénario 1 & scénario 4 de Waltham et al. 2005)
6. Suppression de la végétation (décrit par Waltham comme une perturbation physique du sol)
7. Opérations de forage
8. Puits ou forages abandonnés et non colmatés (scénario 5 de Waltham et al. 2005)
9. Injection de fluides pour l'extraction minière

Les effets de ces infiltrations sur la tenue des terrains sont de plusieurs types :

1. augmentation des flux d'eau qui accélère le phénomène de soutirage
2. augmentation de la dissolution dans le karst (essentiellement en contexte de gypse)
3. augmentation du poids des sédiments
4. diminution de la tenue géomécanique des terrains

Type of change	Effects	(1) Natural processes; (2) human activities
Increased water input to the ground (cover and bedrock)	Increases percolation accelerating suffosion. Favors dissolution. Increases the weight of sediments. May reduce the mechanical strength and bearing capacity of sediments.	(1) Rainfall (Zhao et al., 2010; Youssef et al., 2012), floods (Hyatt and Jacobs, 1996), snow melting, thawing of frozen ground (Satkunas et al., 2006). (2) Irrigation (Atapour and Aftabi, 2002; Kirkham et al., 2003; Gutiérrez et al., 2007), leakage s from pipes (Shaquor, 1994; McDowell and Poulosom, 1996; Jassim et al., 1997; Gutiérrez and Cooper, 2002; Dougherty, 2005; McDowell, 2005; Fleury, 2009; Buttrick et al., 2011), canals (Swan, 1978; Lucha et al., 2008b) or ditches (Gutiérrez et al., 2007), impoundment of water (Milanovic, 2000), runoff concentration (urbanization, soak-aways, drainage wells) or diversion (Knight, 1971; White et al., 1986), vegetation removal, drilling operations, unsealed wells and boreholes (Johnson et al., 2003; Johnson, 2005; Lambrecht and Miller, 2006; Liguori et al., 2008), injection of fluids, solution mining (Ege, 1984).
Water table decline	Increases the effective weight of the sediments (loss of buoyant support).  Slow phreatic flow replaced by more rapid downward percolation favoring suffosion, especially when the water table is lowered below the rockhead. Accelerates groundwater flow in areas affected by cones of depression. May reduce the mechanical strength by desiccation and crystallization of salts. Hydrofracturing of poorly drained deposits surrounding cavities Suction effect. Loose fine-grained deposits may be dragged with the pumped water causing internal erosion.	(1) Climate change, sea level decline (Cooper and Keener, 2001), entrenchment of drainage network (Ortega et al., 2013), tectonic uplift, isostatic rebound, halokinetic uplift (Closson et al., 2007; Closson and Karaki, 2009; Zarei et al., 2011). (2) Water abstraction (Kemmerly, 1980; Newton, 1984; LaMoreaux and Newton, 1986; Chen, 1988; Waltham and Smart, 1988; Shaquor, 1994; Tihansky, 1999; Kaufmann and Quinif, 2002; He et al., 2003; Keqiang et al., 2004; Waltham, 2008; Dogan and Yilmaz, 2011; García-Moreno and Mateos, 2011), de-watering for mining and excavation operations (Foose, 1953; LaMoreaux and Newton, 1986; Chen, 1988; Xu and Zhao, 1988; Zhou, 1997; Li and Zhou, 1999; De Bruyn and Bell, 2001; Klimchouk and Andrejchuk, 2005; Sprynskyy et al., 2009; Pando et al., 2013), decline of water level in lakes (Yecheili et al., 2006; Frumkin et al., 2011), excavations acting as drainages (Fidelibus et al., 2011).
Impoundment of water	May create extremely high hydraulic gradients leading to rapid turbulent flows favoring internal erosion and dissolution. The base level rise may change groundwater flow paths and location of discharge zones. Major and continuous changes in the water table causing repeated flooding and drainage of karst conduits. Imposes a load.	(1) Natural lakes. (2) Reservoirs (Milanovic, 2000 and references therein; Uromeihy, 2000; Dogan and Cicek, 2002; Romanov et al., 2003; Bonacci and Roje-Bonacci, 2008; Johnson, 2008; Bonacci and Rubinić, 2009; Cooper and Gutiérrez, 2013 and references therein), ponds (Calò and Parise, 2009), sewage lagoons (Davis and Rahn, 1997).
Erosion or excavation	Reduces the thickness and mechanical strength of cavity roofs. May concentrate runoff. May create a new base level changing the path and rate of groundwater flows. May create an outlet for internally eroded deposits.	(1) Erosion processes. (2) Excavations (Walker and Matzat, 1999; Lolcama et al., 2002; Guerrero et al., 2008b; Fidelibus et al., 2011).
Underground excavations	Disturbs groundwater flows. May intercept phreatic conduits and distort groundwater flow paths. May cause sudden intrushes of water and flooding in underground openings involving accelerated internal erosion and karstification. May weaken sediments over voids.	(1) Biogenic pipes. (2) Conventional and solution mining (Ege, 1984; Xu and Zhao, 1988; Gongyu and Wanfang, 1999; Li and Zhou, 1999; Andrejchuk, 2002; Autin, 2002; Sharpe, 2003; Yin and Zhang, 2005; Warren, 2006; Bonetto et al., 2008; Lucha et al., 2008a; Wang et al., 2008; He et al., 2009; Mesescu, 2011; Parise, 2012), tunneling (Milanovic, 2000; Song et al., 2012).
Static loads	Favors the failure of cavity roofs and compaction processes.	(1) Aggradation processes. Glacial loading and unloading (Anderson and Hinds, 1997).
Dynamic loads	Unloading favors the formation of fractures and dilation of pre-existing ones. Favors the failure of cavity roofs and may cause liquefaction–fluidization processes involving a sharp reduction in the strength of soils.	(2) Engineered structures (Waltham, 2008), dumping (Parise and Pascali, 2003), heavy vehicles (Davis and Rahn, 1997; Waltham et al., 2005). (1) Earthquakes (Nicoletti and Parise, 2002; Closson et al., 2010; Del Prete et al., 2010a, b; Kawashima et al., 2010), explosive volcanic eruptions.
Vegetation removal	Reduces mechanical strength of cover deposits (root cohesion). Increases infiltration.	(2) Artificial vibrations (blasting, explosions). (1) Wild fires. (2) Vegetation clearance.
Thawing of frozen ground	Favors dissolution. Significant reduction in the strength of the sediments.	(1) Climate change (Satkunas et al., 2006). (2) Development, deforestation, water storage.

Illustration 4 – Facteurs déclencheurs de désordres en contexte karstique ; compilation bibliographique par Gutierrez et al. (2014). Le rectangle orange indique le sujet principal de la présente étude

Zhou & Beck (2008) distinguent trois sources possibles d'eau d'infiltration dans le contexte de karst sous couverture :

- Infiltration d'eau depuis la surface (ruissellement sur surface imperméabilisée, irrigation, réservoirs)
- Infiltration d'eau proche de la surface (drains enterrés, conduites, etc.)
- Percolation depuis une nappe perchée vers la nappe karstique

## **2.2. CONCENTRATION DE L'INFILTRATION**

Les terrains karstiques à l'état naturel sont essentiellement infiltrants ; ils produisent environ 2/3 moins de ruissellement que des terrains alluviaux (cf. CSN karst working group 2009). Cependant lors de travaux d'aménagement sur ces terrains, les surfaces imperméabilisées résultantes génèrent un ruissellement qui ne pourra pas trouver les cheminements de ruissellement naturel. Les conséquences en sont une instabilité des terrains (effondrements, subsidence) et une diminution de la recharge vers la nappe karstique.

Lorsque le système de drainage est à l'origine du désordre, la situation la plus impactante est celle où le niveau de la nappe karstique est située dans la formation karstifiée (condition de nappe libre) car l'énergie d'érosion interne est plus grande (Newton 1987). A l'endroit de l'infiltration concentrée, l'eau a le double effet de diminuer la cohésion des terrains superficiels et d'ajouter du poids volumique à ces terrains par imbibition.

Le cas des retenues d'eau est proche du cas précédent (système de drainage) en ce sens que l'eau diminue, par son infiltration, la cohésion des terrains superficiels et la retenue augmente la charge hydraulique sur ces terrains. Ces deux phénomènes peuvent donc entraîner l'effondrement des terrains et le drainage des eaux retenues vers le karst.

Quatre situations (scénarios) de concentration des infiltrations peuvent être distinguées : les eaux pluviales et les fuites de réseau (2.2.1), les bassins de rétention (0), les canaux (2.2.3) et l'irrigation (2.2.3).

### **2.2.1. Gestion des eaux pluviales (drain, injection) et fuites de réseau**

White et al. (1986) présentent une étude de cas en Pennsylvanie sur l'apparition de fontis dans un contexte de karst sous couverture meuble (<10 m) exacerbée par l'urbanisation (parking, le drainage d'eau pluviale, la réinjection des eaux de ruissellement).

Zhou & Beck (2005) discutent des aménagements routiers et de la gestion des eaux de ruissellement en contexte karstique avec la triple problématique : effondrement, contamination de l'aquifère karstique et inondation. Pour limiter le risque d'effondrement, ils recommandent d'évacuer les eaux de ruissellement par des drains étanches en privilégiant des géotextiles pour l'étanchéification. Ils donnent l'exemple d'une statistique sur l'apparition de fontis dans les fossés de drainage des routes du Tennessee entre 1969 et 2002 : 87% des 163 effondrements sont apparus dans un fossé et 93% de ces effondrements dans des secteurs où le fossé n'était pas étanche. Il n'est pas recommandé d'évacuer les eaux de ruissellement vers des dépressions (dolines) mais plutôt de réaliser des bassins d'infiltration.

De Bruyn & Bell (2001) décrivent l'apparition d'effondrements dans la province de Gauteng (Afrique du sud) dans un contexte de dolomies karstifiées couvertes par une formation superficielle de moins de 15 m d'épaisseur en général. Ce contexte géologique couvre 20% de la province mais l'apparition d'effondrements est essentiellement concentrée dans les secteurs urbanisés et attribuée à la modification des infiltrations : modification de la structure du sol lors des travaux, fuite des réseaux d'eau, drainage de surfaces imperméabilisées (route, parking, toits).

Buttrick et al. (2011) présentent une statistique des effondrements apparus en contexte de dolomies karstifiées sous couverture (région de Pretoria, Afrique du sud) : 643 des 650 désordres sont liés à l'activité humaine dont 591 situés le long de 461 km de conduites enterrées.

Brezinski (2007) synthétise les conditions géologiques favorables à l'apparition d'effondrements dans un secteur de l'état du Maryland (Etats-Unis) et montre l'effet additionnel des modifications du drainage naturel des terrains : fossés de drainage (Illustration 5), bassins de rétention des eaux pluviales, déviation du drainage naturel, décapage des terrains superficiels.



*Illustration 5 - apparition d'effondrements dans des fossés de drainage (Maryland, Etats-Unis) (Brezinski 2007).*

Le CSN karst working group (2009) définit le concept de « stormwater hotspot », c'est-à-dire des secteurs générateurs de fort ruissellement suite à des aménagements en surface. Une liste de ces secteurs est donnée en Annexe 1.

Remarque complémentaire<sup>2</sup> : Dans un contexte de karst de gypse sous couverture alluviale, Gutierrez & Cooper (2002) montrent le rôle prépondérant joué par les eaux d'infiltration dans l'apparition de désordres (augmentation de la dissolution, entraînement des matériaux de couverture) et recommandent une série de mesures visant à limiter les infiltrations.

---

<sup>2</sup> Pour rappel (§ 2.1), cette étude bibliographique s'intéresse uniquement aux karsts en contexte carbonaté. Cette remarque complémentaire est à titre indicatif.

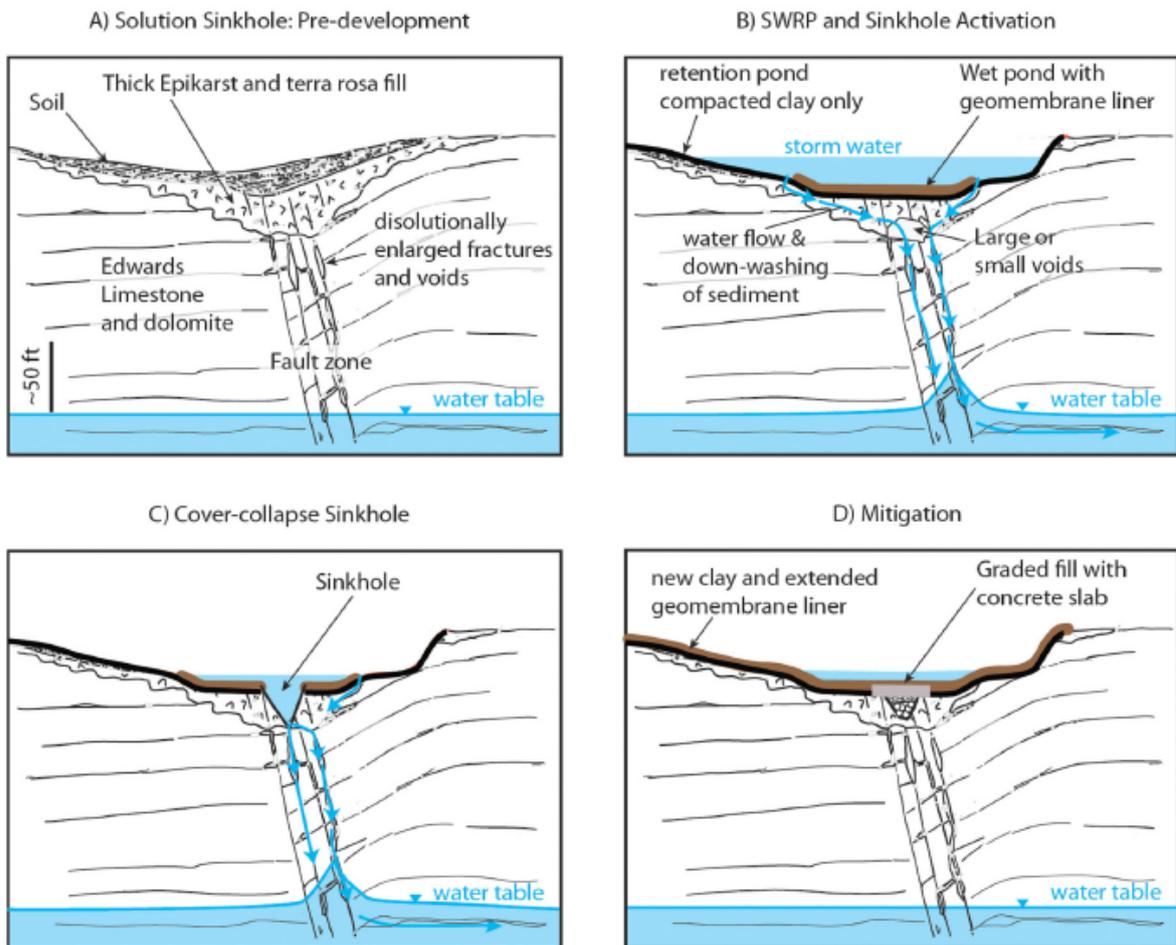
### **2.2.2. Bassins de rétention**

Aley et al. (1972) inventorient 12 sites dans l'état du Missouri où la construction de bassins de rétention (fuites du bassin) ou réceptacles d'eau usée (en principe étanches) ont déclenché l'apparition de fontis.

Hunt et al. (2013) présentent l'apparition d'un fontis apparu par débouillage dans un bassin de rétention des eaux pluviales (eaux d'orage) dans un contexte de karst nu au Texas (Illustration 6). Ce bassin collectait les eaux de ruissellement d'un parking et d'une zone résidentielle et l'eau collectée était utilisée pour irriguer des zones revégétalisées à proximité. L'évènement s'est produit suite à une pluie de 110 mm qui a rempli le bassin d'eau sur une hauteur de 3 m. Un fontis, d'un diamètre de 9 m et d'une profondeur de 4 m, est apparu brusquement et a englouti un volume important d'eau pluviale (26 500 m<sup>3</sup>). L'étude montre que le bassin avait été construit dans une large dépression, peu marquée et d'une surface d'environ 0,5 ha (doline colmatée par des argiles résiduelles, terra rossa, jusqu'à 6 m d'épaisseur). Le traitement de l'effondrement a inclus un remplissage de blocs puis de graviers, une géo-membrane, puis un couvercle en béton. Les côtés du bassin de rétention furent également renforcés par une couche d'argile recouverte d'une géo-membrane. Il est très vraisemblable que la cavité souterraine qui s'est ouverte, s'est agrandie petit à petit avant son effondrement, celui-ci ayant été « seulement » déclenché par la forte pluie.

Milanovic (2002) montre plusieurs exemples d'apparition d'effondrements au droit de réservoirs construits dans des contextes de karst sous couverture. De tels effondrements rendent évidemment inutilisables ces retenues d'eau.

Des effondrements de 20-30 m de diamètre se sont produits lors de la mise en eau du barrage du Lar en Iran. Le contexte géologique dans lequel se produisent les effondrements montre des calcaires karstifiés recouverts de 100 à plus de 200 m par des formations meubles alluviales et argileuses (Messerklinger 2014).



**Figure 12.** Conceptual hydrogeologic model of sinkhole in four stages: A) Pre-SWRP development, B) SWRP and sinkhole activation, C) cover-collapse, and D) mitigation.

*Illustration 6 - Exemple de la réactivation d'une doline de dissolution par la construction d'un bassin d'eau pluviale (SWRP) dans la doline au Texas. A : situation naturelle avec un remplissage de la doline de près de 20 m (argile de décalcification) ; B : construction du bassin ; C : réactivation de la doline par déboussage du remplissage ; D : traitement (Hunt et al. 2013)*

### 2.2.3. Canaux et Irrigation

Concernant le contexte carbonaté<sup>3</sup>, aucune étude sur le rôle de canaux ou de l'irrigation dans l'apparition de désordres n'a pu être trouvée. A titre d'information, deux exemples pour le contexte du gypse sont donnés ci-dessous :

Fidelibus et al. (2010) présentent l'effet de la construction d'un canal dans un contexte de gypse karstifié couvert de 6-10 m de formations meubles en région côtière (Foggia, Italie). Le canal construit en 1930 a sensiblement modifié les écoulements de la nappe karstique en devenant le drain de la nappe et occasionnellement en rechargeant la nappe. Ces modifications ont dû induire une évolution de la karstification aux alentours du canal et une érosion interne dans la couverture, avec pour résultats l'apparition de plusieurs effondrements dès 1999.

