Document public

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

## Phase 2 : Retours d'expérience, conceptualisation, recommandations

Rapport final

**BRGM/RP-66446-FR**
Décembre 2016

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

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

## Phase 2 : Retours d'expérience, Conceptualisation, recommandations

Rapport final

**BRGM/RP-66446-FR**
Décembre 2016

**J. Perrin, G. Noury**
Avec la collaboration
**d'E. Rzycka (BRGM)**

| **Vérificateur :** | **Approbateur :** |
|---|---|
| Nom : E. Vanoudheusden | Nom : P. Audigane |
| Date : 23/02/2017 | Fonction : Responsable d'Unité |
| Signature : | Date : 20/03/2017 |
| | Signature : |

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

Géosciences pour une Terre durable
brgm

**Mots-clés** : Karst, Effondrements, Affaissements, Aménagement, Prévention, Fontis, Infiltration.

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

**Perrin J., Noury G.** avec la collaboration de **Rzycka E.** (2016) - Évaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique. Phase 2 : Retours d'expérience, conceptualisation, recommandations. Rapport final. BRGM/RP-66446-FR, 96 p., 48 ill., 3 ann.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

# Synthèse

Ce rapport décrit les résultats finaux de l'étude, programmée dans le cadre du Programme de Travail sur les Risques Naturels de la DGPR de 2015 & 2016, qui a pour objectif d'évaluer le rôle des aménagements anthropiques sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique (cavités naturelles). Cette étude s'est déroulée en deux étapes : une analyse bibliographique et un retour d'expérience en année 1, l'analyse des retours d'expérience et une modélisation conceptuelle des processus physiques en année 2. L'objectif finalisé est de proposer une série de recommandations visant à limiter l'apparition de désordres pouvant impacter les aménagements ou leurs environs immédiats.

L'étude bibliographique a montré 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. Sur la base des 77 retours d'expérience collectés, la concentration des eaux d'infiltration est la plus impactante sur le territoire national. Celle-ci est causée par quatre types d'aménagements : les bassins (32 cas), les canalisations aériennes (15 cas), les canalisations enterrées (15 cas) et les ouvrages d'infiltration ponctuelle (10 cas).

L'analyse des retours d'expérience montre des désordres liés à des aménagements pour tous les types de contexte karstique (40 pour le contexte calcaire, 30 pour la craie, 7 pour le gypse) avec une prépondérance d'événements dans le cas des karsts carbonatés sous couverture meuble. Ce résultat est cohérent avec la forte sensibilité de ces karsts couverts à l'aléa mouvement de terrain (Perrin *et al.,* 2014). Dans ce contexte, le processus dominant est le soutirage ou la suffosion et la desquamation des matériaux meubles de la couverture vers les vides karstiques qui en sont le réceptacle. Les aménagements touchés par ces désordres sont presque toujours mis hors d'usage (ouvrages hydrauliques) ou mis en péril (bâtiments). Quelques cas de ruines ou de victimes liées aux désordres doivent être retenus comme cas extrêmes.

La vitesse d'apparition des désordres suite à la mise en place d'un aménagement est très variable (à titre d'exemple : instantané lors de la réalisation d'un forage à plus d'un siècle pour le cas d'un canal de dérivation). La nature de l'aménagement (par exemple le flux d'eau ou la charge hydraulique imposée en surface) et le contexte géologique (cohésion des matériaux, épaisseur de la couverture, nature du karst, etc.) vont fortement contrôler la cinétique du phénomène.

L'aménagement va accélérer des mécanismes déjà actifs mais qui, normalement, progressent sur des échelles de temps bien plus longues (accélération de l'érosion interne en karst sous couverture, accélération de la dissolution en contexte de gypse), voire, pourra initier un processus inopérant en conditions naturelles (mise en place d'un gradient hydraulique, saturation d'un terrain non saturé, augmentation des pressions d'eau interstitielle, *etc*.). Les résultats de la modélisation exploratoire montrent que les paramètres clés dans l'accélération ou l'apparition de l'instabilité sont :

Dans le cas d'une concentration de l'infiltration :

La perméabilité, la cohésion et l'épaisseur de la couverture, la nature de l'aménagement (débit d'infiltration, charge imposée, variations de charge ou de débits) ;

Dans le cas de modifications du niveau piézométrique :

La position de la nappe par rapport à l'interface couverture-karst, la dynamique de la nappe (amplitude des variations, vitesses de variation).

Sur la base de ces résultats, il est pertinent de proposer une série de **recommandations** qui pourront ensuite servir dans des **documents de gestion du risque gravitaire** en particulier pour des territoires vulnérables aux désordres liés à la présence de karst (karst carbonaté sous couverture, gypse). De telles recommandations ont aussi un intérêt dans des documents à portée plus générale sur l'aménagement du territoire (**planification, urbanisme**), la **gestion des eaux superficielles**, etc.

De manière générale, si le contexte géologique est sensible, la première étape d'une étude doit comprendre un **diagnostic karstique** par un bureau d'étude spécialisé afin de préciser l'aléa mouvement de terrain.

**En cas d'aléa avéré et si l'aménagement ne peut pas être déplacé** en dehors de la zone d'aléa ou si le risque est considéré comme acceptable, alors il convient d'adapter la construction à l'aléa en prenant certaines **mesures préventives** (Illustration 45).

# Sommaire

**1. Introduction ..... 11**

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET OBJECTIFS ..... 11

1.2. RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 11

1.3. DÉFINITIONS RETENUES DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE ..... 13

**2. Retours d'expérience ..... 17**

2.1. MÉTHODOLOGIE ..... 17

2.2. ANALYSE DES RETOURS D'EXPÉRIENCE ..... 17
2.2.1. Représentativité générale ..... 17
2.2.2. Auteurs des expertises ..... 18
2.2.3. Nature des retours d'expérience ..... 19
2.2.4. Répartitions géographique et géologique ..... 20
2.2.5. Répartition temporelle ..... 22
2.2.6. Dynamique d'apparition du désordre ..... 23
2.2.7. Répartition par types d'aménagement ..... 24
2.2.8. Processus physiques et dimensions des désordres ..... 25
2.2.9. Dommages causés ..... 28
2.2.10. Traitements préconisés et réalisés ..... 29

2.3. SYNTHÈSE DES RETOURS D'EXPÉRIENCE ..... 29

2.4. ÉTUDE DE SITES ..... 30
2.4.1. Bassins de rétention en Haute Normandie (Seine-Maritime) ..... 30
2.4.2. Dérivation de cours d'eau : Canal de la Neste ..... 39
2.4.3. Fossé de drainage et conduites : Thiviers (informations fournies par F. Clément, CEREMA-Bordeaux) ..... 47
2.4.4. Puisards et ruissellement : Bonnevent-Veloreille ..... 49
2.4.5. Forage (informations fournies par F. Clément, CEREMA-Bordeaux) ..... 51
2.4.6. Rabattement de nappe : nord de Paris ..... 52

**3. Conceptualisation ..... 55**

3.1. APPROCHE THÉORIQUE ..... 55
3.1.1. Concentration des eaux d'infiltration ..... 56
3.1.2. Rabattement de la nappe karstique ..... 58
3.1.3. Perturbations physiques du sol ..... 60

3.2. MODÉLISATION NUMÉRIQUE ..... 62
3.2.1. Méthodologie ..... 62
3.2.2. Résultats ..... 63
3.2.3. Synthèse des résultats des simulations numériques ..... 68

**4. Synthèse et recommandations ..... 69**

**5. Conclusions et perspectives ..... 75**

**6. Bibliographie ..... 77**

## Liste des illustrations

Illustration 1 - Répartition des effondrements karstiques selon différentes facteurs déclencheurs dans quatre régions différentes (Waltham *et al.,* 2005) ..... 12

Illustration 2 - Répartition des effondrements karstiques selon différentes facteurs déclencheurs en Chine pour les périodes 1980-2000 et 2010-2010 (Meng *et al.,* 2012) ..... 12

Illustration 3 - Répartition des dates d'apparition des désordres ..... 18

Illustration 4 - Répartition des cas étudiés suivant les entités ayant réalisé les expertises ..... 18

Illustration 5 - Carte à l'échelle nationale montrant le nombre de retours d'expérience obtenus par départements ..... 20

Illustration 6 - Répartition des retours d'expérience par contexte géologique ..... 21

Illustration 7 - Répartition des retours d'expérience par contexte karstologique ..... 21

Illustration 8 - Répartition de l'apparition des désordres en fonction des mois ..... 23

Illustration 9 - Nombre de retours d'expérience par types d'aménagement et par contexte karstique ..... 25

Illustration 10 - Classification des retours d'expérience par processus menant à l'apparition du désordre et contexte karstique ..... 26

Illustration 11 - Diamètres et profondeurs des effondrements/affaissements en contexte carbonaté ; en vert désordres dans le contexte de la craie, en bleu désordres dans le contexte calcaire ..... 27

Illustration 12 - Répartition des diamètres en fonction des classes d'intensité du guide Cavités souterraines abandonnées ..... 27

Illustration 13 - Classification des retours d'expérience par types de dommage causé ..... 28

Illustration 14 - Ensembles lithologiques caractérisant le karst de la craie de Haute-Normandie (David *et al.,* 2010 d'après Laignel, 1997) ..... 31

Illustration 15 - Schéma conceptuel de l'infiltration dans les formations superficielles dans le cas d'une épaisseur importante d'argiles à silex (a) et dans le cas contraire (b) (Valdès *et al.* 2014) ..... 31

Illustration 16 - Carte du département Seine-Maritime montrant les désordres apparus en lien avec des aménagements hydrauliques et l'épaisseur des formations superficielles ..... 33

Illustration 17 - Comparaison des épaisseurs moyennes de la couverture et de la zone non saturée (Quesnel 1997) entre la population de bétoires à moins de 50 m d'un ouvrage hydraulique et toutes les bétoires ..... 33

Illustration 18 - Comparaison entre les ouvrages hydrauliques impactés et non impactés par une ouverture de bétoire ; * indique une valeur moyenne possiblement peu représentative car calculée sur 14 valeurs (informations issues de base de données des ouvrages hydrauliques de l'AREAS) ..... 34

Illustration 19 - Impact des désordres sur le type d'ouvrage hydraulique (90 % des ouvrages correspondent à une des quatre catégories représentées) ..... 34

Illustration 20 - Carte géologique à 1/50 000 du bassin versant de Commerce avec report des bétoires (pertes, dolines) recensées (BD-bétoires HNO) et des désordres (effondrements/affaissements de la BD-bétoires et 3 ajouts tirés des REX de la présente étude) ....35

Illustration 21 - Carte des épaisseurs des formations superficielles (argiles à silex et limons des plateaux) et réseau de talwegs montrant le lien avec la distribution spatiale des désordres et bétoires ....36

Illustration 22 - Types d'aménagement à l'origine d'un désordre (14 bassins de rétention, 6 drainages, 7 STEP, 1 mare ; soit 28 désordres) sur fond de carte de l'épaisseur des formations superficielles ....37

Illustration 23 - Principe de comblement d'un désordre (bétoire) décrit dans le REX34 (C. Védieu, Ecotone Ingénierie) ....38

Illustration 24 - Carte géologique depuis la source du canal de la Neste jusqu'à l'aval de la commune de Hèches ; les points rouges indiquent des désordres ; la ligne noire matérialise l'axe de la coupe géologique représentée Illustration 25 ; les triangles noirs indiquent les cavités naturelles recensées dans la BDcavités ....40

Illustration 25 - Coupe géologique issue de la carte géologique à 1/50 000 ....41

Illustration 26 - Localisation des principaux désordres recensés le long du canal et principales cavités naturelles sur fond de carte géologique ....42

Illustration 27 - Extrait du profil synthétique n° 1 passant directement au nord du canal effondré ; la lettre D indique la position de deux « dolines ». A = argile, M, MA = moraine, moraine argileuse, B = blocs, R = rocher, RF = rocher fracturé, F = fracture ; le rectangle bleu contoure les identifiants de sondages réalisés en 1952 ; les lignes horizontales sont à 10 m d'intervalle (d'après bureau d'investigation géotechnique, mars 1983) ....45

Illustration 28 - Impact des désordres sur le bâti du village de Hèches ; les désodres se situent à proximité immédiate du canal de la Neste (Bouroullec 2014) ....46

Illustration 29 - Localisation des principaux effondrements apparus sur le secteur d'étude (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA) ....48

Illustration 30 - Schéma de principe du traitement des effondrements par comblement en matériaux granulaires (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA) ....48

Illustration 31 - Contexte géologique du site de Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) (d'après Bayle, 2008) ....50

Illustration 32 - Contexte géologique et hydrogéologique du site de Bonnevent-Velloreille à gauche ; vue détaillée du secteur impacté par les désordres à droite ....51

Illustration 33 - 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) ....53

Illustration 35 - En haut : à droite bassin avec présence d'une couche peu perméable sous-jacente impliquant des écoulements en conditions non saturée ; à gauche bassin dans un contexte perméable, le flux d'infiltration est contrôlé par le rapport Dw/W. En bas, diagramme sans dimensions donnant l'évolution du rapport flux d'infiltration (I) sur perméabilité (K) en fonction de Dw/W (d'après Bouwer, 2002) ....57

Illustration 36 - Processus de soutirage par battement de la nappe karstique au niveau de l'interface karst-couverture envisagé par Newton (1987) ; les schémas décrivent une séquence temporelle allant du haut à gauche jusqu'en bas à droite avec deux battements de nappe successifs ....60

Illustration 37 - Calcul de la stabilité du toit d'une cavité dans la couverture pour un contexte non-saturé et une cavité qui n'évolue pas en taille ; les paramètres sont explicités dans le schéma de gauche et $c_u$ = la résistance au cisaillement, $\gamma$ = la masse volumique (Augarde *et al.,* 2003) .....61

Illustration 38 - Diagrammes de stabilité du toit d'une cavité dans la couverture pour le modèle fontis (à gauche) et pour les deux types de désordres (fontis = Mode I et affaissement = Mode II) (à droite), c = cohésion et $\phi$ = angle de frottement, H = épaisseur de la couverture, D = diamètre de la cavité (d'après Drumm & Yang, 2005).....61

Illustration 39 - Courbes de stabilité à l'effondrement du toit de cavités présentant des configurations variables (largeur w, épaisseur du toit rocheux t, qualité du massif rocheux RMR), soumises à une charge située à la surface du sol (Waltham & Lu, 2007) .....61

Illustration 40 - Évolution des teneurs en eau pour le cas du bassin de rétention (scénario de base) à quatre temps successifs ; les conditions saturées sont représentées en rose (100 % de saturation) .....64

Illustration 41 - Temps de saturation simulés pour le scénario de base et huit configurations.....65

Illustration 42 - Évolution de la pression interstitielle entre la base du bassin et le toit de la nappe pour les différentes configurations à la moitié du temps de saturation (le profil à saturation est également représenté pour comparaison).....65

Illustration 43 - Évolution des teneurs en eau pour le cas d'un débit de fuite en surface (scénario de base) à quatre temps successifs ; les conditions saturées sont représentées en rose (100 % de saturation) ; les mailles à charge imposée (zone saturée) sont indiquées en gris sur le graphique 10 h. .....67

Illustration 44 - Temps d'atteinte du régime pseudo-permanent et taux de saturation atteint sous ce régime (valeur minimale sur le profil vertical) .....67

Illustration 45 - Évolution de la pression interstitielle entre la surface du sol et le toit de la nappe pour les différentes configurations à la moitié du temps d'atteinte du régime pseudo-permanent (le profil au régime pseudo-permanent est également représenté pour comparaison) .....68

Illustration 46 - Tableau synthétisant les mesures préventives préconisées en cas d'aménagement dans un contexte sujet au risque mouvement de terrain lié à la présence de karst ....71

Illustration 47 - À 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).....72

Illustration 48 - 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) .....73

## Liste des annexes

Annexe 1 - Fiche pour la collecte de retours d'expérience .....83

Annexe 2 - Tableau de synthèse des retours d'expérience .....89

Annexe 3 - Préconisations pour l'aménagement des bétoires en Haute Normandie (David *et al.,* 2010) .....93

***Note*** *: cette étude a bénéficié des informations et échanges avec les personnes suivantes que nous tenons à remercier : Pierre Azémard, Véronique Berche, Frédéric Clément, Benoit Colin, Charles Kreziak, Nejema Zergaoui, Sylvain Haussard, David Mathon (CEREMA), Hubert Camus (CENOTE), Bernard Collet (DDT70), Arnaud Dacar (Communauté de Communes Caux-Seine), Laurent Danneville (Parc Régional des Grands Causses), Guy Forestier (CG70), Thomas Lebourg (Université de Nice Sophia Antipolis), Jérôme Ledun (AREAS), Ludovic Lhuissier (CAGC), Mathieu Liniger (CG25), Paul-Henri Mondain (Calligée), Philippe Muet, David Moreau, Guillaume Pensuet (GINGER CEBTP), Arnaud Quiniou (DDTM76), Amélie Lecomte, Philippe Gombert (INERIS), Eric Dissler (Fugro), Christophe Védieu (Ecotone Ingénierie), Isabelle Bouroullec, Charles Cartannaz, Bastien Colas, François Crastes de Paulet, Pierre-Yann David, Benjamin Detante, Edouard Equilbey, Christophe Garnier, Thomas Gutierrez, Julier Louart, Nathalie Marcot, Baptiste Meire, Pierre Pannet, Florence Rivet, Aurélien Vallet (BRGM).*

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET OBJECTIFS

Ce rapport présente les résultats finaux de l'étude qui a pour objectif **d'évaluer le rôle des aménagements anthropiques sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique,** programmée dans le cadre du Programme de Travail sur les Risques Naturels de la DGPR sur deux ans (2015-2016). La première année, qui a consisté en une étude bibliographique et les résultats provisoires du retour d'expérience, est présentée dans un rapport (Perrin & Noury, 2015), dont le contenu est partiellement repris dans ce rapport final. Celui-ci, outre la finalisation du retour d'expérience, est consacré à 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 n'a concerné que les contextes carbonatés alors que les retours d'expérience traitent de tous les contextes karstiques (carbonatés 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 connu, 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'impact 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, un retour d'expérience à l'échelle nationale et un travail exploratoire de modélisation (analyse de sensibilité).

## 1.2. RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'analyse bibliographique montre que la proportion de désordres induits par des causes anthropiques est de 87 % en Chine sur la base d'une analyse de près de 45 000 désordres et de 58 % en Pennsylvanie sur la base de l'analyse de 1 574 désordres (Illustration 1). En Chine, l'essentiel des désordres induits est lié au rabattement de la nappe karstique par pompages alors qu'en Pennsylvanie, ils sont principalement liés 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 différentes 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 (3-10 %), 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 | | | | | |
| | | Tunnel and mine excavation | Pumping | Reservoir impounding | Vibration loading | Waste liquid infiltration | Drilling operations |
| 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 différentes facteurs déclencheurs en Chine pour les périodes 1980-2000 et 2010-2010 (Meng et al., 2012).*

Même si les 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 d'effondrements**.