<sup>3</sup> Pour rappel (§ 2.1), cette étude bibliographique s'intéresse uniquement aux karsts en contexte carbonaté. La remarque complémentaire est à titre indicatif.

Gutierrez et al. (2007b) montrent dans un karst évaporitique sous couverture de la province de Saragosse, l'importance des infiltrations d'eau induites dans le déclenchement des fontis, la première source étant l'irrigation (sheet flooding) ; un lien fort existe entre périodes d'irrigation et apparition de fontis.

## 2.3. PUISARDS ET FORAGES

Les puisards correspondent à des ouvrages verticaux (puits de large diamètre ou forage de petit diamètre) qui ont pour fonction de ré-infiltrer les eaux de surface (eaux pluviales, eaux usées, etc.). Les forages regroupent les activités de forage (sondages géotechniques, forage d'eau, forage pour l'installation de piézomètres, etc.) et les modifications du sous-sol qui en résultent (mise en communication de différentes nappes, infiltrations le long du tubage, etc.).

### 2.3.1. Puisards

Crawford & Groves (1984) décrivent le cas de la ville de Bowling Green (Kentucky) où des centaines de puisards ont été forés pour l'évacuation des eaux pluviales ; ces ouvrages sont généralement situés au fond de dolines, le long de fossés de drainage, de zones de ruissellement temporaire en amont de dolines et au niveau de bassins de rétention. Ces puisards ont des diamètres compris entre 6 et 12 pouces et font généralement moins de 35 mètres de profondeur. Le tubage plein en acier est en général installé jusqu'au toit du calcaire. L'espace annulaire est cependant très rarement cimenté et il n'y a donc pas d'étanchéification entre le calcaire et la couverture. En conséquence, de nombreux effondrements se sont produits à proximité immédiate des ouvrages (Crawford & Groves 1995, Illustration 7). Le phénomène envisagé est l'existence d'espaces au niveau où le tubage repose sur le toit du calcaire à la topographie irrégulière ce qui permet à l'eau infiltrée par le forage de venir saturer les terrains de couverture à proximité du tubage. Il en résulte un processus de soutirage des matériaux de couverture vers le karst et l'apparition d'une cloche de fontis qui évolue en direction de la surface jusqu'à l'effondrement des terrains.



*Illustration 7 – Effondrement des terrains à côté d'un puisard installé pour l'évacuation des eaux pluviales (au niveau de la grille), ville de Bowling Green (Kentucky) (d'après Crawford & Groves 1995)*

Waltham et al. (2005) schématisent différents cas de puits pour l'évacuation des eaux pluviales pouvant conduire à des désordres en surface et un cas présentant l'équipement recommandé pour prévenir des mouvements de terrain (Illustration 8).

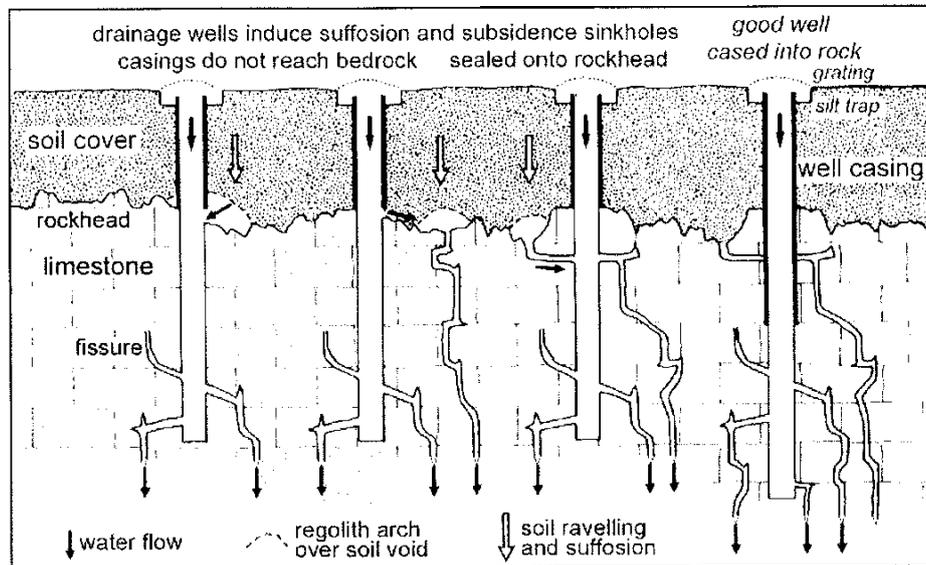


Illustration 8 – Puits pour la réinfiltration des eaux pluviales : les trois cas de gauche présentent des équipements inadaptés pouvant favoriser le soutirage des terrains vers le karst et des désordres en surface ; le cas de droite présente un équipement adapté de l'ouvrage (d'après Waltham et al. 2005)

### 2.3.2. Forages

Newton (1987) décrit l'apparition d'effondrement suite à l'infiltration d'eau au niveau d'un forage abandonné ou qui n'a pas été tubé et cimenté jusqu'au terrain karstifié (deux cas cités) ou en présence d'une nappe perchée dans la formation superficielle (un cas cité). En Chine, Meng et al. (2012) décrivent 26 effondrements causés directement par la réalisation d'un forage (Illustration 9). Le mécanisme menant à l'effondrement est lié à l'écoulement rapide et érosif créé par le processus de forage, potentiellement couplé au phénomène de mise en communication de deux formations géologiques aquifères. Quatre situations menant à l'apparition d'un effondrement sont décrits (Illustration 10) ; ces différents cas sont liés à la position de la cavité par rapport aux formations géologiques (formation karstifiée ou formation de couverture).



Illustration 9 – Effondrement causé par un forage géotechnique lors de la réalisation du métro de Guangzhou, Chine (Meng et al. 2012)

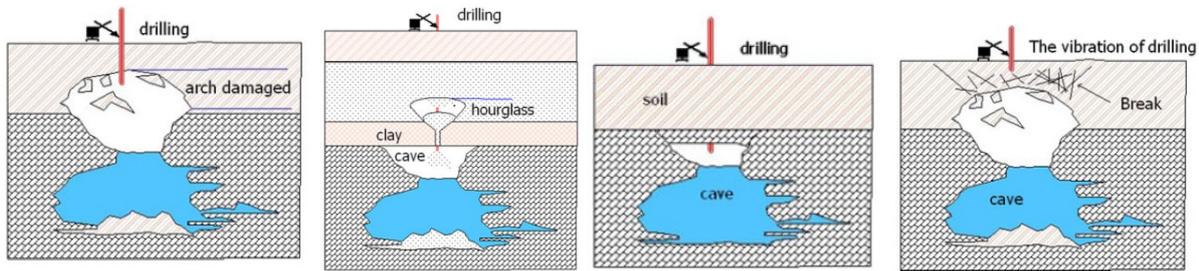


Illustration 10 – Quatre situations menant à un effondrement lors de la réalisation d'un forage (d'après Meng et al. 2012)

Dans le cadre de l'installation d'une conduite de gaz, Smith & Sinn (2013) présentent un cas d'apparition de fontis et d'affaissements lors de la réalisation d'un forage horizontal orienté dans un contexte de karst sous couverture (sable et argiles) en Floride. Les causes des mouvements de terrain sont imputées, soit à une érosion de zones de faiblesse dans la couverture par la boue de forage, soit au soutirage de remplissages karstiques dans les calcaires sous-jacents, soit à une combinaison des deux.

## 2.4. BAISSÉ DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

La baisse des niveaux piézométriques est un critère déclencheur d'effondrement particulièrement bien documenté. La baisse peut être naturelle (sécheresse) ou plus généralement le résultat d'une exploitation de l'aquifère karstique par pompage : par exemple en Floride où l'aquifère carbonaté est passé de conditions artésiennes à plus de 15 m de rabattement avec l'apparition concomitante de nombreuses dolines (Patton & Klein 1989, Sowers 1996), dans le Tournaisis (Belgique) où la densité de dolines est plus élevée dans les secteurs ayant le niveau piézométrique le plus rabattu (Kaufmann & Quinif 2002), ou en Chine dans les secteurs d'exploitation de mines de charbon nécessitant le rabattement de la nappe (Zhao et al. 2012). Ces observations ont été étayées par des approches théoriques (Tharp 1999, 2002). Waltham (2008) et Sowers (1996) présentent également des cas d'apparition de désordre suite à un rabattement de nappe causé par l'exploitation de carrières ou de mines aux Etats-Unis et en Afrique du Sud.

L'abaissement du toit de la nappe sous le toit des calcaires va permettre un écoulement vadose dans le karst favorable au transport solide et potentiellement déclencher des désordres en surface par soutirage (Waltham & Fookes 2003) ; la perte de la poussée d'Archimède sur les terrains de couverture et/ou les altérites in situ va favoriser les processus d'érosion interne (soutirage).

Doctor et al. (2008) montre que la densité de dolines est plus élevée dans les secteurs où les fluctuations de niveau piézométrique sont les plus significatives et/ou les gradients hydrauliques sont les plus marqués.

## 2.5. PERTURBATIONS PHYSIQUES DU SOL

Les modifications faites à la surface du sol telles que déforestation, terrassements, surcharge, vibrations, remblais de dépressions karstiques peuvent également contribuer à l'apparition de désordres.

Le fait d'enlever la végétation naturelle ou de réduire la couverture de sol recouvrant le karst conduit à une augmentation des flux d'infiltration ce qui peut donc accélérer les processus de soutirage (Waltham et al. 2010).

En France, la déforestation est décrite comme une activité susceptible de déclencher des désordres (Flageollet 1989) : en Quercy et en Périgord, les paysans plantaient autrefois des noyers et des cerisiers dans les terrains argileux pour éviter la formation de gouffres dangereux pour les troupeaux ; le vieillissement des arbres et la disparition progressive des racines ont affaibli la tenue de la voûte argileuse qui s'effondre.

Un cas particulier est le remblaiement intempestif des dolines par des gravats (Nicod 1984) : cette pratique est courante puisque ces dépressions naturelles offrent un volume de stockage significatif. Cependant, de tels remblais mis en place sur des terrains sous-consolidés peuvent être sujets à des tassements différentiels et des affaissements créés par suffosion des fines autour des gravats.

## 2.6. TRAITEMENT ET REMEDIATION

White et al. (1986) proposent des traitements de fontis qui permettent de maintenir leur rôle de drainage vers la nappe karstique dans un contexte de karst (dolomies/calcaires) sous couverture meuble peu épaisse (<10 m) (Illustration 11).

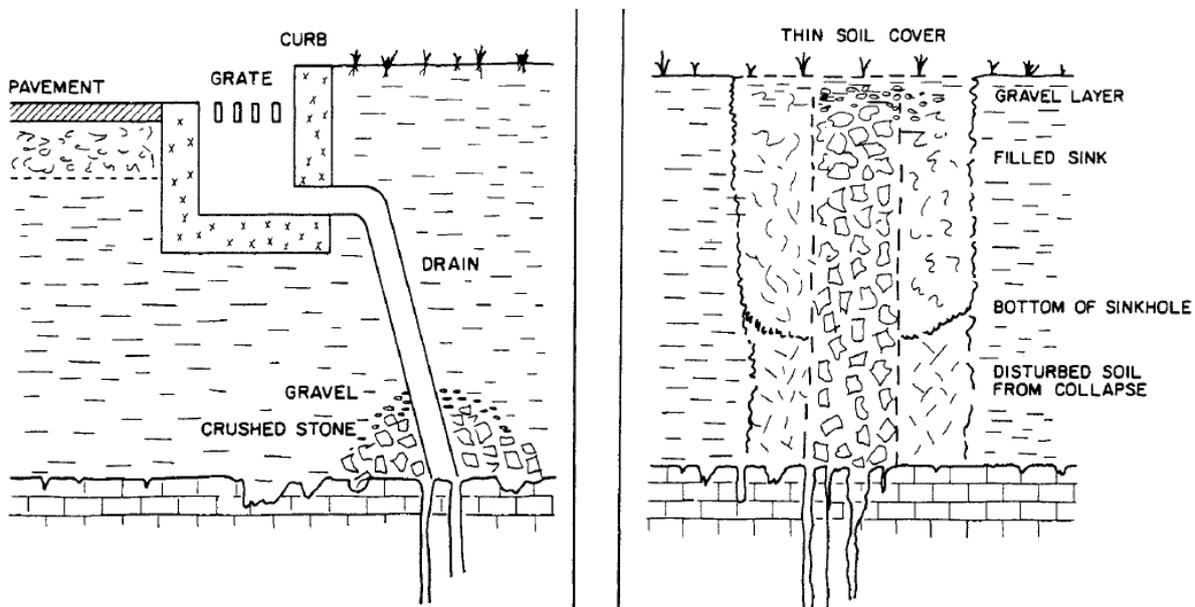


Illustration 11 - A gauche aménagement du drainage d'un secteur imperméabilisé (route, parking) vers un drain karstique ; à droite traitement d'un fontis permettant de préserver son rôle de drainage des eaux superficielles (d'après White et al. 1986)

Newton (1987) propose plusieurs solutions alternatives pour gérer les eaux de ruissellement : 1) sélection d'un site non karstifié pour la réinfiltration, 2) aménagement adapté pour protéger les structures et minimiser le risque, 3) acceptation du risque et des conséquences potentielles. L'aménagement adapté couvre les aspects suivants en fonction du contexte : ancrer les fondations dans la roche saine, cimenter les vides présents dans la formation rocheuse, paver les parkings, drainer les écoulements de surface par des fossés étanches, décapage de la couverture meuble pour supprimer le soutirage, etc.

Le drainage des eaux de surface doit être réalisé avec l'objectif d'éviter l'infiltration au travers des formations superficielles couvrant la formation karstifiée (Waltham et al. 2005) : l'eau doit soit être drainée hors des zones à enjeu soit ré-infiltrée directement dans la formation karstifiée par des ouvrages construits de manière adéquate (Illustration 8). L'aménagement du terrain doit permettre d'éviter l'accumulation d'eau en certains points. Tous les drains (tuyaux, canaux) traversant la zone à enjeux doivent être étanches de même que les bassins de rétention (Waltham et al. 2005). De la tuyauterie flexible est à préconiser pour éviter leur fissuration et les fuites qui en découlent.

Les dépressions naturelles (dolines) peuvent être utilisées pour la ré-infiltration des eaux à condition qu'elles soient aménagées de manière adéquate en décapant la dépression jusqu'au rocher et en s'assurant du piégeage des débris et autres matériaux solides transportés par l'eau avant infiltration (Waltham et al. 2005).

Zhou & Beck (2008) présentent différents schémas de traitement des effondrements. Si la cause est l'eau d'infiltration, la meilleure prévention est évidemment d'éviter les infiltrations futures. Si une telle option n'est pas applicable il s'agit alors d'aménager la structure du terrain qui reçoit les infiltrations ou de renforcer la solidité des terrains. L'objectif final est d'éliminer ou en tout cas de réduire fortement l'érosion interne. La stratégie de traitement doit être adaptée au site et il faut également prendre en compte l'aspect de la protection de la ressource en eau souterraine (périmètres de protection). Quel que soit le traitement, trois étapes se succèdent : traitement de la cavité au toit du karst, remplissage de l'effondrement, construction d'une couverture en surface (couche d'argile puis terre végétale).

Le CSN Karst working group (2009) présente une remédiation d'effondrement apparu lors de développements en zone karstique en 4 étapes : 1) déclaration de l'apparition (notification), 2) investigation (inspection visuelle, excavation, sondages, géophysique), 3) stabilisation (taille des matériaux décroissant vers le haut, éviter la cimentation), 4) couverture finale (peu perméable pour limiter l'infiltration, topographie positive).

Stephenson et al. (1999) montrent un exemple de gestion des eaux de ruissellement d'une autoroute en région karstique (Tennessee, Etats-Unis) et une solution de ré-infiltration et traitement dans une doline aménagée (Illustration 12).

Gutierrez et al. (2014) proposent une liste d'actions permettant de limiter les infiltrations : contrôle de l'irrigation, infiltration de l'eau directement dans le karst par des puits (court-circuitant la couverture meuble), étanchéification des canaux, drains et fossés, utilisation de tuyaux flexibles et joints télescopiques, drainage des terrains hors de la zone karstifiée, réduction de l'infiltration avec des géomembranes.

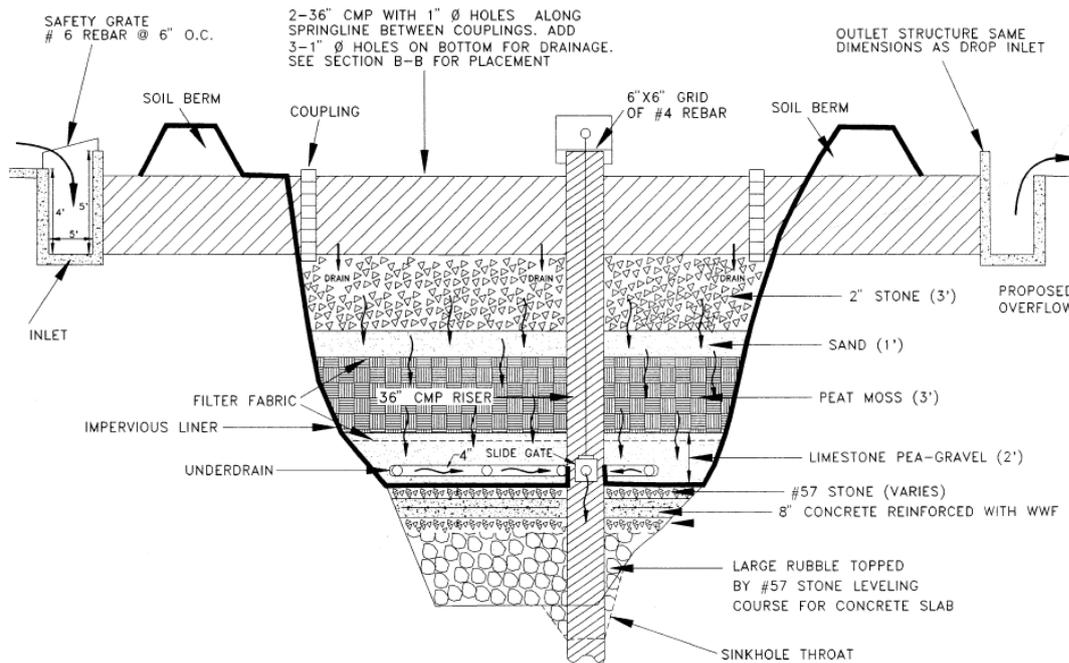


Illustration 12 – Design d'un système de traitement des eaux de ruissellement d'une autoroute et réinjection concomittante à la nappe par le biais d'une doline aménagée (Tennessee, Stephenson et al. 1999)

## 2.7. PRECONISATIONS EXISTANTES

En **France**, un guide méthodologique pour l'élaboration de cartes de zones réglementaires pour la géothermie de minime importance réalisé récemment (Herbaux et al. 2015) mentionne la possibilité d'affaissement/effondrement lié à la présence de karst soit lors de la réalisation de forages, soit par mise en communication d'eau superficielle avec la nappe karstique. Il est proposé de réaliser la cartographie des secteurs à aléa avéré en s'appuyant 1) sur des cartes d'aléa mouvement de terrain existantes, 2) sur la base de données nationale cavités et de les mettre en relation avec les cartes géologiques.

En **Belgique**, la Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine (DGATLP) du gouvernement de Wallonie a publié un document donnant des préconisations pour l'aménagement du territoire en contexte karstique (notion de contraintes karstiques) (Kaufmann et al. 2005). Dans ce document, un chapitre intitulé « Mitigation - Diminution de la vulnérabilité en fonction de l'aléa » énumère un certain nombre d'approches à privilégier avant construction :

1. exiger des données géotechniques importantes et intensives ;
2. optimiser le lieu d'implantation du projet sur le site;
3. corriger ou limiter les défauts qui sont présents ;
4. utiliser des fondations superficielles ou profondes, modifiées pour surmonter au mieux les défauts géologiques ;
5. minimiser la future activation des défauts ;
6. optimiser les charges de la nouvelle construction en valeur et en répartition ;
7. combiner certaines de ces approches, en raison de l'incertitude du phénomène.

Le point 5, « minimiser l'activation », est essentiellement focalisé sur la gestion des infiltrations d'eau : « il est habituellement prudent d'essayer de minimiser les effets de l'érosion, source de développement des effondrements. En effet, l'eau est un catalyseur dans le mécanisme de l'apparition d'effondrement dans les terrains karstiques. Il est donc essentiel que les infiltrations intensives d'eau dans le sol soient évitées à tout moment et, également, durant la construction ». Les précautions à prendre sont indépendantes du type de fondations choisies. On peut notamment citer :

- aménager le site de manière à ce que les infiltrations intensives et engorgements d'eau soient évités : les aires de parkings et zones non couvertes entre les bâtiments doivent être recouvertes ;
- vérifier les canalisations à intervalles réguliers en ce qui concerne les éventuelles fuites. Là où de larges dépressions sont attendues, ces canalisations doivent être (au choix) : a) flexible, b) rigides et renforcées, c) sur poutres rigides ou, dans les zones critiques, les canalisations doivent être situées au-dessus du sol ;
- les canalisations des eaux de ruissellement doivent être dirigées en dehors de la zone critique et évacuées plus loin que la zone de développement ;
- les liquides utilisés pour la construction doivent être retenus par une membrane imperméable sous la structure afin d'éviter les infiltrations dans le sous-sol. Des drains sous la structure permettront d'évacuer ces liquides jusqu'à un réseau d'égout ;
- les variations du niveau piézométrique de la nappe phréatique doivent être contrôlées, tout particulièrement en ce qui concerne les abaissements.

Il est ensuite souligné que l'implantation d'un système de drainage et le maintien d'un site à granulométrie continue durant et après la construction sont les meilleures mesures préventives contre l'apparition d'effondrement. Différents schémas de traitement et comblement des effondrements en fonction de leur géométrie sont en outre présentés dans le rapport. Ces précautions sont relayées dans le permis de lotir (PL).

En **Afrique du Sud**, un décret de 1965 pose le cadre légal pour les projets de développement urbain dans la province du Transvaal et fait explicitement référence au contexte des dolomies karstifiées et risques d'effondrement. Ces contraintes réglementaires ont été généralisées à l'échelle du pays en 1995 (Van Schalkwyk 1998).

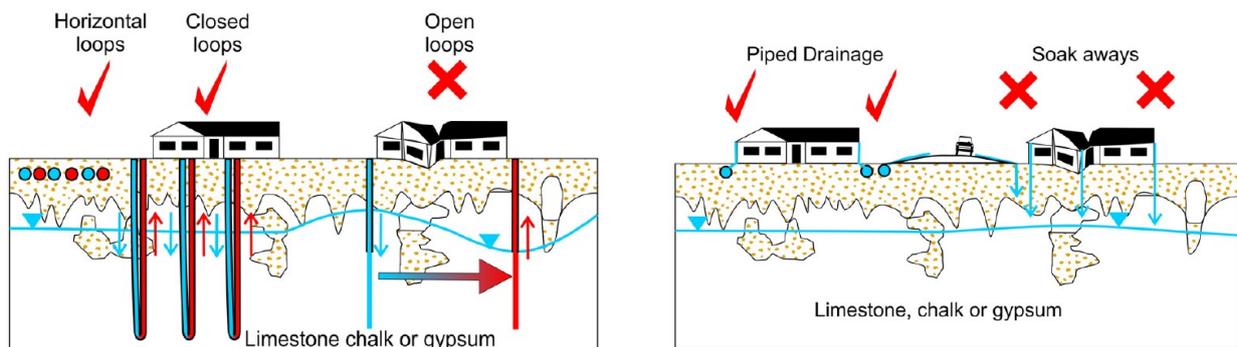
La mitigation du risque d'effondrement dans le contexte de dolomies karstifiées est réalisée en trois étapes (Buttrick et al. 2011) : 1) restrictions d'aménagement en fonction de la classe de susceptibilité à l'effondrement (8 classes définies), 2) s'assurer d'un développement adéquat, 3) exiger le respect de préconisations selon l'illustration 13. Le point focal est de limiter voire d'éviter les infiltrations d'eau.

Dolomite area designation <sup>a</sup>	Description
D1	No precautionary measures are required to support development.
D2	Only general precautionary measures that are intended to prevent the concentrated ingress of water into the ground are required to support development.
D3	Precautionary measures in addition to those pertaining to the prevention of concentrated ingress of water into the ground are required to support development, i.e., selection of pipe materials and joint type that minimizes joints, is impact resistant and flexible, wet services placed above ground, limitation on wet service entries to buildings, provision of water tight services, restrictions on the placement of wet services in the vicinity of buildings and the design of buildings in which people congregate, work or sleep to enable safe evacuation in the event of sinkhole formation.
D4	Precautionary measures described for dolomite area designation D3 are unlikely to reduce the hazard rating to tolerable levels so as to support development or are considered to be uneconomic or impractical to reduce the hazard rating to tolerable levels so as to support development.

<sup>a</sup> Dolomite area designations indicate the levels of precautionary measures required to support development. They relate to the precautionary measures required to improve the hazard rating associated with a parcel of land with a particular inherent hazard class to an acceptable level. In other words, they indicate what needs to be done to a parcel of land to support development

*Illustration 13 – Préconisations lors d'aménagements en fonction du contexte géologique (degré de karstification de la dolomie) (Buttrick et al. 2011)*

Au **Royaume-Uni**, le Service géologique national (BGS) a mis au point une base de données nationale de l'aléa effondrement lié au karst dénommée GeoSure (Cooper et al. 2011). Cette base est utilisée par les agences de l'environnement, les assurances et les entreprises de BTP. Dans les documents accompagnant cette base de données, il est déconseillé de réinjecter les eaux pluviales sans précautions dans les secteurs à aléa fort ; de même il est recommandé de proscrire les doublets géothermiques en système ouvert (Illustration 14).



*Illustration 14 – Aménagements à préconiser ou à proscrire (croix rouges) en contexte de fort aléa effondrement karstique (base GeoSure du Royaume-Uni) : à gauche doublets géothermiques, à droite gestion des eaux pluviales (Cooper et al. 2011)*

Aux **Etats-Unis**, à l'échelle nationale, Sasowsky et al. (2010) présentent une synthèse bibliographique sur la gestion des eaux pluviales en contexte karstique et les bonnes pratiques. Les quatre facteurs principaux permettant d'anticiper l'apparition d'effondrements sont l'épaisseur du recouvrement (inversement proportionnel), la densité d'effondrements s'étant déjà produits, la présence de failles et fractures et les conditions hydrogéologiques. Les approches privilégiées pour la gestion des eaux pluviales sont les bassins d'infiltration végétalisés (« cellules de biorétention »), les réservoirs pluviaux et les toits végétalisés. Ces pratiques ont l'avantage d'une part d'améliorer la qualité de l'eau et d'autre part de réduire la probabilité d'apparition d'effondrements.

En outre, plusieurs états ou gestionnaires de bassin dans les régions karstiques de l'est du pays ont publié des documents relatifs à la mitigation des effondrements :

- Le département Environnement de l'état de la Virginie de l'ouest a édicté des préconisations pour l'aménagement de dolines de manière à 1) limiter le risque d'effondrement, 2) favoriser l'infiltration, 3) limiter l'impact sur la qualité des eaux de la nappe karstique (West Virginia Department of Environmental Protection 2005).
- L'état du Maryland a édicté des recommandations pour l'aménagement en terrain karstique qui comprend une section sur la gestion des eaux pluviales. Il y est préconisé d'étanchéifier les structures (bassins de rétention, drains) et de rediriger autant que faire se peut les eaux en dehors des zones karstifiées (Maryland Stormwater Design Manual 2009).
- En Pennsylvanie, CH2MHill (1998) propose une liste de bonnes pratiques pour la réinfiltration des eaux pluviales dans le karst : choix circonstancié du site de réinfiltration, toit de la formation karstifiée franc, couverture perméable, niveau de la nappe karstique dans la couverture, éloignement des infrastructures, système de nettoyage de l'eau avant infiltration, piégeage des sédiments transportés par l'eau pluviale.
- Dans le bassin versant de Chesapeake Bay (côte Est), le CSN karst working group (2009) délimite des secteurs dénommés « stormwater hotspots » (Annexe 1) pour lesquels un certain nombre de mesures sont recommandées, en premier lieu pour limiter l'impact sur la qualité des eaux souterraines mais également pour limiter le risque d'effondrement : prévention de contamination dans les eaux pluviales, contrôle des volumes d'eau infiltrés, interdiction de réinfiltrer les eaux pluviales, etc.

## 2.8. SYNTHÈSE

En contexte carbonaté<sup>4</sup>, même si les effondrements induits par le rabattement de la nappe karstique par pompage constituent la plus grande part des effondrements induits à l'échelle internationale (Newton 1987, Waltham et al. 2005, Illustration 1 & Illustration 2), ce facteur déclencheur semble très peu présent en France d'après le retour d'expérience présenté au chapitre 3 et les informations collectées dans l'étude précédente (Perrin et al. 2014). Il faut cependant mentionner le rôle des battements naturels de la nappe dont l'amplitude pourrait être exacerbée par le changement climatique ; le développement de nouveaux prélèvements des ressources en eau souterraine karstiques par pompage pourrait également à l'avenir avoir des conséquences sur l'apparition de désordres en contexte de karst sous couverture.

---

<sup>4</sup> Pour rappel (§ 2.1), cette étude bibliographique s'intéresse uniquement aux karsts en contexte carbonaté.

Le rôle des perturbations physiques du sol (déforestation, remblais) est également évoqué dans la bibliographie mais son rôle apparaît comme secondaire par rapport aux pompages et infiltrations induites. Conformément au cahier des charges de la présente étude, l'analyse bibliographique s'est donc focalisée sur les autres facteurs déclencheurs, en particulier les aménagements concentrant les eaux en surface (drains, conduites, bassins de rétention, canaux) et les forages. Plusieurs études montrent le rôle de ces aménagements dans l'apparition de désordres, en particulier en contexte de karst sous couverture meuble.

Les traitements des effondrements doivent viser à éviter l'infiltration des eaux de surface au travers des formations superficielles couvrant la formation karstifiée, soit par une dérivation étanche hors zone, soit par un aménagement court-circuitant la couverture.

Des textes réglementaires, des préconisations sous forme de guide méthodologique ou encore des bases de données géographiques ont été mises en place dans les pays occidentaux particulièrement impactés par les effondrements karstiques ; ces documents reprennent en règle générale des concepts similaires : identification des secteurs à risques, contrôles des infiltrations, installation de drains/conduites étanches, interdiction de certains types d'aménagements et limitation des rabattements de nappe.



## 3. Retours d'expérience

### 3.1. METHODOLOGIE

L'approche a consisté en la mise au point d'un questionnaire de retour d'expérience (Annexe 2), testé en interne puis consolidé pour une diffusion externe auprès de différents organismes (CEREMA, INERIS, administrations départementales), bureaux d'étude et experts nationaux du karst. De plus une recherche par mots-clés de rapports BRGM pouvant correspondre à la problématique a été effectuée.

Chaque retour d'expérience est classé dans un dossier numéroté (fiche). En année 2 du projet, ces fiches seront basculées sur un serveur du Ministère afin de faciliter les échanges avec le CEREMA et l'INERIS.

Au 1<sup>er</sup> décembre, les réponses obtenues restent partielles et des relances sont en cours ; comme convenu en comité de pilotage, la collecte et l'analyse des retours d'expérience seront finalisées en année 2 du projet. Les résultats présentés dans ce chapitre sont donc provisoires.

### 3.2. ANALYSE DES RETOURS D'EXPERIENCE

Un tableau de synthèse des retours d'expérience collectés au 1<sup>er</sup> décembre 2015 est présenté en Annexe 3. A ce jour 63 retours d'expérience ont pu être réunis et analysés.

#### 3.2.1. Analyse de la nature des retours d'expérience

La plupart des retours d'expériences sont issus du BRGM (46 fiches, soit 73%<sup>5</sup>) et concernent soit des interventions d'urgences (sécurités des biens et des personnes potentiellement mises en cause), soit les traitements de demandes de classement au titre des catastrophes naturelles. Il s'agit donc généralement d'analyses réalisées par un expert en risques naturels, sur la base des documents disponibles et d'une visite de terrain. Ces analyses sont rarement accompagnées d'investigations géotechniques, ce qui peut souvent limiter la bonne compréhension du phénomène et conduire parfois à un diagnostic fait de plusieurs hypothèses. La plupart du temps, ce travail s'achève à la livraison d'un rapport : il est ainsi rare de savoir si les recommandations qui y sont préconisées ont réellement été réalisées et encore moins d'en connaître le résultat.

Seuls 3 retours d'expérience (fiches 12, 39, 58) sont relativement complets depuis le constat initial jusqu'à sa remédiation en passant par une investigation détaillée du site.

#### 3.2.2. Répartitions géographique et géologique

La répartition spatiale des retours d'expérience montre le plus d'exemples en Haute Normandie (27 cas) puis en Franche-Comté (Doubs - 8 cas - et Haute Saône – 3 cas) et en Gironde (4 cas) (Illustration 15). Cette distribution est indicative car elle est évidemment influencée par les réponses obtenues qui ne sont que partiellement représentatives. Sur les 63 cas répertoriés, 52 correspondent à des effondrements, 8 à des affaissements et 3 cas comptent à la fois des affaissements et des effondrements.

---

<sup>5</sup> Les autres retours d'expériences proviennent de bureaux d'étude (6 fiches), du CEREMA (4 fiches), du CG25 (3 fiches), du CG70 (2 fiches), de la DDT76 (2 fiches)

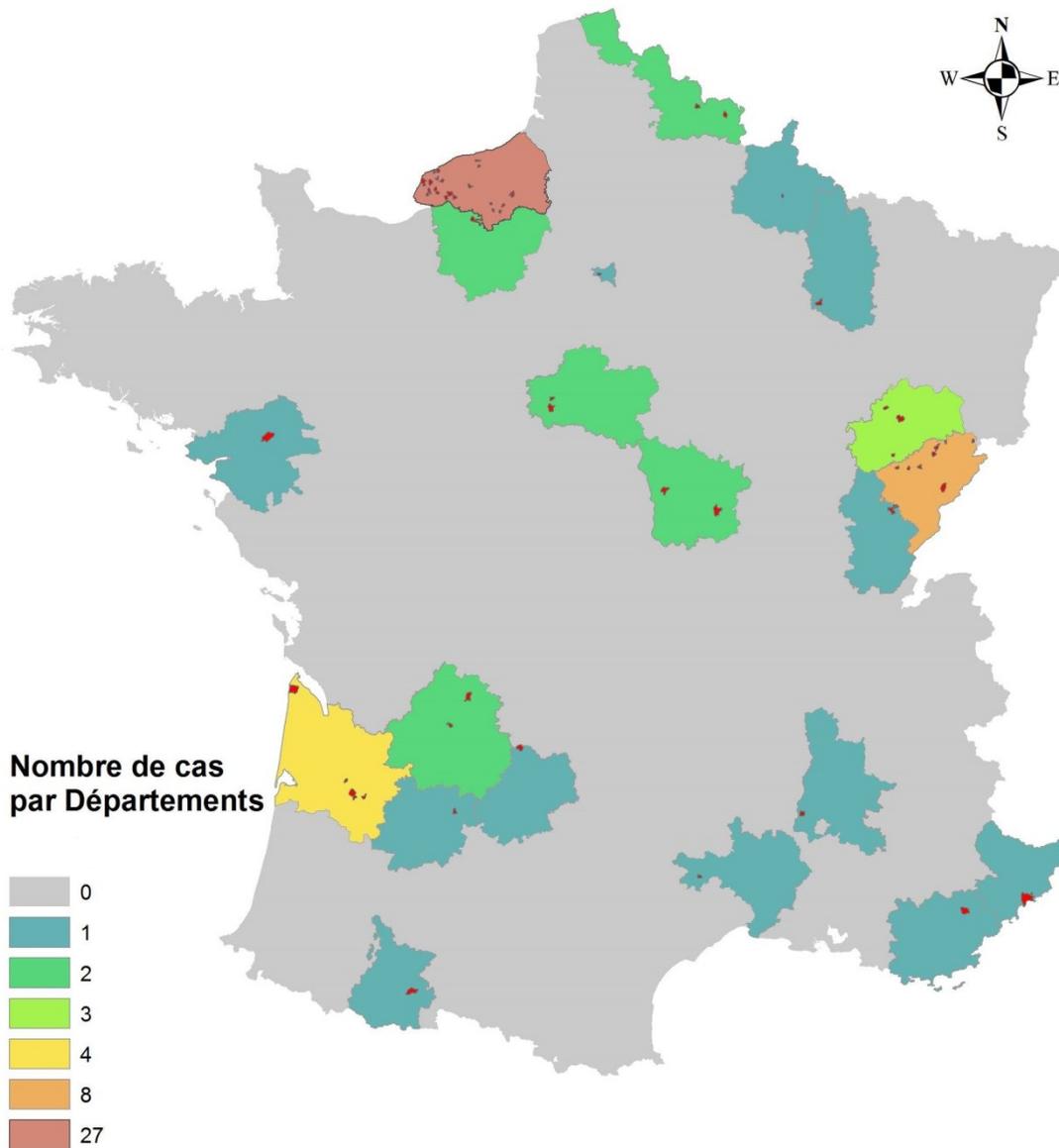


Illustration 15 – Carte à l'échelle nationale montrant le nombre de retours d'expérience obtenus par départements et les territoires communaux concernés (en rouge)

Un nombre équivalent de retours d'expérience a été collecté pour le contexte calcaire et le contexte de la craie (30 chacun) ; par contre seuls 3 retours d'expérience ont été obtenus pour le contexte du gypse (Illustration 16).