Outre son rôle essentiel dans les processus de karstification (action de dissolution des roches), l'eau est l'agent principal qui provoque le mouvement de terrain, via l'entraînement de matériaux granulaires (érosion interne), 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'expériences menés dans le cadre de ce projet et du projet précédent sur l'aléa effondrement (Perrin *et al.,* 2014, 2015), l'impact du rabattement de la nappe karstique (hors fluctuations d'origine naturelle) sur l'apparition

d'effondrements est un scénario relativement limité sur le territoire métropolitain[1]. De fait, dans le cadre de la présente étude, une attention particulière est portée au processus principal qui est l'infiltration des eaux et leur cheminement à travers la couverture jusqu'à l'aquifère karstique. L'étude bibliographique de l'année 1 du projet (Perrin & Noury, 2015) a montré deux grandes catégories d'aménagement modifiant l'infiltration des eaux : 1) les aménagements concentrant les infiltrations (gestion des eaux pluviales, fuites de réseau, bassins de rétention, canaux, irrigation) ; 2) les puisards et forages mis en place pour ré-infiltrer les eaux superficielles.

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 effondrements, vulnérabilité de l'aquifère, et/ou gestion des inondations lors d'aménagements.

## 1.3. 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 $(CO_3)^{2-}$. La calcite qui compose essentiellement les calcaires est un carbonate de calcium. Une autre roche carbonatée relativement répandue est la dolomie qui est un 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 : Il s'agit d'un déplacement massif de sol sous une pression d'eau (Lautrin, 2002). Par exemple, ce phénomène peut se produire dans un conduit fossile où l'eau accumulée en amont exerce une pression suffisante sur le bouchon de sol qui sera déstabilisé et transporté.

Décolmatage : synonyme de débourrage.

[1] Pour rappel, 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. § 2).

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 est 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.

Desquamation : érosion interne par micro-ruptures mécaniques de la voûte d'une cavité (par exemple, cloche de fontis) liées au poids de l'eau (pression interstitielle) en conditions non saturées.

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 classées 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 initié par la rupture du toit d'une cavité poursuivis par la montée du vide (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 parcourue 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 : résultat 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 : 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 : érosion interne et progressive de l'ensemble des particules quelle que soit leur taille par écoulement en conditions saturées.

Suffosion : érosion interne et progressive de la fraction fine (argile, silt, *etc*.) d'un sol par écoulement en conditions saturées.

Vallée sèche : vallée abandonnée par le cours d'eau 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 dépend des fluctuations des niveaux piézométriques.

# 2. Retours d'expérience

## 2.1. MÉTHODOLOGIE

L'approche a consisté en la mise au point d'un questionnaire de retour d'expérience (Annexe 1), 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). Ces fiches pourront être basculées sur un serveur du Ministère afin de faciliter leur consultation ultérieure.

## 2.2. ANALYSE DES RETOURS D'EXPÉRIENCE

Un tableau de synthèse des retours d'expérience collectés au 1er décembre 2016 est présenté en Annexe 2 : **77 retours d'expérience ont pu être réunis et analysés**.

### 2.2.1. Représentativité générale

Le nombre d'informations collectées semble suffisant pour offrir un panorama représentatif de la problématique à l'échelle nationale.

Elle n'est toutefois pas exhaustive en raison d'une part du nombre restreint d'entités interrogées, et d'autre part, de la perte certaine d'informations avec le temps. Les entités pouvant avoir à gérer ce type de problème sont en effet nombreuses :

- les entités réalisant le premier constat :
  - les particuliers,
  - les entreprises,
  - les collectivités locales.

En l'absence de risque avéré ou en cas de dégâts considérés comme mineurs, ces premiers constats peuvent ne faire l'objet d'aucun signalement : les évènements sont alors oubliés.

- les entités procédant à des investigations détaillées :
  - lorsqu'ils existent : les services techniques des entités précédentes,
  - les services de l'État ou des collectivités locales : BRGM, CEREMA, géologue des conseils départementaux, *etc*,
  - des entreprises privées spécialisées : bureaux d'étude nationaux ou locaux,
  - d'autres spécialistes : universitaires, spéléologues.

Ces analyses complémentaires donnent normalement lieu à l'édition d'un écrit (note, avis, rapport) qui sera archivé. Vient alors la question de l'archivage et de la perpétuation de la mémoire : dans le cas où le problème initial ne se manifeste plus, son souvenir peut disparaître plus ou moins rapidement des mémoires.

C'est en cela que des bases de données nationales telles que la BD Cavités ou la BD Mouvements de terrain cherchent à garder une trace de telles informations. La réalité montre cependant que le signalement de tels évènements n'est pas systématique.

Sur les 77 cas, 64 années d'apparition sont connues. À l'exception de quelques cas emblématiques, peu de désordres référencés sont anciens : près de 90 % datent de moins de 15 ans. Cette répartition illustre les difficultés liées à la perte d'information avec le temps. Même si on peut imaginer que des paramètres liés aux changements globaux (changement climatique, augmentation de l'urbanisation) participent à l'accroissement des désordres, ces aspects ne peuvent expliquer seuls l'allure hyperbolique de la fréquence des désordres. Celle-ci résulte d'un biais lié à la récolte de données et s'explique logiquement par le fait que peu de données datant de plus de 15 ans (avant les années 2000) n'ont été communiquées (perte de la mémoire des désordres les moins marquants).

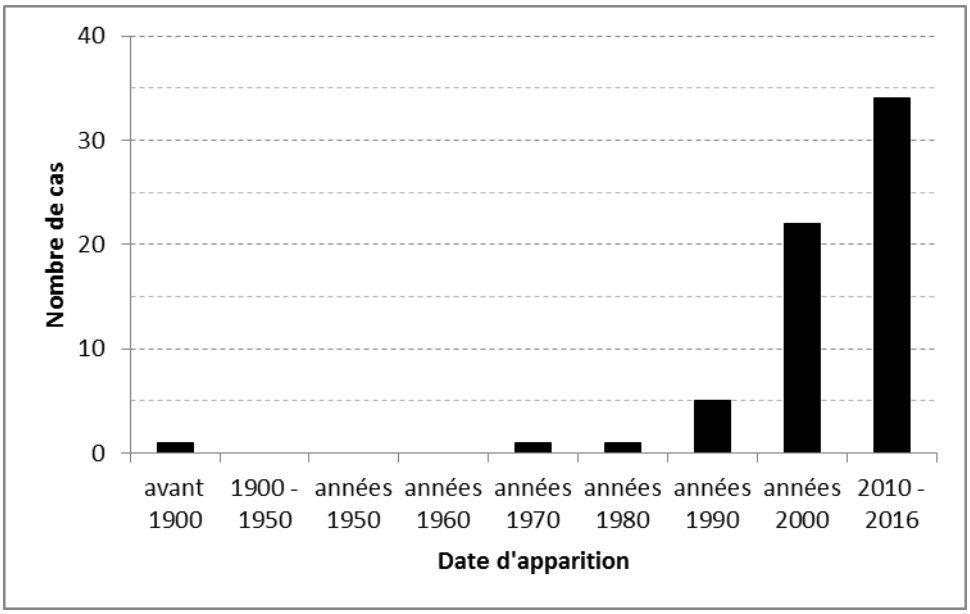



*Illustration 3 - Répartition des désordres selon leur date d'apparition.*

En conclusion, il est donc très vraisemblable qu'un certain nombre de cas ne soit pas inclus au présent retour d'expérience.

### 2.2.2. Auteurs des expertises

Les cas étudiés ont été analysés par les entités suivantes (Illustration 4) :

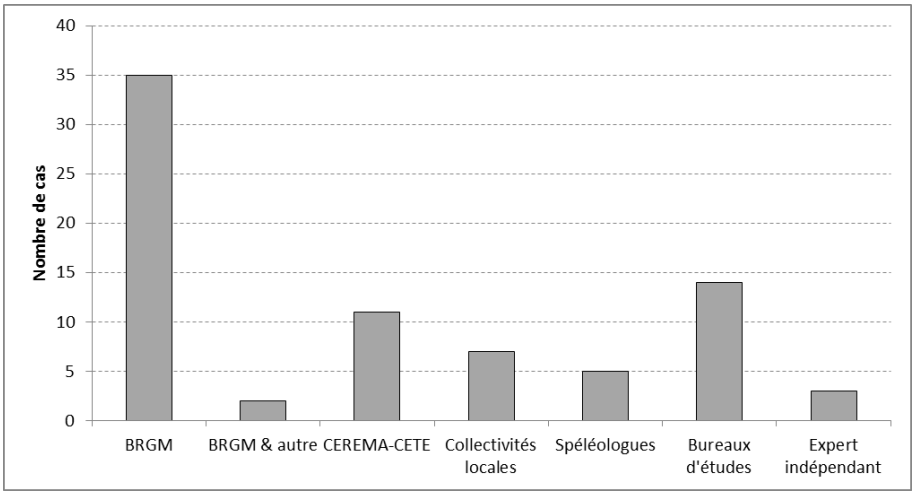



*Illustration 4 - Répartition des cas étudiés suivant les entités ayant réalisé les expertises.*

En tant qu'auteur de la présente étude, le BRGM est assez naturellement surreprésenté dans cette répartition (45 % des expertises) : l'ensemble des bases de données de l'établissement ainsi que tous les ingénieurs « risques » travaillant dans les implantations régionales ont été interrogés.

On notera par ailleurs les points suivants :

- l'apport des spéléologues s'est fait en partie à travers la lecture des revues spécialisées ;
- plusieurs bureaux d'étude en géotechnique ont favorablement répondu à notre démarche, parfois avec facilité pour certaines agences régionales (communications de cas bien documentés). En particulier Hydrogéotechnique et le CEBTP ont fourni un grand nombre de données.