La majorité des cas répertoriés dans le calcaire ou la craie se situe en contexte de karst sous couverture (51 cas, 81%), le karst nu ne correspondant qu'à 5 cas et le karst de contact à 4 cas (Illustration 17). Ces trois types de contexte karstique avaient été introduits lors de la réflexion sur la méthodologie de cartographie de la susceptibilité à l'effondrement en contexte karstique calcaire (Perrin et al. 2014). Il avait été montré la faible susceptibilité du contexte de karst nu. Ce constat reste valide en ce qui concerne l'impact des aménagements, avec peu de retours d'expérience en karst nu, même si les résultats sont partiels. Il convient de pondérer les résultats avec les superficies respectives couvertes par ces types de karst à l'échelle nationale (les karsts de contact couvrent de très faibles superficies à l'interface entre karst nu et sous couverture) et également avec la densité d'aménagements (les karsts nus se trouvant plutôt en

relief dans des secteurs peu aménagés au contraire des karsts sous couverture). Tous les exemples du contexte de la craie correspondent à des karsts sous couverture, la couverture étant constituée par les argiles à silex (altérites de la craie) et pour un certain nombre de cas de limons des plateaux. Tous les exemples de karst nu et karst de contact correspondent au contexte calcaire.

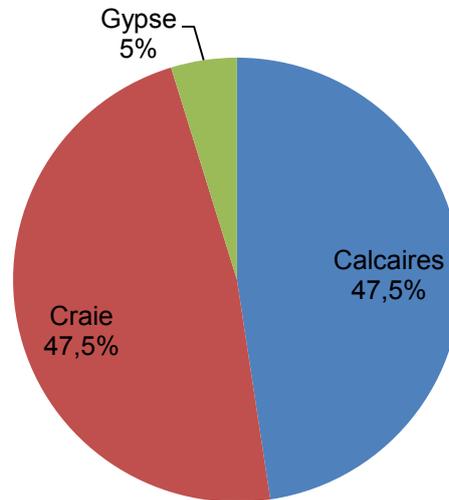


Illustration 16 – Répartition des retours d'expérience par contexte géologique (30 exemples dans le calcaire et la craie et 3 exemples dans le gypse)

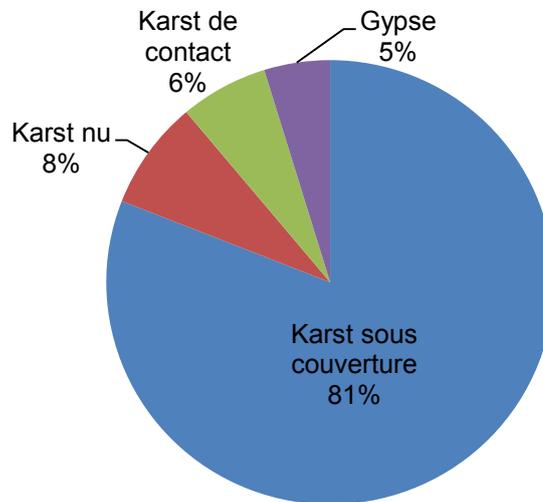


Illustration 17 – Répartition des retours d'expérience par contexte karstologique

### 3.2.3. Répartition temporelle

A l'exception des désordres décrits par Toulemon (1987) au nord de Paris, tous les désordres pour lesquels une année d'apparition a été communiquée (45 cas) sont apparus entre 1992 et 2015. Pour seulement 32 cas, le mois d'apparition est connu avec une répartition relativement homogène sur l'année (Illustration 18).

Les années d'aménagement ne sont connues que pour 11 cas : l'écart entre date d'aménagement et apparition du désordre est très variable puisque il s'étale entre plus de 100 ans et moins d'un an (voire immédiat dans le cas de forages).

Mois d'apparition	Nombre de cas
Janvier	2
Février	0
Mars	3
Avril	1
Mai	3
Juin	4
Juillet	3
Août	2
Septembre	1
Octobre	4
Novembre	4
Décembre	5

Illustration 18 – Répartition de l'apparition des désordres en fonction des mois

### 3.2.4. Répartition par types d'aménagement

Sur la base des retours d'expérience, 6 catégories d'aménagements à l'origine des désordres ont pu être distingués (Illustration 19) :

Les bassins de rétention correspondant à tout type d'aménagement hydraulique visant à collecter et stocker des eaux de surface (bassin de collecte d'eau pluviale, bassin de STEP, bassin de lutte contre les inondations, bassin de collecte d'eau de ruissellement issue de surfaces imperméabilisées, etc.) ;

Les conduites enterrées pouvant collecter différents types d'eau (ruissellement, eau potable, eaux usées, etc.) ;

Les puits et forages correspondant à tout type d'ouvrage creusé/foré verticalement depuis la surface pour différentes finalités (puisards de réinfiltration d'eau pluviale, forage d'eau, installation de piézomètres, etc.) ; ces ouvrages peuvent avoir différentes profondeurs (quelques mètres à 35 mètres) et diamètres (10-15 cm à quelques mètres) ;

Les fossés de drainage correspondant à des fossés linéaires non étanchés creusés le long de surfaces imperméabilisées (routes, parkings, terrains peu perméables) et ayant pour fonction d'évacuer les eaux de ruissellement ;

La dérivation de cours d'eau correspondant à un aménagement hydraulique visant à canaliser tout ou partie du débit d'un cours d'eau naturel ; le débit peut être temporaire ou pérenne et aucune distinction n'est faite sur la magnitude des débits ;

Les pompages regroupant les cas où l'apparition de désordres est attribuée au moins en partie à la baisse du niveau piézométrique de la nappe karstique par l'effet du pompage.

Pour trois retours d'expérience, l'aménagement n'a pas pu être catégorisé (catégorie « Autres ») : une cuve enterrée, une piscine et une station de lavage. Ces trois aménagements amènent à une concentration d'eau en surface ou proche surface.

Dans certains exemples, plus d'une catégorie d'aménagements est indiquée comme cause du désordre ; dans ce cas, l'aménagement indiqué comme étant la cause principale a été retenu pour l'analyse.

Il convient aussi d'indiquer que, dans un certain nombre de cas, la cause du désordre est imputée seulement en partie à l'aménagement et des causes naturelles sont aussi évoquées.

L'illustration 19 montre que les bassins de rétention sont les plus représentés avec 24 cas (40% des 60 cas), suivent les conduites enterrées et les puisards/forages (10 cas chacun, 17%), les fossés de drainage (9 cas, 15%), les dérivations de cours d'eau (4 cas, 6%) et finalement les pompages (3 cas, 5 %). On note une prédominance des bassins de rétention en contexte crayeux alors qu'en contexte calcaire on trouve une assez bonne répartition des différents types d'aménagements.

	Calcaire	Craie	Gypse	Total
Bassins de rétention	7	17	0	<b>24</b>
Conduite enterrée	3	5	2	<b>10</b>
Puisard/forage	6	4	0	<b>10</b>
Fossé de drainage	7	2	0	<b>9</b>
Dérivation cours d'eau	4	0	0	<b>4</b>
Pompage	2	0	1	<b>3</b>
Autres	1	2	0	<b>3</b>

Illustration 19 – Nombre de retours d'expérience par types d'aménagement et par contexte géologique

### 3.2.5. Dimensions des désordres et processus physiques

Concernant les dimensions des effondrements et affaissements, les diamètres ne sont pas connus pour 11 cas et les profondeurs pour 14 cas. Les trois exemples dans le gypse se distinguent par leurs dimensions importantes avec pour l'exemple d'Aubervilliers des diamètres compris entre 2 et 13 m et des profondeurs entre 3 et 18 m ; dans le cas de la colline de Cimiez (ville de Nice), l'effondrement mesurait 6 m de diamètre et 25 m de profondeur ; finalement dans la ville de Bargemon, les affaissements peuvent atteindre jusqu'à 80 m de circonférence.

Pour les exemples en contexte calcaire ou crayeux, les désordres ont en général des diamètres inférieurs à 10 m à l'exception de 5 cas et des profondeurs inférieures à 7 m (Illustration 20). On ne note pas de différences notables entre les tailles de désordres apparus dans la craie ou le calcaire avec toutefois des désordres un peu moins profonds en contexte de craie (à confirmer par plus de données). Par rapport aux dimensions d'effondrements répertoriés dans le cadre de l'étude sur la susceptibilité à l'effondrement (Perrin et al. 2014), il semblerait que les effondrements causés par des aménagements puissent avoir des dimensions plus importantes. Cette tendance nécessite toutefois d'être vérifiée en année 2 sur un plus grand nombre d'exemples.

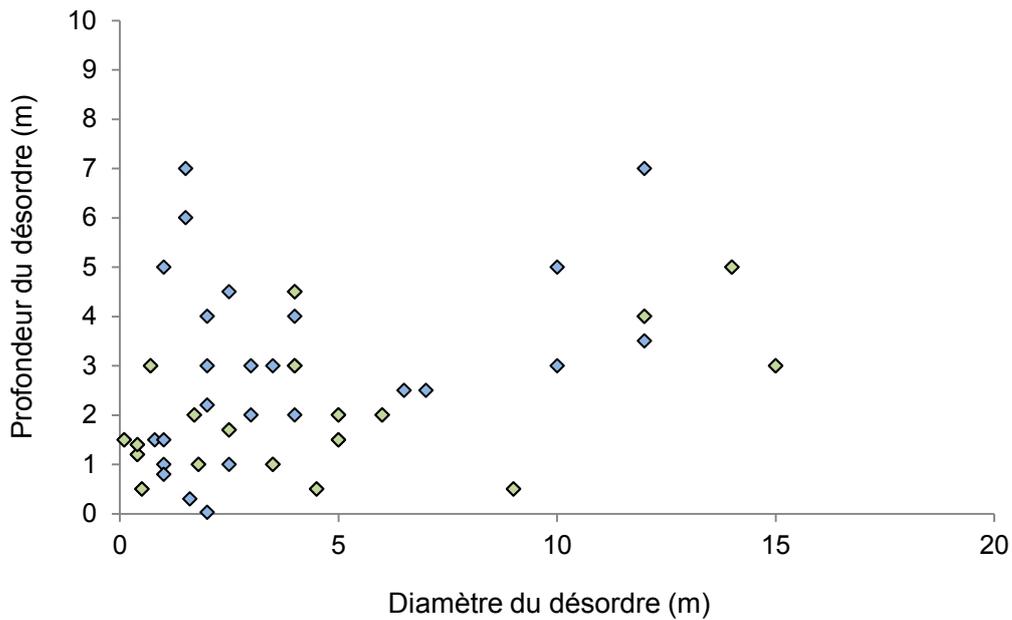


Illustration 20 – Diamètres et profondeurs des effondrements/affaissements en contexte de carbonaté ; en vert désordres dans le contexte de la craie, en bleu désordres dans le contexte calcaire

En ce qui concerne les processus physiques menant à l’effondrement décrits dans les retours d’expérience, on note la prédominance du soutirage (46 cas) suivi du débouillage dans 9 cas (incluant 3 des 5 exemples en karst nu) ; dans 5 cas la distinction entre débouillage ou soutirage n’a pas pu être faite et finalement, pour le contexte du gypse, on note 1 cas attribué à la dissolution et 2 cas au soutirage associé à la dissolution.

### 3.2.6. Traitements préconisés et réalisés

Les préconisations pour traiter les désordres sont connues pour 41 des cas. Le traitement préconisé pour un cas peut comprendre plusieurs étapes telles que comblement, réparation des conduites puis imperméabilisation ; ces différentes étapes sont toutes comptabilisées dans l’analyse des fiches. Le nombre des différents traitements préconisés est le suivant :

1. Comblement (pouvant inclure une purge préalable) : 19 cas
2. Drainage hors zone impactée : 9 cas
3. Imperméabilisation de la zone impactée : 9 cas
4. Canalisation/maîtrise des écoulements : 5 cas
5. Etudes complémentaires (sondages, géophysique, etc.) : 8 cas
6. Réparation des conduites : 5 cas
7. Stopper les infiltrations : 3 cas (peut correspondre à 2, 3 ou 4)

Les traitements et mesures réalisées sont connus pour 29 retours d'expérience se répartissant comme suit :

1. Comblement : 13 cas
2. Etudes (sondages, diagnostic karst, géophysique) : 6 cas
3. Comblement et imperméabilisation : 5 cas
4. Canalisation des écoulements : 3 cas
5. Comblement, imperméabilisation et drainage hors zone : 1 cas
6. Soutènement : 1 cas

Les comblements sont en général réalisés avec des matériaux perméables afin de maintenir l'infiltration et en utilisant un grano-classement (matériaux grossiers au fond et fins en surface).

Le retour d'expérience de Thiviers communiqué par le CEREMA (F. Clément, fiche 58) donne un exemple détaillé de traitement de désordres survenus sur et à proximité de la chaussée d'une route nationale (voir section 3.2.7).

### **3.2.7. Description de cas représentatifs**

Dans cette section, une description plus détaillée de cas représentatifs de chacune des catégories d'aménagement les plus impactantes est proposée ; cette description se base sur les fiches retour d'expérience, des échanges informels avec les intervenants sur les dossiers et des rapports et publications. Ces cas pourront servir en année 2 pour l'analyse détaillée des processus.

#### ***Bassins de rétention en Haute Normandie***

Au total, 15 retours d'expérience de Haute Normandie sont associés à des effondrements dans des bassins de rétention. Ces bassins peuvent être soit des aménagements de lutte contre les inondations (12 cas) soit des bassins de STEP (3 cas). Ces résultats corroborent l'étude de David et al. (2010) sur l'aménagement des bétoires en Haute Normandie, dans laquelle on trouve les informations suivantes :

*« N. Topin a recensé 73 STEP touchées par la présence de bétoires pouvant apparaître au niveau d'une lagune, d'une aire d'infiltration, d'un fossé ou d'une mare situés sur le trajet de l'eau rejetée (...) Dans son recensement de 2001, l'AREAS<sup>6</sup> a noté que sur 413 ouvrages de lutte contre les inondations recensés, 62 avaient connu une ouverture de bétoires (15%), c'est-à-dire des bétoires ouvertes dans le fond de la rétention ou même sous le corps de digue ».*

La répartition spatiale de ces désordres est donnée Illustration 21 et Illustration 22.

Ce rapport détaille les différents types d'aménagements de bétoires existants en distinguant dispositifs étanche ou infiltrant (Annexe 4) et propose des préconisations pour ces aménagements : *« la préconisation d'aménagement est délicate car chaque situation est particulière et nécessite une solution adaptée dont le choix découlera des résultats de l'étude préalable. (...) Deux grands principes sont à respecter : 1) l'aménagement de la bétoire est indissociable des aménagements de versant qui visent à réduire le ruissellement et à ralentir le ruissellement résiduel, 2) quel que soit le risque contre lequel l'aménagement est réalisé (hydraulique, hydrologique, géotechnique), il convient de s'assurer que l'aménagement retenu préserve la qualité de la ressource en eau. »*

---

<sup>6</sup> Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols

Les préconisations de traitement faites pour le cas de bétoires à proximité ou sous des infrastructures est donné Annexe 4.

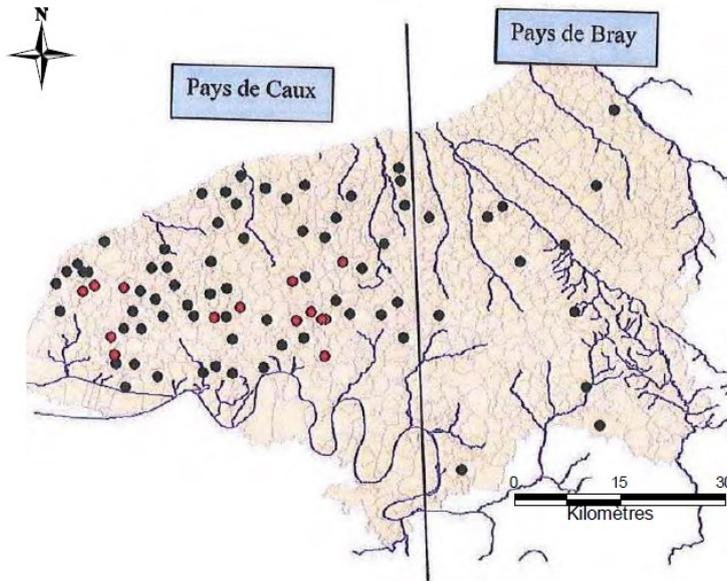


Illustration 21 – Localisation des 73 STEP touchées par la présence de bétoires (les points rouges correspondent à des sites étudiés plus en détail) (d'après Topin 2007)

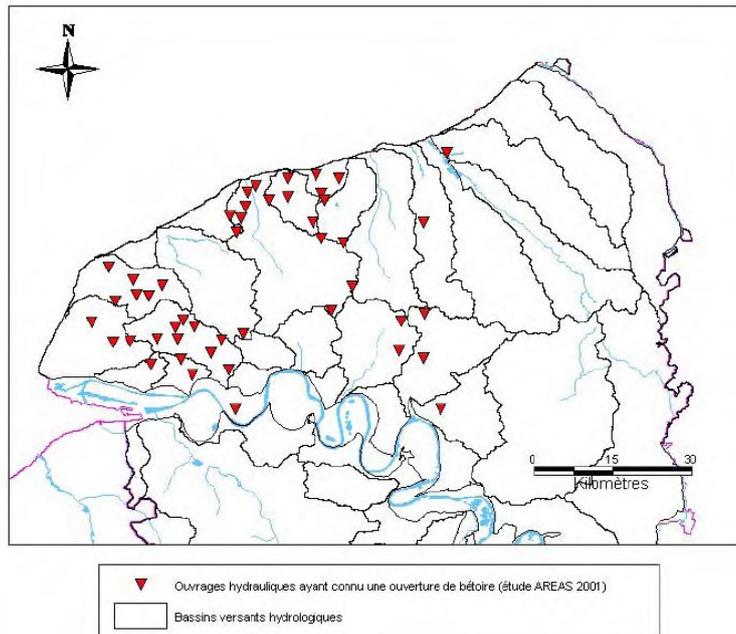


Illustration 22 – Localisation des 62 ouvrages de lutte contre les inondations (bassins de rétention) impactés par une ouverture de bétoire (David et al. 2010 d'après étude AREAS 2001)

### Dérivation de cours d'eau : Canal de la Neste

Le canal de la Neste, situé dans les Hautes Pyrénées, est un canal d'irrigation d'une longueur de 28 kilomètres qui alimente 17 rivières des coteaux de Gascogne. Sa construction s'est étalée de 1848 à 1862. Aux alentours de 1950, sa capacité a été portée de 7 à 14 m<sup>3</sup>/s.

Au niveau de la commune de Hèches, le canal traverse un contexte de karst sous couverture : les calcaires karstifiés sont Aptien-Albien (faciès Urgonien) et la couverture, d'une épaisseur de 15-20 m, est constituée d'alluvions et colluvions à perméabilité variable.

A proximité immédiate du canal, un certain nombre d'affaissements se sont produits : 21 désordres ont été recensés dans une étude pour un projet de PPR (Bouroullec 2014) (Illustration 23). L'évènement le plus marquant remonte à 1982 lorsque le canal s'est effondré sur 50 m, ce qui a nécessité sa reconstruction sous la forme d'un pont-aqueduc. Ces désordres peuvent être imputés à des fuites d'eau du canal qui favorisent le soutirage des matériaux de couverture, résultant en une déstabilisation des terrains de surface. Les enjeux impactés sont les infrastructures (canal et routes) et le bâti, avec le cas le plus récent correspondant à plusieurs affaissements pluri-métriques dans le village (intervention du BRGM en Novembre 2014) (Illustration 24).

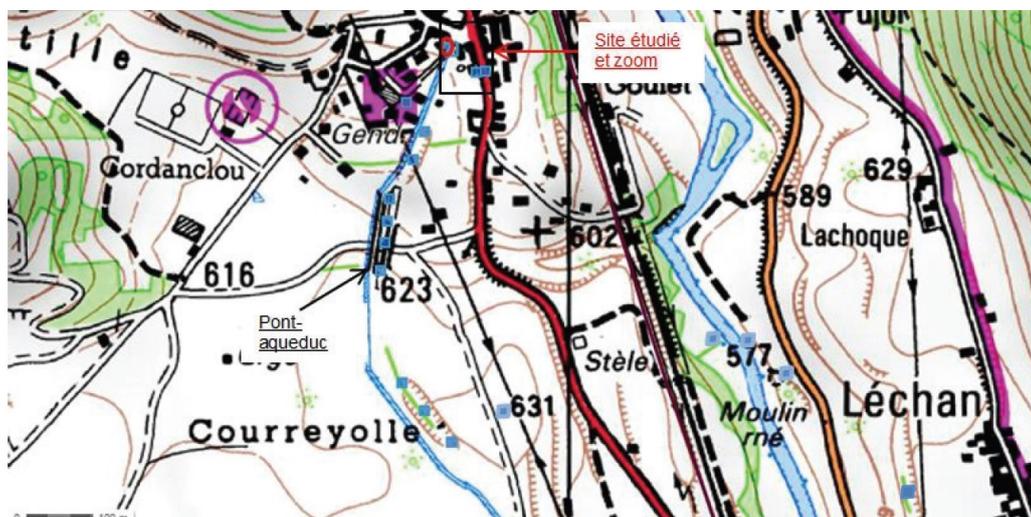


Illustration 23 – Carte montrant le tracé du canal de la Neste et les désordres recensés dans le cadre d'un projet de PPR (carrés bleus) (Bouroullec 2014)

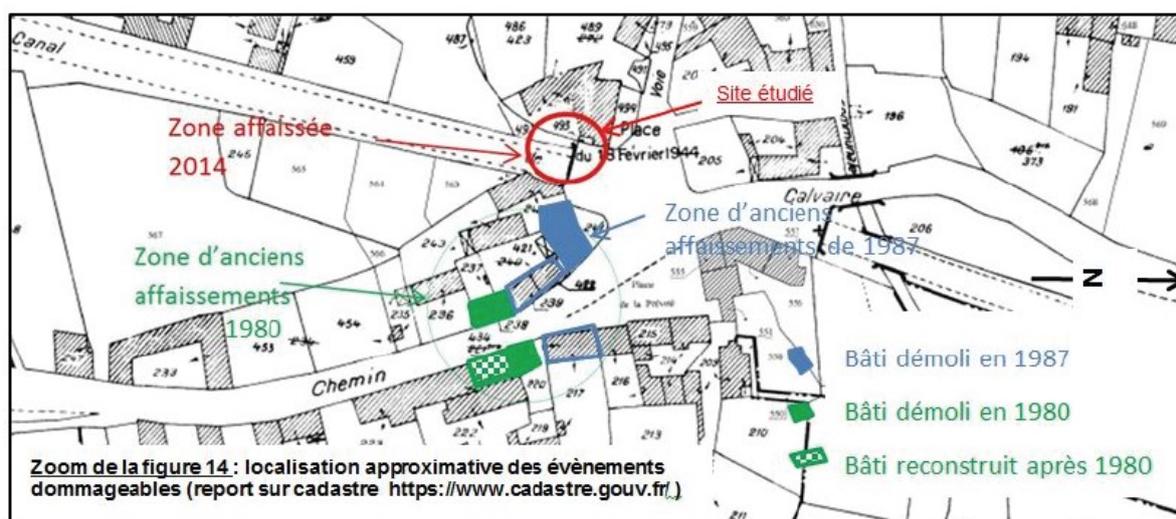


Illustration 24 – Impact des désordres sur le bâti du village de Hèches ; les désordres se situent à proximité immédiate du canal de la Neste (Bouroullec 2014)

**Fossé de drainage et conduites : Thiviers** (informations fournies par F. Clément, CEREMA-Bordeaux)

Le substratum du secteur d'étude est constitué par des calcaires du Sinémurien à fines interstrates marneuses passant latéralement à des grès dolomitiques du Pliensbachien. Ces formations karstifiées sont couvertes de produits d'altération (argiles et sables argileux rouges) et également de formations détritiques récentes ; l'épaisseur de cette couverture est très variable (2 m en moyenne). La nappe karstique est située à une vingtaine de mètres de profondeur au droit du site. Des nappes perchées locales peuvent exister au sein des altérites.

Plusieurs effondrements se sont produits dans le secteur (Illustration 25) ; les effondrements étudiés sont celui survenu en accotement Est de la RN 21 le 6 décembre 2012 et celui apparu le 14 décembre 2012 en accotement Ouest de la chaussée.

L'origine de ces désordres est imputée à un soutirage des matériaux de couverture par infiltration d'eau de ruissellement dans les cunettes enherbées (infiltration lente dans les terrains en accotement de chaussée). Il est envisagé que le soutirage ait pu causer la fissuration de la canalisation AEP suite à un léger affaissement, accélérant de fait le processus d'entraînement des matériaux dans les terrains karstiques sous-jacents ; l'effondrement proprement dit a ensuite conduit à la rupture totale de la canalisation AEP. La taille des désordres est de 0.8 m de diamètre pour 1.5 m de profondeur. Leur apparition a nécessité la fermeture temporaire de la route nationale et un traitement d'urgence.

Pour cette opération, une solution de confortement a été adoptée par réalisation d'un bouchon granulaire qui comprend (Illustration 26) :

- la purge des matériaux instables de la zone effondrée à l'aide d'une pelle mécanique, afin de dégager et visualiser les pertes karstiques ;
- la pose d'un géotextile anticontaminant en fond de fouille ;
- un comblement du fond à l'aide d'enrochement composé de blocs de 500 à 1000 kg non friables et sans cohésion (roche saine dégagée de toute gangue) ;
- un remplissage de la partie supérieure avec des blocs et/ou des graves de  $D_{max} = 600$  mm et recouvrement par le géotextile ;
- préalablement à la réalisation de la couche de surface et à son imperméabilisation, la mise en œuvre d'un béton cyclopéen avec blocs rocheux  $D_{max} = 600$  mm, sur environ 1,5 m d'épaisseur.



Illustration 25 – Localisation des principaux effondrements apparus sur le secteur d'étude (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA)

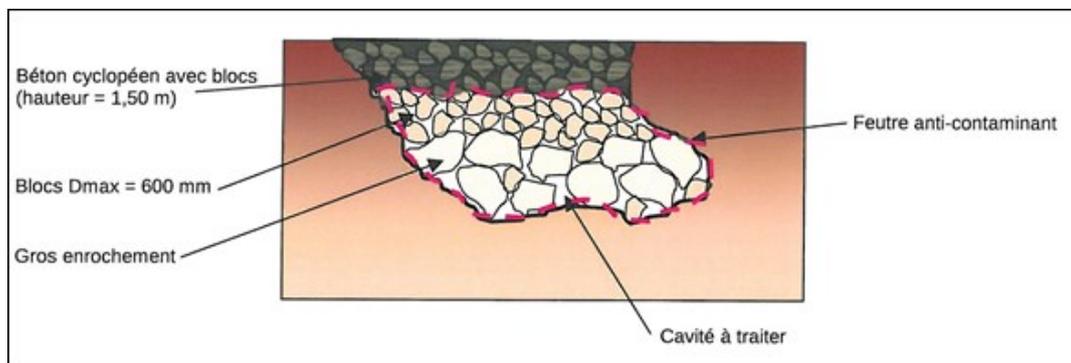


Illustration 26 - Schéma de principe du traitement des effondrements par comblement en matériaux granulaires (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA)

### **Puisards et ruissellement : Bonnevent-Veloreille**

La commune de Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) est située dans un contexte de karst de contact où des marnes et marno-calcaires en amont sont mises en contact par une faille avec les calcaires karstifiés du Dogger (Bajocien et Bathonien) (Illustration 28).

Le ruissellement issu du versant marneux et du réseau pluvial était directement infiltré dans le terrain par des ouvrages (puisards) construits anciennement. Cette gestion des eaux de ruissellement a au moins en partie contribué à l'apparition de désordres impactant le bâti et la

route départementale (Illustration 28). L'apparition de ces désordres est répartie entre 1993 et 2008 avec des tailles d'effondrement pouvant atteindre 2 m de diamètre et 3 m de profondeur (Bayle 2008).

Si les importants problèmes de Bonnevent (point n°1 de l'illustration 28) sont en passe d'être résolus par la canalisation des eaux « pluviales » et leur rejet à l'aval du village, le problème à Velloreille (point n°8) n'a pour le moment pas été traité sur le fond, car des travaux récents d'aménagement de la route départementale ont montré qu'il y avait une zone très instable à quelques mètres seulement de la route, qui ne pourrait être traitée définitivement qu'en évacuant les eaux pluviales à l'aval du village (communication email G. Forestier, Conseil Départemental de Haute Saône).

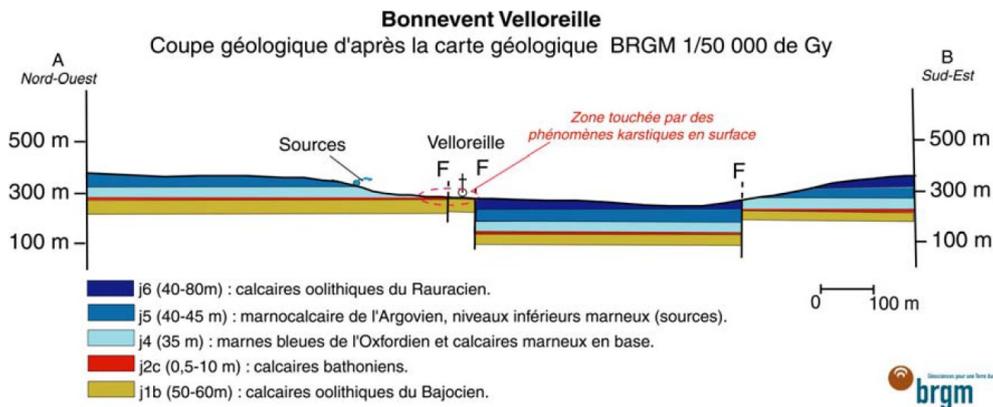


Illustration 27 - Contexte géologique du site de Bonnevent-Velloreille (Haute-Saône) (d'après Bayle 2008)

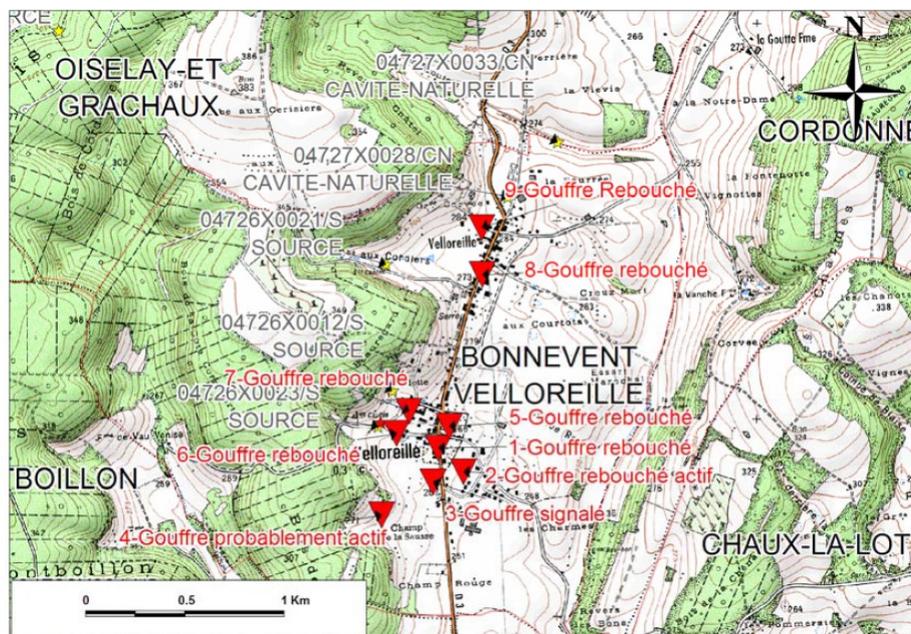


Illustration 28 - Carte de localisation des désordres apparus sur la commune de Bonnevent-Velloreille (d'après Bayle 2008)

### ***Rabatement de nappe : nord de Paris***

Cet exemple est basé sur l'article de Toulemont (1987) qui a étudié en détail les risques d'instabilité liés à la présence de gypse dans la région parisienne. La formation karstifiée correspond au gypse du Lutétien sous couverture de formations sableuses (sables de Beauchamp) et marno-calcaires (calcaires de Saint-Ouen) principalement. L'épaisseur de la couverture est comprise entre 20 et 40 m. La nappe du Lutétien qui comprend les formations de gypse est très exploitée par des pompages industriels qui ont fortement influencé la piézométrie naturelle. Toulemont (1987) montre la corrélation qui existe entre baisse de niveaux piézométrique et apparition de désordres (Illustration 29) : « *sur le nord de Paris et sa banlieue nord-est, la plupart des évènements sont centrés sur les principaux cônes de rabattement permanent qui caractérisent la piézométrie de la nappe éocène (i.e. du Lutétien) ; ils coïncident dans le temps avec la phase d'accélération des pompages industriels (...), notamment à partir des années cinquante. Leur régression à partir de l'année 1965 correspond à une période de stabilité (...). [Un groupe de désordres], géographiquement restreint à Paris intra-muros, semble devoir être corrélé avec une reprise très nette de la baisse piézométrique enregistrée depuis 1977/1978, après une période d'accalmie* ».

Les perturbations hydrodynamiques liées à l'abaissement prolongé des niveaux piézométriques ont deux conséquences d'après Toulemont (1987) : « *au plan mécanique, elles ont contribué à la déstabilisation des voutes de décharge, par accroissement des contraintes effectives, ainsi qu'à l'érosion régressive des sols fins par entraînement hydraulique ; au plan géochimique, elles ont provoqué l'exacerbation du phénomène karstique lui-même, ainsi qu'en témoigne la concentration significative des cavités et des désordres autour de certains points de captage* ».

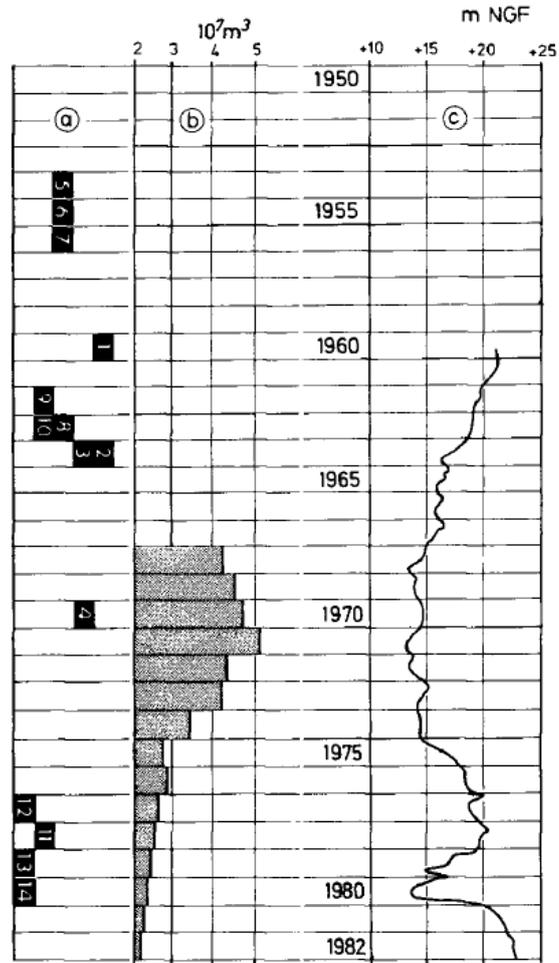


Illustration 29 - Distribution chronologique des principaux désordres survenus au nord de l'agglomération parisienne et corrélation avec l'évolution piézométrique de la nappe du Lutétien : a : désordres identifiés par un numéro ; b : volumes annuels prélevés à la nappe pour des usages industriels (données accessibles depuis 1968) ; c : évolution piézométrique de la nappe éocène – rue Réaumur (d'après Toulemont 1987)

### 3.3. SYNTHÈSE

Les résultats provisoires des retours d'expérience (63 cas) montrent que les différents types d'aménagement à l'origine de désordres (bassins de rétention, conduites enterrées, puisards/forages, fossés de drainage, dérivations de cours d'eau, pompages) correspondent aux principaux types d'aménagement identifiés dans les références bibliographiques internationales (chapitre 2). Une différence notable est le rôle minime des pompages puisque ceux-ci ne sont évoqués que dans trois cas.