### 2.2.3. Nature des retours d'expérience

L'étude d'un effondrement karstique suit tout ou partie du cheminement suivant :

- premier avis : constat, interventions d'urgence. Un expert en risque naturel réalise généralement une inspection visuelle de la zone impactée et une enquête documentaire plus ou moins approfondie. L'avis se conclut habituellement par des recommandations : sécurisation du site, étude complémentaire, remise en état ;
- suite à ce premier avis et en cas de risque pour la sécurité des biens et/ou des personnes, ce premier avis inclut des recommandations d'investigations complémentaires. Celles-ci comprennent au moins une étude du site impacté, par exemple par la réalisation d'investigations géophysiques et/ou géotechniques. Leur objectif est d'identifier la persistance de vide et ainsi d'évaluer le risque au droit de l'ouvrage / de l'aménagement ;
- que cette étude complémentaire ait eu lieu ou non, une remise en état du site est généralement effectuée. Elle peut donner lieu à l'édition d'un rapport ;
- dans des cas plus complexes, par exemple en cas d'enjeu particulier ou d'une zone impactée étendue ou encore d'une répétition des désordres, une étude plus complète peut être réalisée. Il s'agit d'une étude de site « étendue » : étendue dans l'espace et/ou étendue dans le temps (par exemple suivi de l'évolution et étude des mécanismes). Son objectif est d'abord de chercher à comprendre le fonctionnement de l'ensemble de la zone pour pouvoir anticiper les potentiels désordres à venir.

Dans la présente étude, 55 % des retours d'expériences (42 cas sur 77) concernent des premiers avis (constats, interventions d'urgences, traitements de demandes de classement au titre des catastrophes naturelles). 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.

17 cas (22 %) disposent d'une étude de site. Celle-ci se concentre généralement sur le désordre en lui-même. Elles confirment la plupart du temps le premier avis qu'on pouvait avoir sur la nature et l'origine de ce désordre.

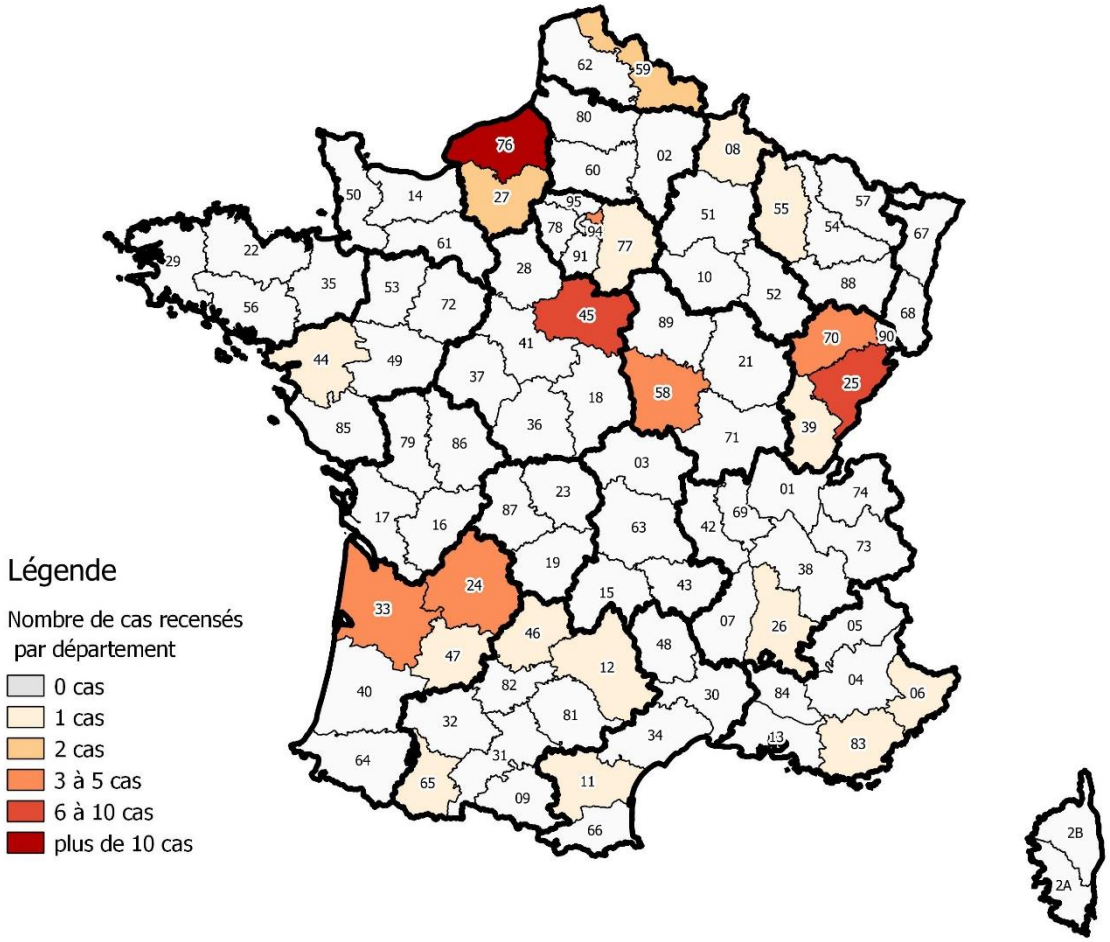
4 cas (5 %) sont documentés uniquement avec les opérations de remise en état.

Les 14 derniers cas (18 %) font l'objet d'une étude plus complète, au moins sur la nature et les origines du désordre, parfois moins sur les opérations de remise en état.

Sur les 77 cas répertoriés, 67 correspondent à des effondrements, 5 à des affaissements et 5 cas comptent à la fois des affaissements et des effondrements.

### 2.2.4. Répartitions géographique et géologique

La répartition spatiale des retours d'expérience montre le plus d'exemples en Haute-Normandie (29 cas) puis en Franche-Comté (15 cas) et en Aquitaine (8 cas) (Illustration 5). Notons également le cas du Loiret qui se classe parmi les départements avec de nombreux cas (6 cas). Cette distribution est indicative, car elle est évidemment influencée par les réponses obtenues qui ne sont que partiellement représentatives.




| Département | | Nombre de cas | Département | | Nombre de cas |
|---|---|---|---|---|---|
| 76 | Seine-Maritime | 27 | 6 | Alpes-Maritimes | 1 |
| 25 | Doubs | 8 | 8 | Ardennes | 1 |
| 33 | Gironde | 5 | 26 | Drôme | 1 |
| 70 | Haute-Saône | 3 | 30 | Gard | 1 |
| 24 | Dordogne | 2 | 39 | Jura | 1 |
| 27 | Eure | 2 | 44 | Loire-Atlantique | 1 |
| 45 | Loiret | 2 | 46 | Lot | 1 |
| 58 | Nièvre | 2 | 47 | Lot-et-Garonne | 1 |
| 59 | Nord | 2 | 55 | Meuse | 1 |
| | | | 65 | Hautes-Pyrénées | 1 |
| | | | 83 | Var | 1 |
| | | | 93 | Seine-Saint-Denis | 1 |

*Illustration 5 - Nombre de retours d'expérience obtenus par départements.*

40 cas concernent le karst du calcaire, 30 le karst de la craie et 7 seulement le cas du gypse (Illustration 7).

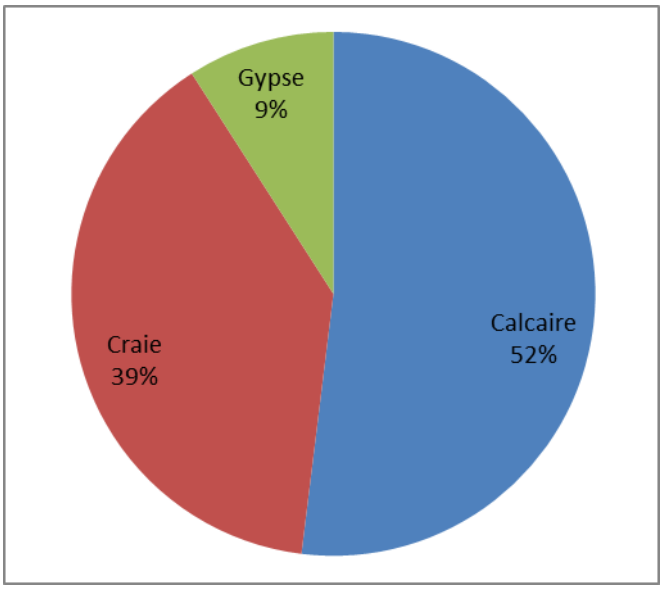



*Illustration 6 - Répartition des retours d'expérience par contexte géologique.*

La majorité des cas répertoriés dans le calcaire ou la craie se situe en contexte de karst sous couverture (65 cas, 85 %), le karst nu ne correspondant qu'à 8 cas (10 %) et le karst de contact à 4 cas (5 %) (Illustration 7).