Les données sont trop fragmentaires pour le contexte du gypse (3 cas) pour permettre une première analyse. Pour le contexte carbonaté (calcaire et craie), on note que l'essentiel des cas (85%) correspond à des karsts sous couverture ; dans une étude précédente sur la susceptibilité à l'effondrement, il avait également été montré la forte susceptibilité de ces karsts (Perrin et al. 2014). Le processus majeur est le soutirage des matériaux meubles de la couverture vers les vides karstiques qui en sont le réceptacle ; ce soutirage peut être très significativement amplifié par les concentrations d'eau d'infiltration causées par les aménagements. Dans un certain nombre d'exemples, l'apparition du désordre est attribuée à une combinaison de facteurs anthropiques et naturels : un ou plusieurs aménagements (par exemple fossé de drainage et conduites enterrées) et forte pluviosité. On note également quelques exemples où des désordres peuvent apparaître dans un contexte où la couverture meuble est relativement épaisse (>25 m).

Les retours d'expérience sont essentiellement basés sur des interventions réalisées directement après l'apparition d'un désordre, sans suivi des éventuelles études complémentaires et travaux réalisés ; de fait les informations sont fragmentaires sur les traitements réalisés (connus pour 45% des cas) et quasi-inexistantes sur l'efficacité des traitements.

Les résultats provisoires de l'étude ne peuvent pas être considérés représentatifs : les données restent limitées (la collecte des retours d'expérience se prolonge en année 2), le nombre de réponses obtenues est variable d'une région à l'autre, les rapports et études concernent essentiellement les désordres ayant impactés des infrastructures à enjeux, etc.



## 4. Conclusions et perspectives

Ce rapport décrit la phase 1 de l'étude, programmée dans le cadre du Programme de Travail sur les Risques Naturels de la DGPR de 2015 et a pour objectif d'évaluer le rôle des aménagements anthropiques sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique par une étude bibliographique et un retour d'expérience.

L'étude bibliographique a permis d'identifier les trois grandes catégories d'aménagement pouvant être à l'origine de désordres en contexte karstique : la concentration des eaux d'infiltration, le rabattement de la nappe karstique et les perturbations physiques du sol. La première catégorie est la plus impactante sur le territoire national. Les traitements des effondrements préconisés dans les documents consultés visent à éviter l'infiltration des eaux de surface au travers des formations superficielles couvrant la formation karstifiée, soit par une dérivation étanche hors zone, soit par un aménagement court-circuitant la couverture. Des textes réglementaires, des préconisations sous forme de guide méthodologique ou encore des bases de données géographiques ont été mises en place dans les pays occidentaux particulièrement impactés par les effondrements karstiques afin d'aider les gestionnaires dans la prévention et la mitigation des désordres.

Sur la base de 63 retours d'expérience, les résultats de la phase 1 de cette étude confirment le rôle joué par les aménagements sur l'apparition d'effondrements liés à la présence de karst et, en premier lieu, ceux contribuant à l'augmentation des flux d'infiltration (bassins de rétention, puisards, conduites enterrées, fossés de drainage). Ces résultats sont conformes aux études disponibles dans la bibliographie internationale. Toutefois, très peu de cas (3) sont communiqués, où la baisse du niveau de la nappe est incriminée. Les contextes les plus impactés sont les karsts sous couverture à la fois calcaires ou crayeux. Seuls trois exemples de contexte évaporitique ont été recensés à ce jour.

Dans le cadre de l'année 2, une consolidation des retours d'expérience sera réalisée en cherchant 1) à étayer les exemples en contexte évaporitique, 2) à obtenir une vision représentative de la répartition territoriale des cas, tous types de contextes confondus. Cette phase nécessitera une bonne collaboration des instituts partenaires (CEREMA, INERIS) et également des bureaux d'étude géotechnique.

Ces données additionnelles devraient permettre d'obtenir une base de données représentative des désordres liés à la présence d'un aménagement. Cela permettra d'une part de consolider les résultats provisoires présentés dans le présent rapport et, d'autre part, d'aborder les problématiques suivantes :

- analyse de la répartition géographique des désordres en fonction de la répartition géographiques des régions karstiques et de l'occupation du sol (« densité d'aménagements ») ;
- évaluation de l'impact des désordres sur les aménagements (ceux à l'origine des désordres tels que bassins de rétention mais également infrastructures, bâti, etc.) ;
- évaluation de la contribution des aménagements à l'augmentation de la fréquence d'apparition des désordres ;
- réflexion sur la dynamique du phénomène depuis la construction de l'aménagement incriminé jusqu'à l'apparition du désordre en fonction du type d'aménagement et du contexte géologique et hydrogéologique.

Ces réflexions viendront alimenter la réalisation d'une modélisation conceptuelle préliminaire des processus afin d'évaluer de manière qualitative des seuils critiques sur des variables identifiées comme ayant déclenché/accéléré l'apparition d'un désordre (flux d'eau, niveaux de nappe, autres variables identifiées à l'étape 1), et cela pour différents contextes (géologie des terrains, propriétés géomécaniques de la couverture, position de la nappe, etc.). Cette modélisation s'appuiera, autant que faire se peut, sur les informations issues de quelques cas d'étude particulièrement bien documentés et sur des informations bibliographiques. Elle sera menée en concertation avec le CEREMA.

L'ensemble des résultats viendra alimenter une série de recommandations applicables aux travaux d'aménagements en contexte karstique qui constitueront l'aboutissement de la phase 2 de cette étude qui sera réalisée en 2016.

## 5. Bibliographie

- Aley T.J., Williams J.H., Massello J.W. 1972. Groundwater contamination and sinkhole collapse induced by leaky impoundments in soluble rocks terrain. Missouri Geological Survey and Water Resources, Engineering Geology Series 5: 40 p.
- Bayle E. 2008. Bonnevent-Veloreille (70) – Avis géologique sur les phénomènes karstiques – BRGM/RP-56955-FR – Avis du BRGM – rapport final.
- Bouroullec I. 2014. Avis suite à un affaissement de la voirie ayant engendré des désordres à une habitation, commune de Hèches (65). Rapport BRGM RP-64129-FR.
- Brezinski D.K. 2007. Geologic and anthropogenic factors influencing karst development in the Frederick region of Maryland. Environmental Geosciences 14(1): 31-48
- Buttrick D.B., Trollip N.Y.G., Watermeyer R.B., Pieterse N.D., Gerber A.A. 2011. A performance based approach to dolomite risk management. Environmental Earth Sciences 64:1127–1138
- Byle M.J. 2001. Stormwater infiltration practices in karst in Traver R.G. (ed), Rethinking comprehensive stormwater management integrating quality, volume and peak controls: Villanova University: 1-12.
- Camus H. 2010. Diagnostic du risque karstique : le cryptokarst de la LGV Méditerranée. In Audra (Ed) Grottes et Karst de France, Karstologia Mémoires 19.
- CH2MHILL. 1998. Pennsylvania Handbook of Best Management Practices for Developing Areas. Pennsylvania Association of Conservation districts, Keystone Chapter, Soil and Water Conservation Society, Pennsylvania Department of Environmental Protection, Natural Resources Conservation Service.
- Clément F. 2014. Vulgarisation du rôle des circulations d'eaux superficielles et souterraines dans l'apparition de mouvements de terrain d'origine karstique. CEREMA/DREAL Aquitaine: 46 p.
- CSN Karst working group. 2009. Stormwater design guidelines for karst terrain in the Chesapeake Bay watershed. Chesapeake stormwater network : 39 p.
- David P-Y., Moisan D., Nachbaur A., Dörfli N. 2010. Aménagements des bêttoires en Haute Normandie – Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques. Rapport BRGM RP-58795-FR.
- De Bruyn I.A., Bell F.G. 2001. The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the far west Rand and Gauteng province, South Africa, and their engineering implications. Environmental & Engineering Geoscience 7(3): 281-295
- Doctor D.H., Weary D.J., Orndorff R.C., Harlow G.E., Kozar M.D., Nelms D.L., 2008: Bedrock Structural Controls on the Occurrence of Sinkholes and Springs in the Northern Great Valley Karst, Virginia and West Virginia. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst 2008, Proceedings of the 11th Multidisciplinary Conference, Geotechnical Special Publication 183: 12-22.

- Fennessey L.A.J. 2003. Defining natural land areas critical for storm control in karst regions. Proceedings of the 2003 Pennsylvania Stormwater Management Symposium, Villanova University: 16 p.
- Fidelibus M.D., Gutierrez F., Spilotro G. 2010. Human-induced hydrogeological changes and sinkholes in the coastal gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy). *Engineering Geology* 118: 1–19.
- Flageollet J-C. 1989. Les mouvements de terrain et leur prévention. Masson Paris : 224 p.
- Ford D., Williams P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Sussex, Wiley & Sons: 562 p.
- GIPEK 2012. Inventaire spéléologique du Doubs Tome 5 (mise à jour des tomes 1 à 4). Ornans.
- Gouzie D., Pendergrass G. 2009. Investigation and Remediation of the 2006 Nixa, Missouri, Collapse Sinkhole. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XV, No. 1 : 13–27.
- Gutierrez F., Cooper A.H. 2002. Evaporite Dissolution Subsidence in the Historical City of Calatayud, Spain: Damage Appraisal and Prevention. *Natural Hazards* 25: 259–288
- Gutierrez F., Cooper A.H., Johnson K.S. 2007. Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. *Environmental Geology* 53(5): 1007-1022
- Gutierrez et al. 2007b. The origin, typology, spatial distribution and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream of Zaragoza city (NE Spain). *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 912–928
- Gutierrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews* 138: 61–88
- Herbaux M., Kreziak C., Durst P., Martin J.-C., Cochery C., Midot D, Barras A-V. 2014. Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Rapport public pour le MEDDE réalisé conjointement entre le BRGM & le CEREMA.
- Hunt et al. 2013. Cover-collapse sinkhole development in the Cretaceous Edwards limestone, Central Texas. Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst.
- 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.
- Kaufmann, O., Quinif, Y., 2002. Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. *Engineering Geology* 65, 117–124.
- Kaufmann O., Quinif Y., Sabbe A., Wilquin H. 2005. Canevas décisionnel en matière d'étude préalable à prescrire dans le cadre de demandes de permis d'urbanisme et de permis de lotir dans le cas d'habitations et visant des terrains situés en zones de contraintes karstiques. Rapport préparé pour la DGATLP du Ministère de la Région Wallonne: 349 p.+ annexes

Maryland Stormwater Design Manual 2009. Appendix D.2 Geotechnical Methods for Karst Feasibility Testing.

Meng Y. et al. 2012. Models and mechanisms of drilling-induced sinkhole in China. *Environ Earth Sci* 67: 1961–1969.

Messerklinger S. 2014. Formation mechanism of large subsidence sinkholes in the Lar valley in Iran. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 47 : 237-250.

Milanovic P. 2002. Subsidence hazards as a consequence of dam, reservoir and tunnel construction. *International Journal of Speleology* 31 (1/4) : 169-180.

Mondain P.H., Boulay C. 2013. L'aquifère des calcaires oligocènes du bassin de Saffré (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.

Newton J.G. 1987. Development of sinkholes resulting from man's activities in the Eastern United States. USGS Circular 968.

Nicod J. 1984. Instabilité des dépressions karstiques. *In* Flageollet J-C. (Ed) 1984. Mouvements de terrain. Communications du Colloque de Caen. Documents du BRGM n°83 : 678 p.

Patton T.H., Klein J.G. 1989. Sinkhole formation and its effect on Peace River hydrology. Proceedings 3<sup>rd</sup> Multidisciplinary conference on sinkholes, Florida (USA): 25-31.

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.

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 p.

Sasowsky I.D., Woodward E.E., McQuade T.L. 2010. Stormwater management in karst terranes : an overview with considerations for best practices : report issued by University of Akron (Ohio) Department of Geology and Environmental Science : 93 p.

Smith T.J., Sinn G.C. 2013. Induced sinkhole formation associated with installation of a high-pressure natural gas pipeline, west-central Florida. Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst.

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

Stephenson J.B., Zhou W., Beck B.F., Green T.S. 1999. Highway stormwater runoff in karst areas - preliminary results of baseline monitoring and design of a treatment system for a sinkhole in Knoxville, Tennessee. *Engineering Geology* 52 : 51–59.

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.

Topin N. 2007. Problématique des bétouilles en station d'épuration (département de Seine Maritime). Etude technique Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Toulemont M. 1987. Les risques d'instabilités liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Prévisions en cartographie. *Bulletin liaison laboratoire des Ponts et Chaussées* 150/151 : 109-116.

Van Schalkwyk, A. 1998. Legal aspects of development on dolomite land in South Africa. *Environmental Geology* 36 (1-2): 167-169.

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.

West Virginia Department of Environmental Protection. 2005. Sinkhole Mitigation Guidance : 9 p.

White E.L., Aron G., White W.B. 1986. The influence of urbanisation on sinkhole development in central Pennsylvania. *Environmental Geology Water Science* 8 : 91-97.

Zhao H., Ma F., Guo J. 2012. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010. *Natural Hazards* 60:1037–1054, DOI 10.1007/s11069-011-9888-3.

Zhou W. 2007. Drainage and flooding in karst terranes. *Environmental Geology* 51: 963–973

Zhou W., Beck B.F. 2005. Roadway construction in karst areas : management of stormwater runoff and sinkhole risk assessment. *Environmental Geology* 47(8) : 1138-1149.

Zhou W., Beck B.F. 2008. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications. *Environmental Geology* 55: 837–851.

## **Annexe 1**

### **Gestion des eaux de ruissellement en contexte karstique et liste des « hot spots » (CSN karst working group 2009)**



**Figure 2 Flow Chart for Stormwater Design in Karst Terrain**



<b>Table 1: Potential Stormwater Hotspot and Site Design Responses</b>			
<b>Potential Stormwater Hotspot Operation</b>	<b>SWPP Required?</b>	<b>Restricted Infiltration</b>	<b>No Infiltration</b>
Facilities w/NPDES Industrial permits	Yes	■	■
Public works yard	Yes		●
Auto and metal recyclers/scrap yards	Yes		●
Petroleum storage facilities	Yes		●
Highway maintenance facilities	Yes		●
Wastewater, solid waste, composting facilities	Yes		●
Industrial machinery and equipment	Yes	●	
Trucks and trailers	Yes	●	
Aircraft maintenance areas	Yes		●
Fleet storage areas	Yes		●
Parking lots (40 or more parking spaces)	No	●	
Gas stations	No		●
Highways (2500 ADT)	No	●	
Construction business (paving, heavy equipment storage and maintenance)	No	●	
Retail/wholesale vehicle/ equipment dealers	No	●	
Convenience stores/fast food restaurants	No	●	
Vehicle maintenance facilities	No		●
Car washes (unless discharged to sanitary sewer)	No		●
Nurseries and garden centers	No	●	
Golf courses	No	●	
Note: For a full list of potential stormwater hotspots, please consult Schueler et al (2004)			
Key: ■ depends on facility ● Yes			
Shaded Area Facilities or operations not technically required to have NPDES permits, but can be designated as potential stormwater hotspots by the local review authority, as part of their local water ordinance			

## **Annexe 2**

### **Fiche pour la collecte de retours d'expérience**



## Rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique – Retour d'expériences

*NB : même des informations incomplètes seront utiles...*

### 1. Informations générales

Rédacteur de la fiche (email) : \_\_\_\_\_

Souhaite recevoir le rapport final de l'étude (pdf) ? Oui  Non

Référence (rapport/publi) sur l'effondrement<sup>1</sup> : \_\_\_\_\_

Nature de l'intervention : Intervention d'urgence , Demande « CatNat » ,  
Etude à grande échelle (type PPR) , Autre : \_\_\_\_\_

Autres références sur le sujet (cas d'étude, publications, rapports externes, réglementations) ?  
\_\_\_\_\_

Personnes/Institutions susceptibles d'avoir des informations pertinentes sur le sujet (nom & contact) ?  
\_\_\_\_\_

### 2. Localisation de l'effondrement

Nom du site : \_\_\_\_\_ Commune : \_\_\_\_\_ Département : \_\_\_\_\_

Coordonnées du site : \_\_\_\_\_ Date de la visite : \_\_\_\_\_

### 3. Contexte géologique et hydrogéologique

Schéma géologique/hydrogéologique du site (coupe, plan, autres informations utiles) :

Terrain karstifié : Calcaire  Craie  Gypse  Détails (strati, épaisseur) : \_\_\_\_\_

Autres effondrements connus à proximité ? \_\_\_\_\_

Informations géotechniques ? \_\_\_\_\_

Lithologie et épaisseur de la couverture au-dessus de la formation karstifiée : \_\_\_\_\_

Profondeur de la nappe karstique : \_\_\_\_\_

Présence d'une nappe dans la couverture ? Oui  Non  Si oui, quelle profondeur ? \_\_\_\_\_

Ruissellement/cours d'eau en surface ? Oui  Non  Si oui, détails (origine, naturel/artificiel, débit) ? \_\_\_\_\_

<sup>1</sup> Effondrement est pris au sens large et comprend tout type de mv. de terrain (fontis, affaissement, tassement, etc.)