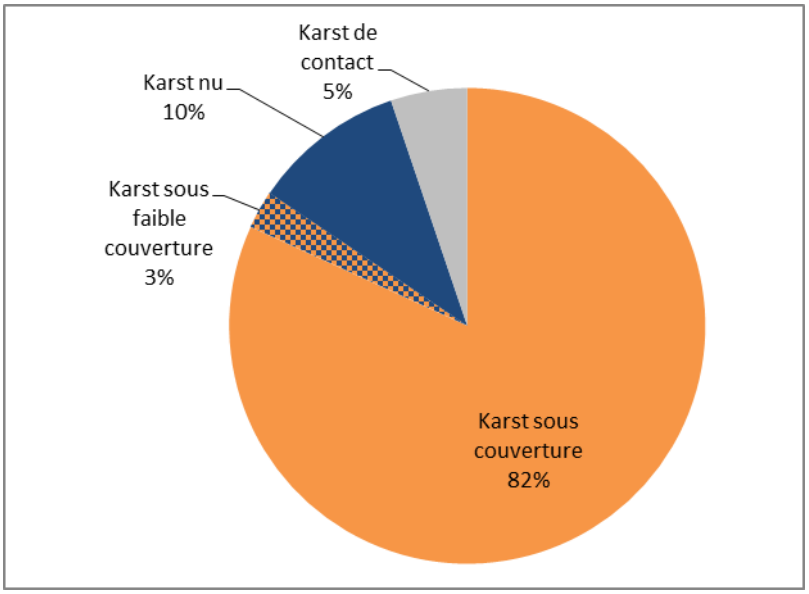



*Illustration 7 - Répartition des retours d'expérience par contexte karstologique.*

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 sensibilité 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. Ce contraste peut être précisé en prenant en compte les surfaces occupées par ces différents types de karst. D'après Nicod (2010), les karsts sous couverture représentent en effet environ 170 000 km² de la surface du territoire national contre 40 000 km² pour les karsts nus. À surface égale, il y a donc environ 2 à 2,5 fois plus de désordres liés à des aménagements en contexte de karst sous couverture qu'en contexte de

karst nu. Cette estimation assez grossière doit être nuancée vis-à-vis de la densité des aménagements : les karsts nus se trouvent en effet dans des secteurs généralement en relief et donc peu aménagés au contraire des karsts sous couverture, plus représentés dans les secteurs de plaine, urbanisés.

De la même manière, même si les aménagements sur les karsts de contact semblent peu touchés par des désordres, il convient de rappeler que ce type de karst représente une très faible superficie (à l'interface entre karst nu et sous couverture), non estimée à l'échelle nationale.

En rapprochant le type de karst au contexte géologique, il est intéressant d'observer que :

- 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.

Il est plus difficile de mettre en perspective le nombre de désordres liés à des aménagements vis-à-vis de la situation « normale » (sans aménagement). Toutes les zones karstiques n'ont en effet pas fait l'objet d'étude détaillée (inventaire de désordres à l'échelle d'un secteur géologique homogène, fréquence d'apparition des désordres, *etc*.) à l'exception du val d'Orléans et de la Haute-Normandie. Pour effectuer cette comparaison, il convient également de prendre en compte la perte d'information liée au temps comme évoquée au § 2.2.1.

- pour le val d'Orléans, sur la période 2010 - début 2016, 6 désordres sur les 30 sites impactés sont liés à des aménagements, soit 20 % des cas ;
- la Haute-Normandie dispose de données nombreuses sur les effondrements, mais, à l'exception des désordres apparus dans les points bas (plus logiquement associés à une origine karstique), il est rarement facile de leur attribuer une origine précise (karstique ou anthropique = marnière). En se concentrant sur les bassins, l'étude de la Seine-Maritime détaillée au § 2.4.1 indiquerait qu'entre 5 et 15 % de ces aménagements seraient liés à un désordre d'origine karstique.

### 2.2.5. Répartition temporelle

À l'exception des désordres décrits par Toulemont (1987) au nord de Paris qui s'échelonnent entre 1903 et 1975, de celui du cas 76 (tunnel de Thoraise - 1855) et de celui du cas 69 (tranchée couverte de Sevran - 1974), tous les désordres pour lesquels une année d'apparition a été communiquée (62 cas) sont apparus entre 1980 et 2016. L'analyse d'une possible évolution au fil des ans du nombre d'effondrements n'a pas été entreprise en raison en particulier de la perte de mémoire sur les évènements anciens.

Pour 53 cas, le mois d'apparition est connu (Illustration 8), parfois de manière supposée (8 cas). L'automne et l'hiver cumulent environ 1,5 fois plus de cas que le printemps et l'été (18 + 14 = 32 cas contre 11 + 10 = 21 cas). Si elles étaient connues, les précipitations précédant les effondrements permettraient de préciser ce constat. Il conviendrait également de prendre en compte le régime des précipitations, relativement variable selon les régions (climat océanique de la Normandie / climat continental du Jura / *etc*.). Ce constat est en tout cas cohérent avec le rôle de l'eau, considéré par tous comme le principal facteur déclencheur des mouvements : ceux-ci sont plus globalement fréquents lors des saisons « humides ».

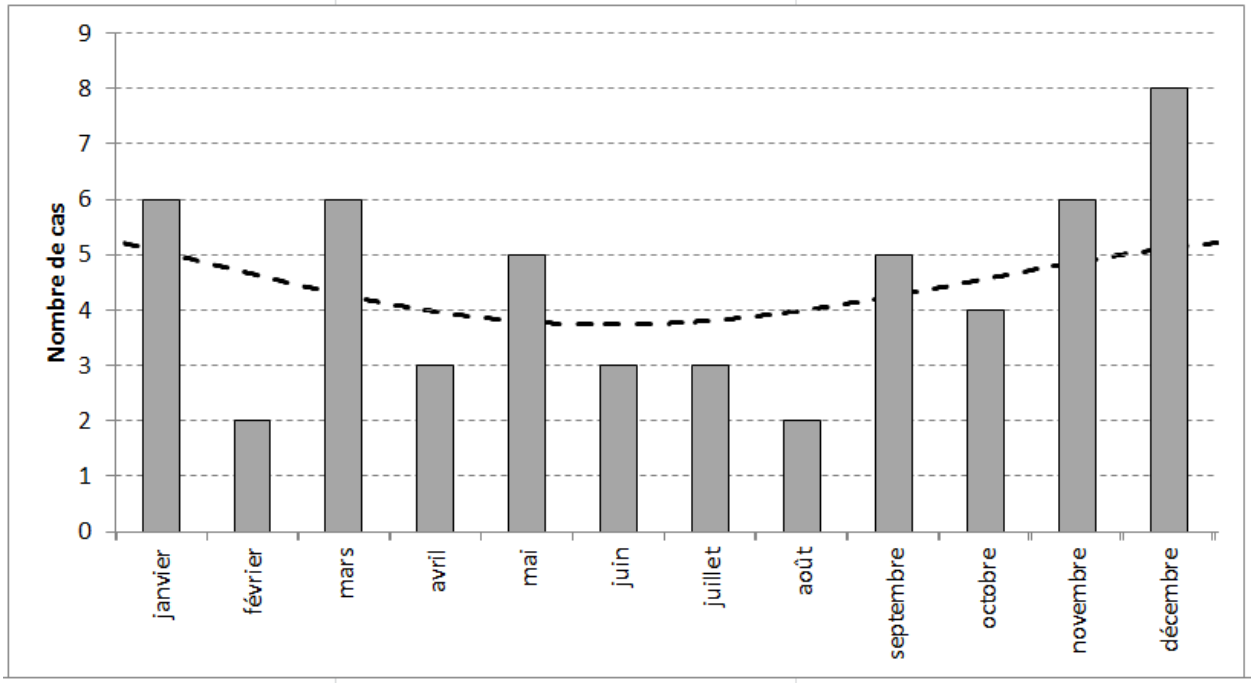



*Illustration 8 - Répartition de l'apparition des désordres en fonction des mois.*

### 2.2.6. Dynamique d'apparition du désordre

Les années d'aménagement ne sont connues, voire supposées, que pour 15 cas (soit 19 % du total).

L'écart entre date d'aménagement et apparition du désordre est très variable. Il convient ici de distinguer :

- 3 évènements (20 %) ayant eu lieu lors de travaux (délai d'apparition quasi instantané) :
  - 1 cas de forage (soutirage rapide),
  - 1 cas de creusement de tunnel (débourrage supposé),
  - 1 cas de pompage (contexte gypse).
- 12 évènements (80 %) touchant des ouvrages achevés *a priori* sans encombre. En excluant volontairement deux cas atypiques, le délai moyen (ainsi que le délai médian) avant l'apparition de l'effondrement est d'une douzaine d'années. Dans le détail :
  - 6 cas de réservoirs : délais allant de 1 à 32 ans (moyenne : 15 ans),
  - 4 ouvrages d'écoulement (canal, dérivation de cours d'eau, fossé) délais allant de 12 à plus de 150 ans,
  - 2 ouvrages générant des infiltrations très ponctuelles (puits d'infiltration et gouttière) : délai de 8 et 29 ans.

Dans le détail on retiendra les cas suivants, relativement bien renseignés :

- Bonnevent : infiltration eaux de ruissellement dans des puisards : puisards années 1980, désordres 1993 puis 2008 ;
- canal de la Neste : des sondages montrent une augmentation de la taille de cloches de fontis de plusieurs mètres en 31 ans ; canal mis en eau en 1862, premier effondrement signalé en 1909 (47 ans plus tard) ; doublement de la capacité de débit du canal en 1950, gros effondrement en 1983 (33 ans plus tard) ;

- Seine-Maritime : écarts entre construction des bassins de rétention et désordres compris entre 1 et 15 ans (moyenne 6,6 ans sur 27 bassins au total).

### 2.2.7. Répartition par types d'aménagement

Sur la base des retours d'expérience, 6 catégories d'aménagements à l'origine des désordres ont été distingués (Illustration 9) :

- les bassins : ils correspondent 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.). Ils sont généralement aériens. Nous y avons aussi associé une cuve enterrée ;
- les canalisations aériennes : elles collectent différents types d'eau (cours d'eau, eaux de ruissellement, etc.) ;
- les canalisations enterrées : elles collectent elles aussi différents types d'eau (ruissellement, eau potable, eaux usées, etc.) mais ne sont généralement pas visibles ;
- les ouvrages d'infiltration ponctuelle : ils correspondent 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). Nous y avons aussi associé la vidange d'une piscine : ce n'est pas un ouvrage à proprement parler, mais l'action en résultant est similaire ;
- 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 ;
- les autres ouvrages : un seul cas dans les retours d'expérience : le cas d'un karst ayant débourré lors du percement d'un tunnel.