#### 4. Description des aménagements ayant contribué à l'apparition du désordre

Type d'aménagement :

Fossé/canal de drainage  Conduite enterrée  Puits/forage  Bassin de rétention d'eau   
Imperméabilisation des terrains  Baisse du niveau de la nappe  Autre  : \_\_\_\_\_

Date des aménagements (même approximative) : \_\_\_\_\_

Schéma explicatif si nécessaire (préciser la situation du désordre par rapport à l'aménagement) :

#### 5. Description du désordre

Typologie du désordre : Fontis  Affaissement  Tassement  Autre

Date d'apparition : \_\_\_\_\_ Enjeux (infrastructure impactée) : \_\_\_\_\_

Dimensions du désordre (diamètre, profondeur, pente) : \_\_\_\_\_

Evolution du désordre ? Oui  Non  Si oui, détails (fréquence, durée, dimension finale, ...) ? \_\_\_\_\_

Circulation d'eau visible au niveau du désordre ? Oui  Non  Si oui, détails (débit, pérennité, ...) ? \_\_\_\_\_

Origine du désordre (processus envisagé  /avéré ): Débourrage  Soutirage   
Tassement  Effondrement banc rocheux  Autre  \_\_\_\_\_

#### 6. Traitement/Mitigation

##### 6.1. Traitement préconisé

Comblement  Réparation (p.ex., conduite)  Etanchéification   
Drainage des eaux hors zone  Infiltration contrôlée  Autre (\_\_\_\_\_)

Détails sur le traitement : \_\_\_\_\_

Déplacement de l'infrastructure impactée  Acceptation du risque

6.2. Traitement réalisé Date : \_\_\_\_\_ Stabilisé ? Oui  Non

Comblement  Réparation (p.ex., conduite)  Etanchéification   
Drainage des eaux hors zone  Infiltration contrôlée  Autre (\_\_\_\_\_)

Détails sur le traitement : \_\_\_\_\_

## 7. Commentaires libres

---

---

---

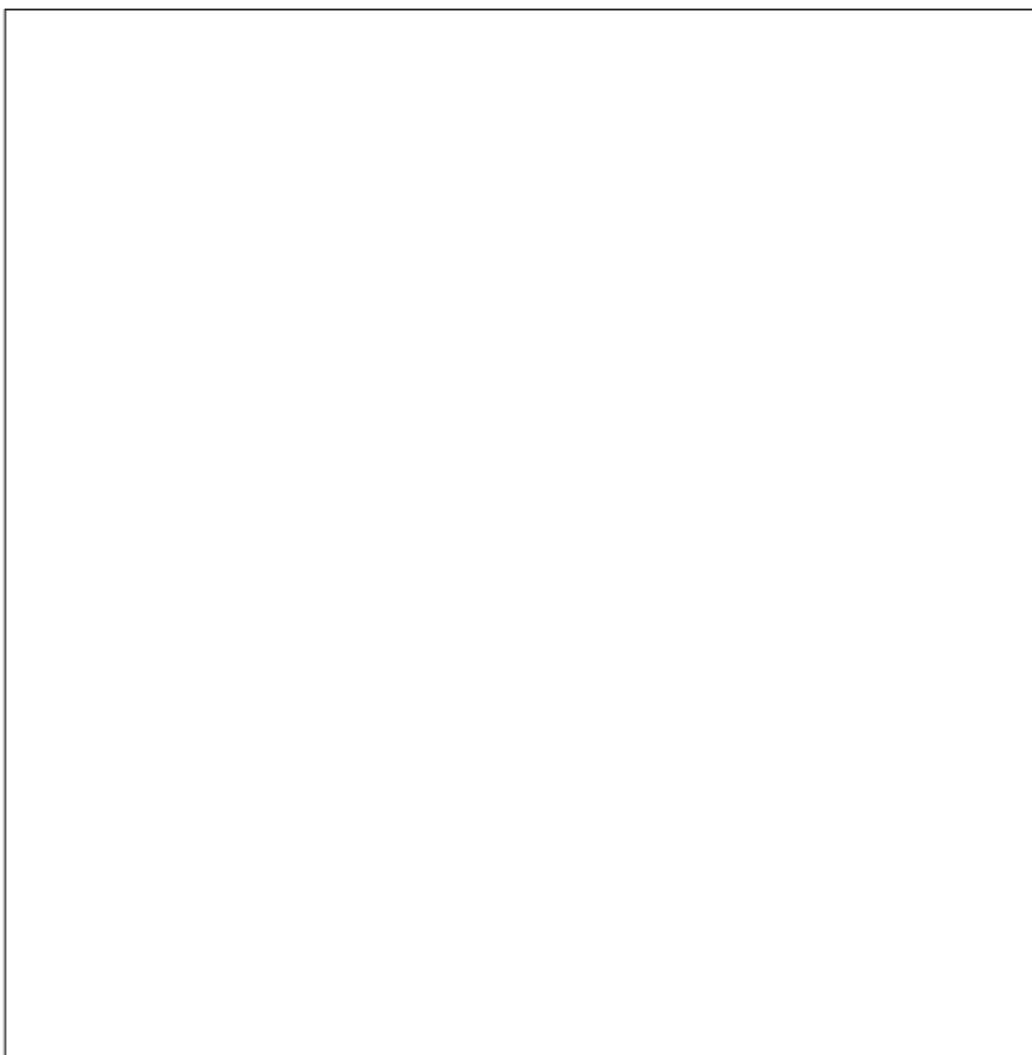
---

---

---

---

---





## **Annexe 3**

### **Tableau de synthèse des retours d'expérience**



Rôle des aménagements sur les effondrements en contexte karstique 1. Bibliographie et retours d'expérience

Réf. Fiche	Lieu dit	Commune	Dépt.	Date visite site	Terrain karstifié	Géologie du terrain karstifié	Profondeur nappe karstique	Typologie karst	Litho couverture	Epaisseur couverture	Ruisseau surface	Origine ruissellement	Fonctionnement hydrologique	Aménagement	Date de l'aménagement	Type de désordre	Processus	Date d'apparition	Diamètre	Profondeur	Pente
1	Grainville		27	05/11/1990	craie	craie du Sénonien	n.c.	karst sous couverture	argile à silex	10-15 m	non		réception eau pluviale	Réservoir à ancien puisard	n.c.	Affaissement	Soufrage	nov-96	4.5	0.5	
2	parcelle AT314	Petit Quevilly	76	26/06/2008	craie	craies du coniacien et du turonien	20m	karst sous couverture	alluvions anciennes (3-4m)	3-4m	non		bétoire	conduite enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	26/06/2008	0.5	0.5	90°
3		Gommerville	76	déc-09	craie		60m	karst sous couverture	limons des plateaux (5-10 m) puis argile à silex (10 m)	15-20 m	non		infiltration eau pluviale	puisards, réseau eau usée	n.c.	Affaissement	Soufrage	5-6 Novembre 2009	9	0.5	15°
4	parcelle AC92a	Longueue	76	21/03/2005	craie	craie massive à silex du Santonien	15-20m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	oui	eau pluviales	bétoire	puits filtrant	n.c.	Effondrement	Soufrage	21/03/2008	0.4	1.4	90°
5	parcelle B383	Saint Pierre Le Viger	76	13/12/2005	craie	Craie blanchâtre massive à silex du santionien	5m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	puisard	n.c.	Effondrement	Soufrage	déc-05	4	3	90°
6	La carrhée	Criquebot-L'esneval	76	28/12/1999	craie	Craie du sénonien	33m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	oui	écoulement pluvial bord de route	bétoire	canalisation	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	12	4	75°
7	bassin d'infiltration	Criquebot-L'esneval	76	29/03/2010	craie	Craie du sénonien	30m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	quelques mètres	oui	bassin d'infiltration de STEP	bétoire	bassin STEP	entre 1999 et 2002	Effondrement	Soufrage	janv-07	15	3	70°
8	112 route de Dieppe	Maromme	76	21/05/2012	craie		20	karst sous couverture	remblai (2m), argile (2m)	4 m	non		bétoire	Station de lavage	n.c.	Effondrement	Soufrage	20-mai-12	4	4.5	90°
9	bassin	Saussezemare-en-Caux	76	02/03/2011	craie	craie du santionien		karst sous couverture	LP puis LV puis RS puis poches de sables	n.c.	oui	bassin d'infiltration de STEP	bétoire	bassin STEP	n.c.	Effondrement	Soufrage	01/03/2011	14	5	60-80°
10	Sainte Hélène	Saint-Jouin Bruneval	76	06/11/2009	craie	craie sénonienne comprenant silex	30-40m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	38m	oui	fossé drainage bassin	bétoire	fossé	n.c.	Effondrement	Soufrage	nov-09	5	1.5	80°
11	piézomètre	Brametot	76	15&16/12/2008	craie	craie tendre à silex	n.c.	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	14.5m	non		piézo mal construit	piézomètre	n.c.	Effondrement	Soufrage	15/12/2008	2.5	1.7	90°
12	Les Noyers	Saint-Maixant	33	21/06/2010	calcaire	calcaire à Astéries Oligocène	7-8 m	karst sous couverture	alluvions	5-7m	oui	sur coteau argileux et surface imperméabilisées	infiltration dans puisards	puisards, fossé drainage, conduites	lotissement aménagé 2000-2010	Effondrement	Soufrage	2010-2011	3	3	90°
13	Les Acroux	Moulines-Engilbert	58	12/07/2011	calcaire		n.c.	karst sous couverture	sable argileux	1-4 m	oui	route	perte en crue	fossé bord route	n.c.	Effondrement	Soufrage	2005	4	3	
16	parcelle AS171	Petit Quevilly	76	25/10/2001	craie	craie blanche à silex du campanien	20 m	karst sous couverture	alluvions anciennes	n.c.	non		bétoire	conduite enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	21/10/2001	0.7	3	
17	parcelle AT13	Petit Quevilly	76	16/10/2000	craie	craies blanches à silex	20 m	karst sous couverture	alluvions anciennes	n.c.	non		bétoire	conduite enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	03/10/2000	0.4	1.2	
18	parcelle ZH60	Saint Leonard	76	01/10/2000	craie	craie blanche à silex	60 m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	10 à 15 m	non		bétoire	cuve enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	09/05/2000	n.c.	n.c.	
19	Hameau de l'Anerie	La Sabotterie	8	21/05/2008	calcaire	calcaires compactes et micocaux du Jurassique (Rauracien & Avenacien)	n.c.	karst sous couverture	argiles et sables glauconieux (Abien)	5-7 m	oui	route	perte	buse infiltration eau pluviale	n.c.	Effondrement	Soufrage	?	1	1.5	90°
20	23 rue Cronstadt	Périgueux	24	28/07/2009	calcaire	calcaire du crétaé	n.c.	karst sous couverture	alluvions anciennes	4 à 10 m	non		bétoire	conduite enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	21/07/2009	n.c.	n.c.	
21	quartier Escalés	Illats	33	12/03/2014	calcaire	calcaire à Astéries Oligocène	n.c.	karst sous couverture	alluvions anciennes Garonne	2 m	oui	route	perte	fossé drainage non étanche	n.c.	Effondrement	Débouillage	03/03/2014	4	2	90°
22	bassin de rétention	Manéglise	76	04/09/2015	craie		50 m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin retenue	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	2	n.c.	
23	bassin du bourg	Manéglise	76	04/09/2015	craie		25 m	karst sous couverture	LV puis LP puis RS	n.c.	non		bétoire	bassin retenue	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
24	Eneumare	Saint Martin du Manoir	76	04/09/2015	craie		60 m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
25	bssé	Criquebot-L'esneval	76		craie		50m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	fossé	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
26	Val Postal	Bourg Achard	27		craie		90 m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
27	Bassin Champ Cornu	Le Mesnil Ennard	76	21/07/2011	craie	Craie du sénonien	90 m	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
28	Bassin n°1	Roncherolles	76	11/07/2014	craie		60	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	5	2	
29	bassin n°2	Roncherolles	76	11/07/2014	craie		60	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	n.c.	n.c.	
30	bassin	Roncherolles	76		craie		60	karst sous couverture	Limons de plateau, puis argiles à silex	n.c.	non		bétoire	bassin	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	3	n.c.	
31	1 rue Jean Bogé	Port sur Saône	70	08/06/2011	calcaire	calcaire	n.c.	karst sous couverture	Alluvions anciennes puis calcaire du Bathonien	n.c.	non		fontis	conduite enterrée	n.c.	Effondrement	Soufrage	25/05/2011	0.5	n.c.	
33	La Crosse F4	La Frenaye	76	18/05/2008	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	limons argileux (1.5 m) puis argiles à silex	quelques mètres	oui	amorce de thalweg	bétoire	bassin de rétention	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	0.1	1.5	
34	Bassin du Centre GRA-1	Graimbouville	76	26/07/2010	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	LP (4-8 m) puis argiles à silex	10-15 m ?	oui	vallon		bassin de rétention	n.c.	Effondrement	Soufrage	nov-09	1.8	1	90°
35	Digue de la Bretonniere	Gruchet la Valsée	76	01/09/2012	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	LP (3 m) puis argiles à silex	n.c.	oui	thalweg	bétoire	bassin de rétention	n.c.	Affaissement	Soufrage	n.c.	6	2	
36	Le Nouveau Monde	Saint Nicolas de la Taille	76	12/05/2011	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	LP puis argiles à silex	n.c.	oui	vallon	bétoires	bassin de rétention	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	1.7	2	90°
37	1 rue du Petit Muids	Chapelle-Saint-Mesmin	45	29/10/2012	calcaire	calcaire de Beauce	20 m	karst sous couverture	marnes et sables	inconnu	non			bassin de rétention	2011	Effondrement	Débouillage ou Soufrage	09/10/2012	2	2.2	90°
38	180 rue de Roland	Mézères-lez-Cléry	45	09/08/2013	calcaire	calcaire de Beauce	n.c.	karst sous couverture	sables et argiles	environ 15 m	non			piscine (quelques m3)	été 2013	Effondrement	Débouillage ou Soufrage	Aout 2013	1.6	0.3	90°
39	RD126	Dasle	25	18/09/2012	calcaire	calcaire	n.c.	karst sous couverture	limons bruns (alluvions anciennes)	3-4 m	oui	naturel et apport surfaces imperméabilisées	perte	puits d'infiltration	2000	Effondrement	Débouillage	2008	12	3.5	
40	Bois de la Chenalaie	Orchamps-Vennes	25	08/01/2011	calcaire	calcaire du Séquanien	n.c.	karst nu	-	-	oui	ruisseau temporaire naturel à faible débit dans fossé	perte	fossé/canal de drainage	n.c.	Effondrement	Débouillage ou Soufrage	03/01/2011	1	5	90°
41	RD683	Roche-lez-Beaupré	25	30/07/2013	calcaire	marno-calcaire de l'Argovien	n.c.	karst sous couverture	limons, sable et argiles	4.5 m	oui	parking		fossé/canal de drainage	1980	Effondrement	Débouillage	2012	2.5	4.5	90°
42	Rue de la petite Voie	Bougey	70	12/12/2011	calcaire	calcaire du Sinémurien	peu profonde	karst sous couverture	marnes	10 m	non		présence d'une résurgence temporaire au fond de l'effondrement	bassin étanche	n.c.	Effondrement	Débouillage ?	déc-11	3.5	3	90°
43		Bonnevent Veloreille	70	05/12/2008	calcaire	calcaire du Bathonien	n.c.	karst de contact	marnes de l'Oxfordien	n.c.	oui	bassin versant sur les marnes	perdes	puits d'infiltration réseau pluvial	n.c.	Effondrement	Débouillage ou Soufrage	de 1993 à 2008	2	3	90°
44	La Chuteaie	Saître	44	2011-2013	calcaire	calcaires Oligocène	quelques mètres	karst sous couverture	sables Pliocène	0-20 m	oui	bassin versant hydrographique	perdes dans trois cours d'eau (partielles ou totales)	pompages	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	10	3	90°
45	Zone d'activités Moulin l'Ecoales	Vieux Manoir	76	09/04/2001	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	LP puis argiles à silex	n.c.	oui	thalweg		bassin de rétention	n.c.	Effondrement	Soufrage	07/04/2001	n.c.	0.6	
46	rue du vieux Moulin	Yvetot	76	10/06/2013	craie	craie	n.c.	karst sous couverture	Argiles à silex	7-12 m	oui	thalweg	bétoire	bassin de rétention	n.c.	Effondrement	Soufrage	déc-12	n.c.	n.c.	
47	LGV	Malataverne	26		calcaire	calcaire urgonien	55 m	karst sous couverture	alluvions anciennes du Rhone	10 à 15 m	non		vidange brusque	bassin de rétention LGV	n.c.	Effondrement	Soufrage	1997	12	7	60-80°
48	Dérivation du Gour	Champlive	25	26/06/2015	calcaire	Bathonien	n.c.	karst nu	-	-	oui	bassin versant	dérivation cours d'eau	19 ème siècle	Effondrement	Débouillage	juin-97	10	5	90°	
49	Hameau Granges Feuillet	Salins les Bains	39	08/06/2011	calcaire	calcaire cothique du Kimmériidgien	n.c.	karst de contact	faible placage alluvial	1 m	oui	bassin versant naturel, eaux usées et pluviale	zone de pertes karstiques	Dérivation ruisseau	n.c.	Affaissement	Débouillage	1980	3-5	3-5	45°
50	n°18 rue Pezeau	Beaufrain	33	26/07/2014	calcaire	calcaire à Astéries Oligocène	n.c.	karst sous couverture	alluvions gravelo-sableuses de la Garonne	11 m	oui	eau biture	infiltration des eaux de ruissellement au contact des buses	puits de 6-10 m	inconnu	Effondrement	Soufrage	26/07/2014	1	0.8	90°
51	Le Doué	St Aubin les Forges	58	28/05/2014	calcaire		n.c.	karst nu	-	-	oui	ruisseau	perte	déviaton du cours du ruisseau	inconnu	Effondrement	Débouillage	2014	1	n.c.	
52	plaine de Coueyrolles	Héches	65	06/11/2014	calcaire	Urgonien & calcschistes	25-35 m	karst sous couverture	formation argilo-graveleuse fluvio-glaciaire	15-20 m	non		fuiles du canal	canal de la Neste (14 m3/s)	1862	Affaissement	Soufrage	août-14	2	0.03	5°
53	Aire autroute Peuch Montat	Cressenssac	46		calcaire	calcaires jurassiques	n.c.	karst nu altéré?	altérites ?	quelques mètres	oui	surfaces imperméabilisées	dolène évacuation bassin de rétention	bassin de rétention autobroué	n.c.	Effondrement	Soufrage	n.c.	6.5	2.5	
54	les Vergers du Ruquet	Villers-Pol	59	02/07/2015	craie	craie Turonien sup	15 m	karst sous couverture	Limons loessiques	n.c.	non			Conduite enterrée & imperméabilisation	n.c.	Effondrement	Soufrage	22-juin-15	3.5	1	
55	Hameau du Bois	Beaufort	59	18/07/2012	calcaire	calcaire/dolomie Paléozoïque du Tournaisien	10 m (influence AEP)	karst sous couverture	limons et altérites des calcaires	5-12 m	non			pompages (?)	n.c.	Effondrement	Soufrage	mai-12	2.5	1	>90°
56	Carreau	Grayant et l'Hopital	33	18/06/2012	calcaire	calcaires de l'Eocène supérieur	peu profonde	karst sous couverture	sables puis marnes et calcaires altérés	37 m	non			forage et conduites enterrées	27-28/09/2006	Effondrement	Soufrage	28/09/2006	7	2.5	
57		Aubervilliers	93		gypse	gypse lutéén	20-30 m (influence pompages)	gypse	sables, calcaires, marnes	20-40 m	non			pompages	1960-1975 puis années 1980	Effondrement et affaissements	Soufrage (dissolution)	prilant périodes de pompage	2-13	3-18	
58	Les Marimonts	Thiviers	24	18/12/2012	calcaire	calcaires du Sinémurien	20 m	karst nu/sous couverture	altérites et épandages récents	2 m	non			fossé de drainage et conduites	années 2000	Effondrement	Soufrage	06/12/2012	0.8	1.5	90°
59	Peyrié	Savignac-sur-Leyze	47	03/09/2013	calcaire	calcaire lacustre tertiaryaire	7 m	karst sous couverture	altérites et argiles sableuses à cailloutés	2 m	oui	précipitations sur bassin versant	écoulement superficiel temporaire	fossé de drainage	plusieurs années avant visite	Effondrement	Soufrage	oct-12	1.5	6	90°
60	Centre Ville	Bargemon	83	07/11/2011	gypse																