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.

L'Illustration 9 montre que les bassins sont les plus représentés avec 32 cas (42 % des 77 cas), suivent, à égalité, les canalisations à l'air libre et enterrées (15 cas chacun = 19 %), les ouvrages d'infiltration ponctuelle (10 cas = 13 %), les pompages (4 cas = 5 %).

On note une prédominance des bassins (60 % des cas) et des conduites enterrées (55 % des cas) en contexte crayeux, alors qu'en contexte calcaire la répartition est relativement plus homogène (les bassins et canalisations à l'air libre sont les plus représentés avec 32 + 32 = 64 % des cas pour ce contexte). Cette prédominance peut être en partie liée au contexte régional avec la présence de nombreux bassins de lutte contre les inondations.

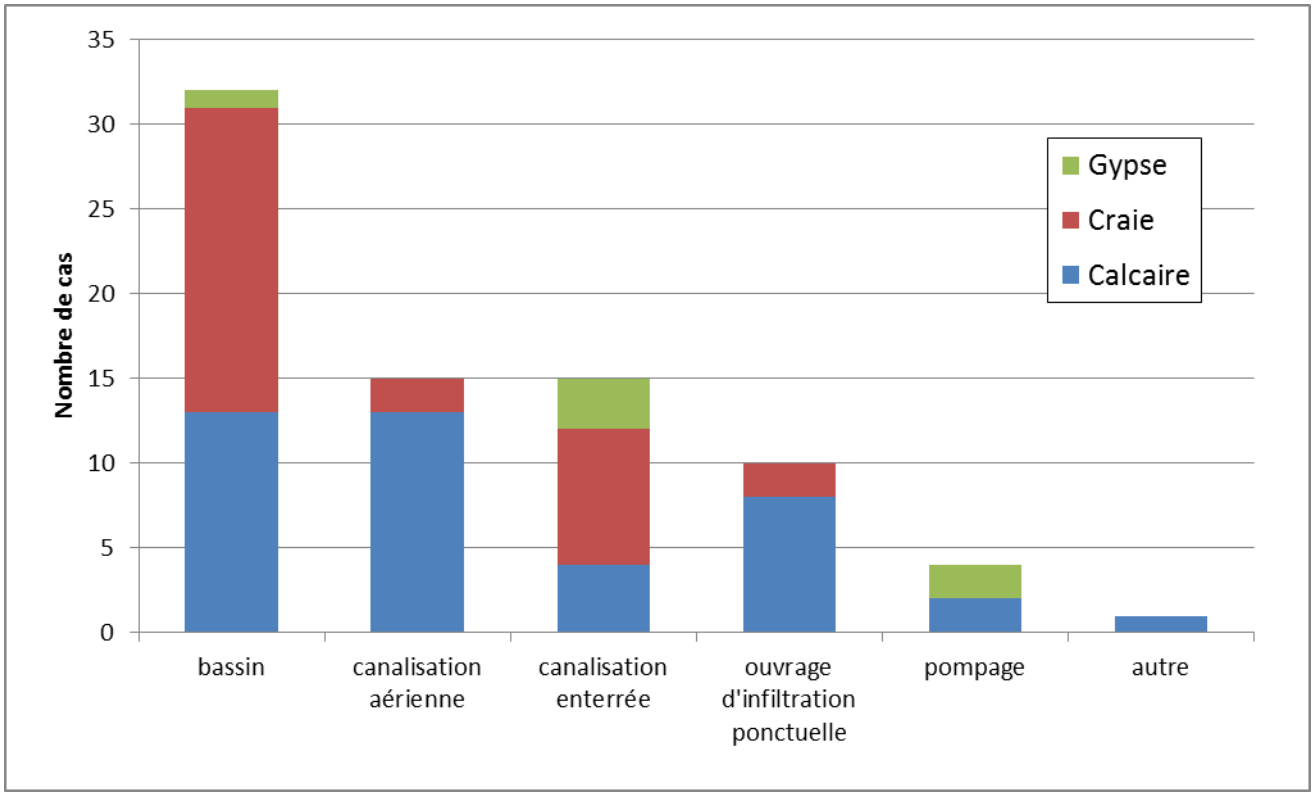



*Illustration 9 - Nombre de retours d'expérience par types d'aménagement et par contexte karstique.*

### 2.2.8. Processus physiques et dimensions des désordres

En ce qui concerne les processus physiques menant aux désordres décrits dans les retours d'expériences, on note (Illustration 10) :

- la prédominance du soutirage (54 cas, la majorité correspondant au karst sous couverture) ;
- suivi du débourrage dans 12 cas (incluant 4 des 6 cas en karst nu) ;
- dans 4 cas la distinction entre débourrage ou soutirage n'a pas pu être faite ;
- le contexte du gypse est naturellement associé à la dissolution, celle-ci étant parfois mêlée, de manière secondaire, à du soutirage.

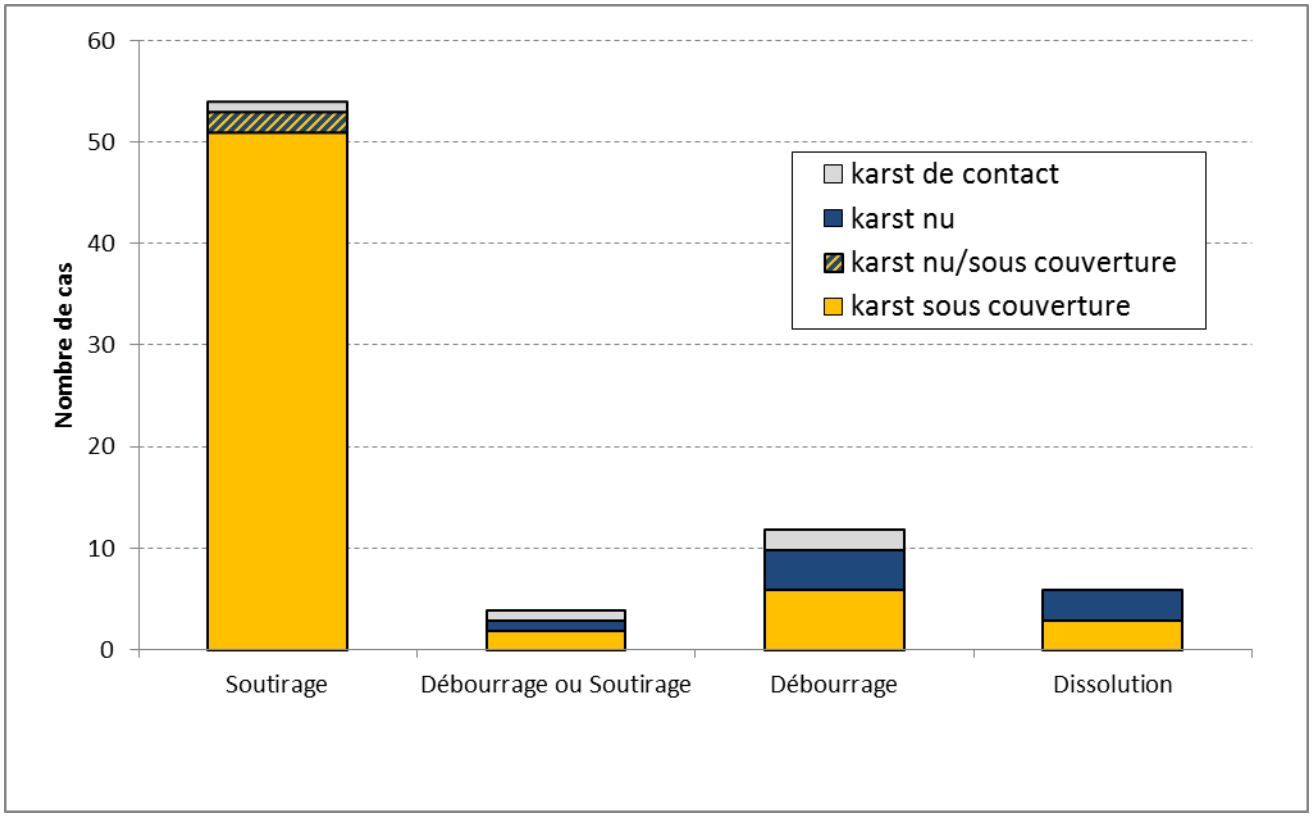



*Illustration 10 - Classification des retours d'expérience par processus menant à l'apparition du désordre et contexte karstique.*

Concernant les dimensions des effondrements et affaissements, les diamètres ne sont pas connus pour 11 cas et les profondeurs pour 14 cas. Il reste 55 cas où diamètre et profondeur sont tous les deux connus.

Les trois exemples dans le gypse se distinguent par leurs dimensions importantes avec pour le cas d'Aubervilliers (fiche 57) 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 - fiche 61), l'effondrement mesurait 6 m de diamètre et 25 m de profondeur ; finalement dans la ville de Bargemon (fiche 60), les affaissements peuvent atteindre jusqu'à 80 m de circonférence.

Pour les exemples en contexte calcaire, les désordres ont en général des diamètres inférieurs à 10 m à l'exception d'un cas et des profondeurs inférieures à 7 m (Illustration 11). Les cas de débourrage présentent un rapport profondeur/diamètre plus important que les cas de soutirage.

Les désordres ayant lieu dans la craie sont généralement plus « évasés », plus ouverts (rapport profondeur/diamètre inférieur), que ceux ayant lieu dans le calcaire.

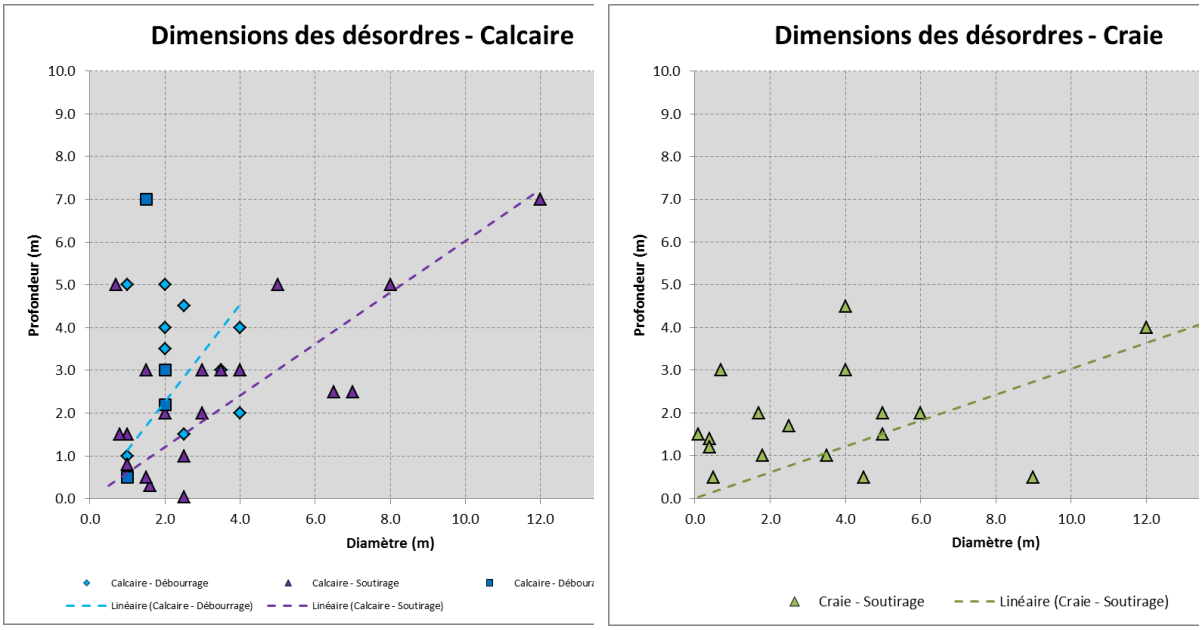



*Illustration 11 - Diamètres et profondeurs des effondrements/affaissements en contexte carbonaté ; en vert : désordres dans le contexte de la craie, en bleu désordres dans le contexte calcaire.*

En termes d'intensité, si l'on se réfère à la classification du guide méthodologique Cavités souterraines abandonnées (diamètres seuils à 3 et 10 m), la répartition des désordres se fait suivant le même ordre pour les cas dans le calcaire et les cas dans la craie : majorité des désordres d'intensité limitée, puis intensité modérée puis élevée (Illustration 12).

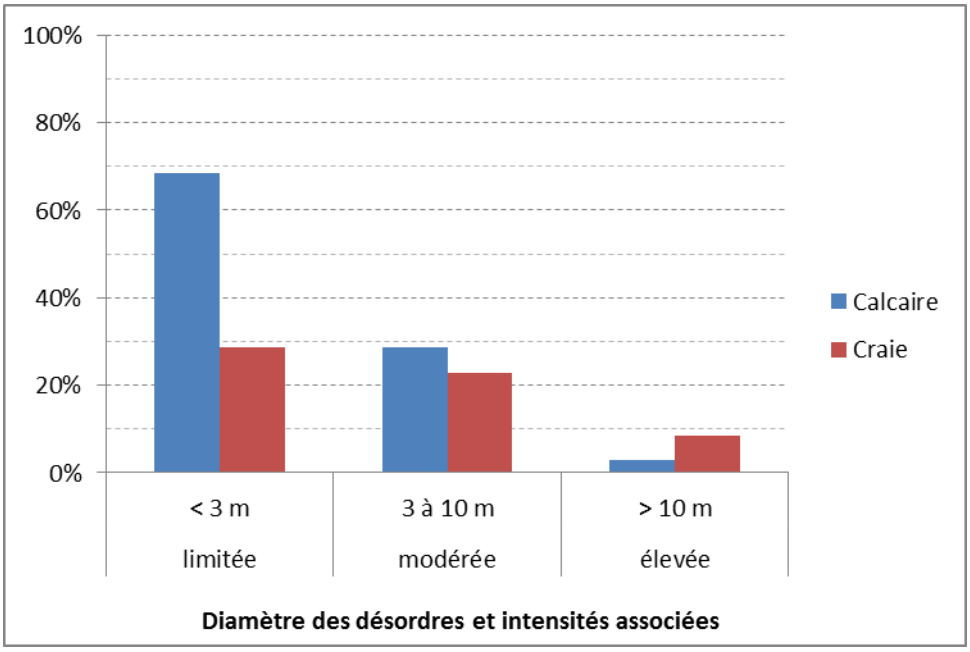



*Illustration 12 - Répartition des diamètres en fonction des classes d'intensité du guide PPRN. Cavités souterraines abandonnées (2012).*

### 2.2.9. Dommages causés

La majorité (97 %) des effondrements recensés a provoqué des dommages. Cette très forte proportion est logique puisque c'est souvent dans le cas d'un dommage qu'une expertise est programmée. En l'absence de dommage ou d'enjeux à proximité, les effondrements sont *a priori* rarement signalés et font rarement l'objet d'un rapport d'expertise.

Pour 4 cas, plus d'un type de dommage ont été signalés. Le § 2.4 détaille certains de ces évènements. Ces cas sont exclus du traitement statistique décrit ci-dessous.

La mise hors d'usage de l'aménagement, possible ou avérée, est le dommage le plus fréquent (57 à 66 % des cas) (Illustration 13). Cela est essentiellement lié à la nature même des aménagements impactés. Les bassins sont en effet les ouvrages les plus touchés (§ 2.2.7) : dès lors qu'ils présentent un effondrement, leur rôle (rétention essentiellement) n'est plus assuré. Dans ce cas, l'aménagement (bassin, drainage, canalisation, forage) est à l'origine du désordre.

La mise en péril des aménagements, possible ou avérée, vient en seconde position (8 à 17 %). Elle concerne essentiellement des bâtiments mais aussi des routes. Dans ce cas, l'aménagement mis en péril n'est pas directement à l'origine du désordre mais son existence implique la présence de l'aménagement connexe qui a engendré le désordre (canalisation/drainage à proximité immédiate du bâtiment ou de la route mise en péril).

Seul un évènement a entraîné la ruine d'une route (fiche 20 de l'Annexe 2). Ce dommage a donné lieu à la démolition préventive d'un bâtiment. Il s'agit d'un effondrement ayant eu lieu en pleine ville.

Le dernier évènement traité ici est le plus dramatique puisqu'il a causé deux victimes (fiche 56 de l'Annexe 2). Le fontis apparu serait lié à une opération de forage.

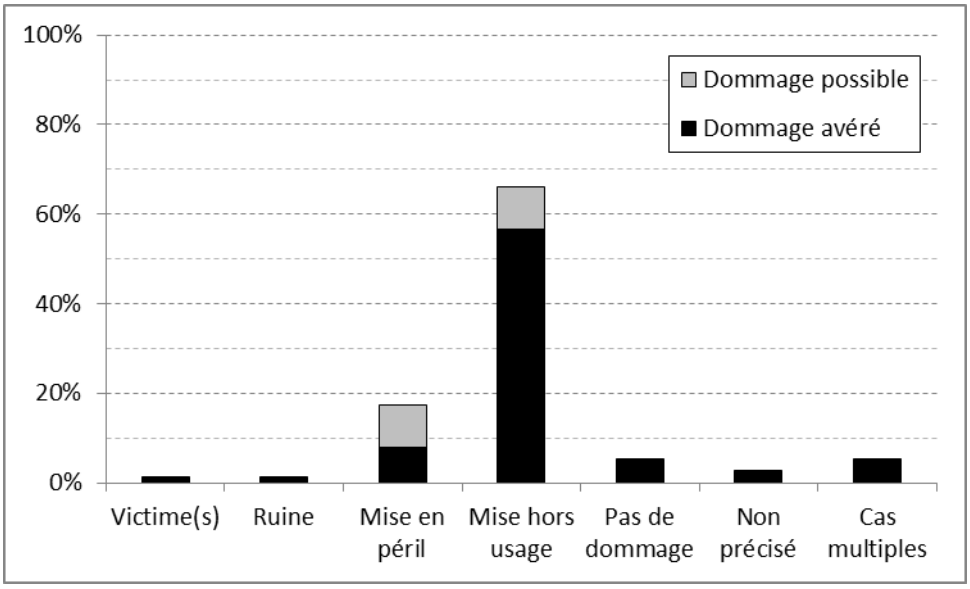



*Illustration 13 - Classification des retours d'expérience par types de dommage causé.*

### 2.2.10. 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. Études 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. Études (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 § 0).

## 2.3. SYNTHÈSE DES RETOURS D'EXPÉRIENCE

Les résultats des retours d'expérience (77 cas) montrent que les différents types d'aménagement à l'origine de désordres (bassins, canalisations à l'air libre ou enterrées, ouvrages d'infiltration ponctuelle, pompages et tunnel) correspondent à ceux identifiés dans les références bibliographiques internationales (§ 1.2). Une différence notable est le rôle minime des pompages puisque ceux-ci ne sont évoqués que dans quatre cas.