Rôle des aménagements sur les effondrements en contexte karstique 1. Bibliographie et retours d'expérience

Réf. Fiche	Commune	Dépt.	Enjeu	Evolution	Type évolution	Traitement préconisé	Investigations/Traitement réalisés	Date de réalisation	Stabilisation	Rédacteur	Référence	Remarques
1	Grainville	27		Ecole	n.c.	travaux de reconnaissance				Vianney Malassigne	RP-39174-FR	
2	Petit Quevilly	76	sous sol habitation + station de lavage	non		comblement-réparation				Vianney Malassigne	RP-56498-FR	
3	Gommerville	76	station relèvement route	non		drainage hors zone				stagiaire HNO	RP-57950-FR	
4	Longuerue	76	entrée de garage d'un particulier	non		comblement				Vianney Malassigne	RP-53829-FR	
5	Saint Pierre Le Viger	76	remise utilisée comme chaufferie	non		comblement + réparation + drainage eaux hors zone+ infiltration contrôlée + maintien arrêté de péril				Vianney Malassigne	RP-54395-FR	
6	Criquebt-L'esneval	76	route communale	non		comblement				Vianney Malassigne	RP-50076-FR	
7	Criquebt-L'esneval	76	bassin + AEP liés à la bétière	non		infiltration stoppé + traitement de tous les effluents				Vianney Malassigne	RP-58294-FR	
8	Maromme	76	AEP, installations	non		déplacer l'activité	comblement par filtre inversé			stagiaire HNO	RP-61171-FR	
9	Sausseuzemare-en-Caux	76	bassin de STEP + AEP liés à la bétière	oui	plusieurs autres bétières en cours de formation	comblement + drainage des eaux hors zone				Vianney Malassigne	RP-59779-FR	
10	Saint Jouin Bruneval	76	route communale	oui	4 ouvertures de la bétière depuis 2001	réparation / comblement				Vianney Malassigne	RP-57881-FR	
11	Brametot	76	piézomètre	non		comblement	comblement	14/815/01/2009	oui	Vianney Malassigne	dossier VRN.7.0109	
12	Saint-Maixant	33	constructions	oui	nouveaux désordres apparaissant	comblement, réparation conduites, drainage hors zone	comblement, réflexion sur la gestion du système d'assainissement	2011-2012	oui	F Clément (CEREMA)	RP-58705-FR & RP-59426-FR	une dizaine de fontis au total
13	Moulins-Engilbert	58	route communale	oui	apparition récurrente après comblement	Étanchéification/déviation des eaux	comblement tout venant	2011	non	Je Perrin	RP-60137-FR	
16	Petit Quevilly	76	jardin	non		comblement				Vianney Malassigne	RP-51261-FR	
17	Petit Quevilly	76	jardin	non		sondages				Vianney Malassigne	RP-50453-FR	
18	Saint Leonard	76	jardin	non			comblement			Vianney Malassigne	RP-50455-FR	
19	La Sabotterie	8	route départementale	oui		canalisation de l'écoulement				Je Perrin	note technique P. Pannet	
20	Périgueux	24	route	non		étude à grande échelle				Vianney Malassigne	RP-57534-FR	
21	Mats	33	route communale	oui	élargissement du cratère	comblement par filtre inversé et étanchement fossé drainage				Je Perrin	RP-63635-FR	fortes précipitations antérieures
22	Manégise	76	bassin	non			étanchéification + comblement			Vianney Malassigne	RP-58795-FR	
23	Manégise	76	bassin	non						Vianney Malassigne	RP-58795-FR	
24	Saint Martin du Manoir	76	bassin	non						Vianney Malassigne	terrain	
25	Criquebt-L'esneval	76	fossé	non						Vianney Malassigne	RP-58795-FR	
26	Bourg Achard	27	bassin	non						Vianney Malassigne	terrain	
27	Le Mesnil Esnard	76	bassin	non			Comblement + étanchéification			Vianney Malassigne	dossier CIME/10/K/341bis/L/199-ind2	
28	Roncherolles	76	bassin	non						Vianney Malassigne	CR terrain CREA (2014)	
29	Roncherolles	76	bassin	non						Vianney Malassigne	CR terrain CREA (2014)	
30	Roncherolles	76	n.c.	n.c.						Vianney Malassigne	CR terrain CREA (2014)	
31	Port sur Saône	70	route + maison	oui	fontis au même endroits les années précédentes	évacuation maison + intervention BE	comblement			Vianney Malassigne	RP-60060-FR	
33	La Frenaye	76	digue	non		béton de blocage, remblaiement limons, étanchement, drainage hors zone	béton de blocage, remblaiement limons, étanchement, drainage hors zone		oui	Je Perrin	rapport hydrogéotec. (CommComm Caux)	2eme fontis mis au jour lors du décapage
34	Graimbouville	76	n.c.	oui	effondrement rebouché plusieurs fois auparavant	purge puis remblai, géotextile puis pose d'une membrane	purge puis remblai, géotextile puis pose d'une membrane		oui	Je Perrin	rapport IMS-RN (ComComm Caux)	role des animaux fouisseurs pour former des cheminements préférentiels
35	Gruchet le Valasse	76	digue	n.c.		traitement curatif puis étanchéification du bassin par géomembrane	traitement curatif puis étanchéification du bassin par géomembrane		oui	Je Perrin	rapport hydrogéotec. (CommComm Caux)	cinq autres affaissements plus petits à proximité, ouvrage de lutte contre les inondations
36	Saint Nicolas de la Taille	76	n.c.	n.c.		décapage puis comblement par argile compactée et géotextile de renforcement, étanchéification du bassin	non réalisé			Je Perrin	rapport IMS-RN (ComComm Caux)	autres petits effondrements à proximité
37	Chapelle-Saint-Mesmin	45	Bassin de rétention	n.c.		drainage des eaux hors zone ou étude complémentaire				G Noury	RP-61660-FR	Un fontis serait apparu 10 ans auparavant à proximité
38	Mézières-lez-Cléry	45	Néant	n.c.		drainage des eaux hors zone ou étude complémentaire				G Noury	RP-62630-FR	
39	Dasle	25	route départementale	oui	le fontis s'agrandit		soutènement de la RD par palplanches	oct-14		M Liniger (CG25)	rapport géotec hydrogéotechnique Est	fontis toujours en place
40	Orchamps-Vennes	25	route départementale	non		comblement par béton et matériaux drainants	comblement par béton et matériaux drainants	20/04/2011		M Liniger (CG25)	rapport CDS Doubs	perte fossile réactivée, exploration spéléologique
41	Roche-lez-Beaupré	25	route départementale	oui	élargissement entre 2012 et 2013	comblement par béton et imperméabilisation du fossé	comblement par béton et imperméabilisation du fossé	2013		M Liniger (CG25)	rapport de visite CG25	
42	Bougey	70	n.c.	non		comblement	comblement	2011	oui	B Collet (DDT70)	RP-60727-FR	role du bassin étanche très probable sur le déclenchement du désordre
43	Bonnevent Veloreille	70	habitations et route départementale	n.c.		maitrise des eaux, schéma d'assainissement	canalisation des eaux et rejet en aval du village	en cours	partiel	G Forester (CG70)	RP-56955-FR	9 événements inventoriés
44	Safré	44	n.c.	n.c.		Comblement avec cheminée pour échappement de l'air				PH Mondain (Calligée)	Mondain & Boulay (2013)	le pompage exacerbe un phénomène naturel
45	Vieux Manoir	76	bassin	n.c.		renforcement et étanchement du bassin par pose d'un géotextile et membrane imperméable				Je Perrin	Rapport CETE (A Quiniou DDT76)	2000 m3 d'eau infiltré en 48 heures suite à la rupture
46	Yvetot	76	bassin	n.c.		purge, comblement, étanchéification	sondages	juin-13		Je Perrin	Rapport CETE (A Quiniou DDT76)	2 effondrements apparus dans le bassin
47	Malataverne	26	future LGV	n.c.			diagnostic karstologique complet			Je Perrin	Camus (2010)	volume de l'effondrement de 250 m3, apparu suite à de fortes pluies
48	Champlive	25	aucun	oui	élargissement du cratère (30 m en 2015)		nouvelle dérivation permettant de dévier une partie du cours d'eau			Je Perrin	GIPEK 2012	les flux infiltrants ont diminués
49	Salins les Bains	39	Batiments	oui	nouvelle perte en 1980 ancienne devenue inactive	maitrise des eaux, schéma d'assainissement	comblements tout venant	depuis 1980	non	Je Perrin	RP-60031-FR	
50	Beaufran	33	néant	non		arrêt des rejets				Je Perrin	RP-63880-FR	épisode pluvieux intense la veille
51	St Aubin les Forges	58	étang	non		étanchéification	comblement tout venant	2014		Je Perrin	RP-63669-FR	
52	Hêches	65	canal, constructions, route	oui		sécurisation, études complémentaires	renforcement des fondations du canal à plusieurs reprises (pieux)			Je Perrin	RP-64129-FR	site avec événements récurrents le long du canal depuis sa mise en eau (21 recensés par DDT); canal effondré sur 50 m en 1982
53	Cressenssac	46	n.c.	n.c.		transport eaux pluviales hors zone	investigations géophysique et hydrogéologique			Je Perrin	Muet (2008)	alternative: réinfiltration des eaux in situ dans la cavité, mais problème de traitement préalable
54	Villers-Pol	59	voirie	n.c.						J Louart	RP-64957-FR	Fortes pluies ont pu contribuer à l'apparition
55	Beaufort	59	aucun	oui	autocomblement partiel	étude géotechnique				Je Perrin	RP-61376-FR	2eme effondrement à proximité, récurrence de fontis, aussi rôle de l'exhaure des carrières (étude Maubeuge)
56	Grayant et l'Hopital	33	loisement (évacuation)	oui	autres effondrements à proximité le long du réseau enterré (jusqu'08/2007)		expertise, interdiction d'accès, étude géophysique			F Clément (CEREMA)	Clément 2014	le fontis a entraîné la chute d'une personne (décédée) et de la foreuse, enquête judiciaire en cours
57	Aubervilliers	93	infrastructures s.l.	n.c.			cartographie d'aléa			Je Perrin	Toulemont 1987	la fréquence des événements devrait se réduire car la nappe est moins sollicitée
58	Thiviers	24	route nationale RN21 (fermeture)	oui	nouvel effondrement le 14/12/2012	purge, comblement, réparation conduites, étanchéification	purge, comblement et réparation conduites	17-20/12/2012	oui	F Clément (CEREMA)	Clément et Gardet 2012	traitement réalisé détaillé dans la fiche
59	Savignac-sur-Leyze	47	perte d'eau d'irrigation	oui	nouvel effondrement en juillet 2013	Comblement et rétablissement de la continuité hydraulique du fossé	effondrements non traités à ce jour			F Clément (CEREMA)	Clément 2014	
60	Bargemon	83	bât	oui	affaissements récurrents	gestion eaux pluviales, confortement du bâti, normes pour nouvelles constructions	géophysique, sondages géotechniques	2009, 2011	non	Je Perrin	RP-60536-FR	le rôle des aménagements par rapport à l'évolution naturelle du karst n'est pas clairement établi
61	Nice	6	chaussée, bât	oui	affaissements alentours		comblement béton (300 tonnes), PPR effondrement colline de Cimiez (CETE)			Je Perrin	information direction régionale BRGM-PACA	se rapprocher d'ANTEA qui a réalisé l'étude
62	Miserey-Salines	25	route départementale	faible						Je Perrin	terrain	Au total 4 dolines de soufrage sur 40 m de distance en contrebas de la route
63	Geney	25	bassin de rétention	n.c.						Je Perrin	GIPEK 2012	2 soutrages en rive station de lagunage
64	Gondenans-Monby	25	conduite enterrée	n.c.						Je Perrin	GIPEK 2012	
65	Voillans	25	bassin de rétention	n.c.						Je Perrin	GIPEK 2012	entièrement dans l'argile suite à une crue du ruisseau de Voillans
66	Rupt-aux-Nonains	55	route nationale RN4	oui	s'élargit à chaque pluie importante		comblement			Je Perrin	Juillet 2000	apparition moins d'un an après construction lors du 1er hiver

## **Annexe 4**

### **Préconisations pour l'aménagement des bétaires en Haute Normandie (David et al. 2010)**



### **5.3.2. Cas des bétoires ouvertes sous ou à proximité immédiate d'infrastructures**

Ce cas concerne les bétoires ouvertes à proximité d'une digue, d'un petit barrage, d'une route, ou encore d'un bâtiment.

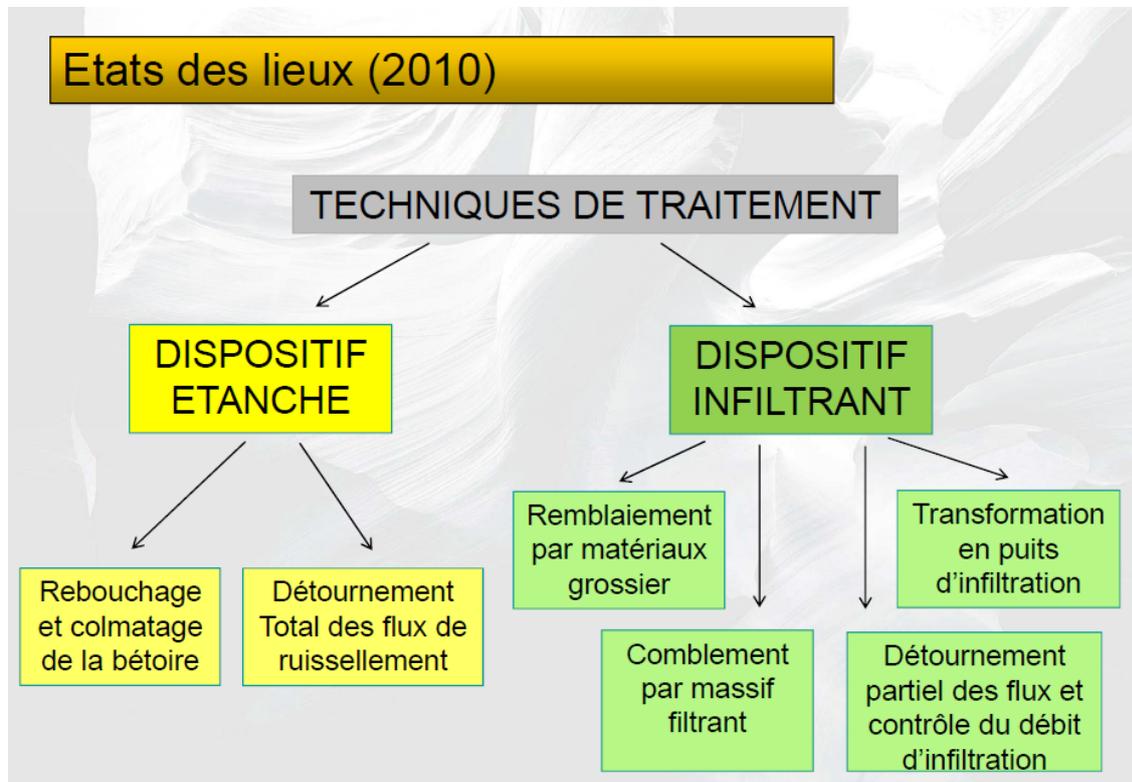
L'ouverture d'une bétoire directement sous une infrastructure existante exige une étude géotechnique approfondie de l'ensemble de la structure (notamment si elles concernent un bâtiment ou un barrage). L'aménagement de la bétoire n'est plus à l'ordre du jour. S'il s'agit d'un nouveau projet, l'idéal consiste à déplacer l'infrastructure.

Pour les bétoires situées à proximité d'infrastructures existantes pour lesquels les mouvements différentiels peuvent rester admissibles (route, digue..), l'objectif est d'éviter une rupture franche en surface de type fontis. L'amplitude des tassements différentiels acceptable dépend du type d'infrastructure. Ainsi, la déformation admissible du sol ne doit pas dépasser 1 à 2 % pour les routes.

Le meilleur moyen de limiter les mouvements différentiels en surface est de mettre en place un géosynthétique adapté en fond de fouille de type géogrille ou géotextile tissé. On se reportera au paragraphe 4.3.7. Etant donné qu'aucun aménagement n'empêchera à long terme le développement d'une bétoire, l'objectif n'est pas tant d'empêcher la déformation que de la prévenir. Ainsi, outre le suivi des déformations de la surface, l'utilisation de géogrilles pré-instrumentées donnent la possibilité d'alerter dès l'apparition des premiers mouvements de terrain. Le poids des terrains de la structure routière ou de la digue permettra de mobiliser des forces d'ancrage et de reprendre ainsi les efforts qui se développent dans le géotextile lors de l'effondrement.

Parallèlement à l'utilisation d'une géogrille, la bétoire doit être rendue inactive afin d'éviter toute reprise des mouvements en surface. A cet effet, le comblement du corps de la bétoire dans la craie (cf. § 4.3.3) suivi du colmatage étanche de la bétoire sont préconisés (cf. § 4.3.4). Les caractéristiques du colmatage seront à adapter aux exigences de stabilité de chaque ouvrage. Par ailleurs, nous recommandons d'empêcher tout apport de ruissellement vers la bétoire afin de limiter le risque de réouverture de celle-ci. Un merlon de ceinturage ou un talus de contournement peuvent constituer des aménagements complémentaires répondant à cet objectif.

Dans le cas des zones à forte intensité karstique (vallées sèches où sont observés des alignements de bétoires), il sera préférable, par sécurité, de déplacer la digue ou le petit barrage vers une zone sans ou à plus faible activité karstique.







**Centre scientifique et technique**  
**Direction Eau, Environnement, Ecotechnologies (D3E)**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)