L'ensemble des régions karstiques françaises est touchée par ce phénomène. Les départements de la Seine-Maritime, du Doubs et du Loiret cumulent à eux trois 55 % des désordres recensés.

Les données sont trop fragmentaires pour le contexte du gypse (7 cas) pour permettre une analyse spécifique. 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 supposé est le soutirage des matériaux meubles de

la couverture vers les vides karstiques qui en sont le réceptacle (70 %) ; ce soutirage peut être très significativement amplifié par les concentrations d'eau d'infiltration causées par les aménagements. Les aménagements les plus touchés sont les bassins (42 %) suivis, à égalité, par les canalisations à l'air libre et les canalisations enterrées (19 + 19 = 38 %). 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 ou la couverture meuble est relativement épaisse (>25 m).

Dans la majorité des cas recensés, les désordres causent des dommages majeurs aux ouvrages puisqu'ils aboutissent soit à leur mise hors d'usage (ouvrages hydrauliques), soit à leur mise en péril (bâtiment). Deux cas ont même impliqué, pour le premier la ruine de l'ouvrage et pour le second, des victimes.

Les retours d'expérience étant essentiellement basés sur des interventions réalisées directement après l'apparition d'un désordre, sans suivi des éventuelles études complémentaires et travaux réalisés, les informations sur les traitements réalisés sont fragmentaires (connues dans 45 % des cas) et quasi-inexistantes pour ce qui concerne leur efficacité.

## 2.4. ÉTUDE DE SITES

Dans cette section, une description plus détaillée de cas représentatifs de chacune des catégories d'aménagement les plus impactantes est proposée :

- Seine-Maritime : bassins ;
- canal de la Neste (Hautes Pyrénées) : canalisation aérienne ;
- Thiviers (Dordogne) : canalisation aérienne et enterrée ;
- Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) : ouvrages d'infiltration ponctuelle ;
- site non communiqué : forage ;
- nord de Paris : pompage.

Cette description se base sur les fiches de retour d'expérience, des échanges informels avec les intervenants sur les dossiers et des rapports et publications. Ces cas d'étude sont ensuite utilisés pour « dimensionner » la modélisation conceptuelle des processus (§ 3).

### 2.4.1. Bassins de rétention en Normandie (Seine-Maritime)

Dans l'ex-région Haute-Normandie, les formations carbonatées et karstifiées de la craie sont recouvertes par des formations meubles constituées de bas en haut par 1) des argiles à silex résultant de l'altération de la craie et 2) de limons des plateaux (lœss). Des poches ou des lentilles de sédiments tertiaires (sables) peuvent être contenues dans les argiles à silex (Illustration 14) (David *et al.,* 2010). Ces formations superficielles sont d'épaisseurs variables : 3-30 m pour les argiles à silex, 1-15 m pour les limons des plateaux (5-6 m en moyenne) en Seine-Maritime. Les variations d'épaisseurs des argiles à silex résulteraient de variations d'épaisseurs syn-sédimentaires des craies originelles. Les dépôts sédimentaires sont toujours moins épais sur les bords qu'au milieu du bassin (Quesnel, 1997).

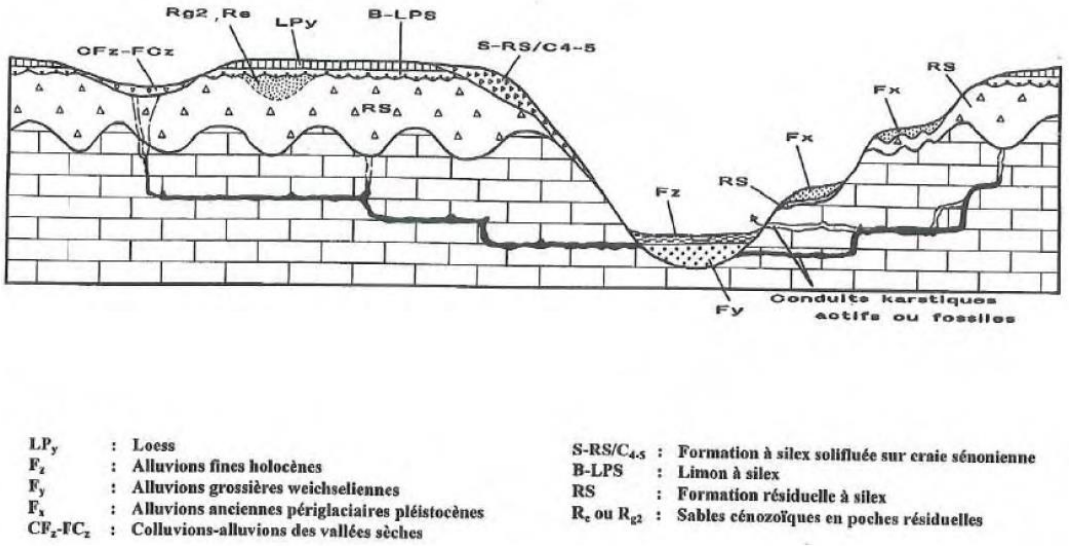



*Illustration 14 - Ensembles lithologiques caractérisant le karst de la craie de Haute-Normandie (David* et al., *2010 d'après Laignel, 1997).*

Le fonctionnement hydrogéologique de ces formations de couverture est encore mal connu. De petites nappes perchées existent dans les argiles à silex, en particulier au sein des lentilles de sable tertiaire (Valdès *et al*., 2014). Ces argiles sont relativement peu perméables, elles présentent toutefois des contrastes de perméabilité importants, preuve de leur hétérogénéité spatiale : 4 x $10^{-5}$ m/s à 4 x $10^{-9}$ m/s d'après des tests d'infiltration in situ réalisé en Angleterre (Kinck *et al.* 1998 cité par Valdès *et al.* 2014). En règle générale, le toit de la nappe de la craie est situé sous la base des formations de recouvrement, cette nappe régionale est donc libre.

Valdès *et al*. (2014) montrent deux schémas conceptuels d'infiltration des eaux vers la nappe de la craie qui sont fonction de l'épaisseur des argiles à silex : des épaisseurs importantes favorisent la présence de nappes perchées dans les lœss et la présence d'infiltration concentrée par des bétoires ; au contraire dans le cas de faibles épaisseurs, l'infiltration serait globalement plus diffuse (Illustration 15).

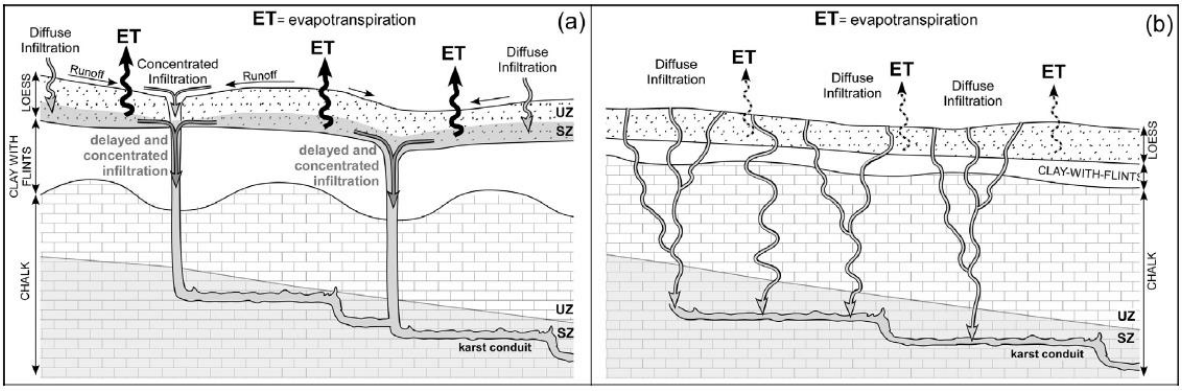



*Illustration 15 - Schéma conceptuel de l'infiltration dans les formations superficielles dans le cas d'une épaisseur importante d'argiles à silex (a) et dans le cas contraire (b) (Valdès* et al., *2014).*

### *À l'échelle départementale*

Plusieurs sources de données informent sur le rôle des aménagements dans l'apparition de désordres liés au karst :

1) les 27 retours d'expérience de la présente étude (15 bassins de rétention, 5 conduites enterrées, 2 fossés, une cuve enterrée et une station de lavage) ;
2) 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 (Topin 2001 cité par David *et al*., 2010) ;
3) l'AREAS[2] indiquent 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 (étude de 2001 citée par David *et al*., 2010) ;
4) une analyse de la base de données des bétoires de Seine-Maritime (David, 2012) croisée avec la base de données Castor recensant les ouvrages hydrauliques (mise à disposition par l'AREAS) a montré que 333 bétoires étaient situées à moins de 50 m d'un ouvrage hydraulique (sur un total de 7 176 bétoires recensées). Cette proximité marquée laisse penser qu'une partie importante de ces bétoires se soit ouverte en lien avec l'aménagement hydraulique ; la largeur/longueur moyenne des aménagements hydrauliques étant de l'ordre de 100 m (superficie = 10 000 $m^2$).

Le report de ces quatre sources d'information sur une carte d'épaisseur des formations superficielles (Quesnel, 1997) montre une densité d'événements plus élevée dans les secteurs à plus fortes épaisseurs (Illustration 16). À l'heure actuelle, on ne peut toutefois pas déterminer si ce lien est directement lié à l'épaisseur de cette couverture (présence d'une nappe perchée, montée de cloches de fontis favorisée) ou à des contextes de craie moins karstifiée dans les secteurs à plus faible recouvrement.

[2] Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols.

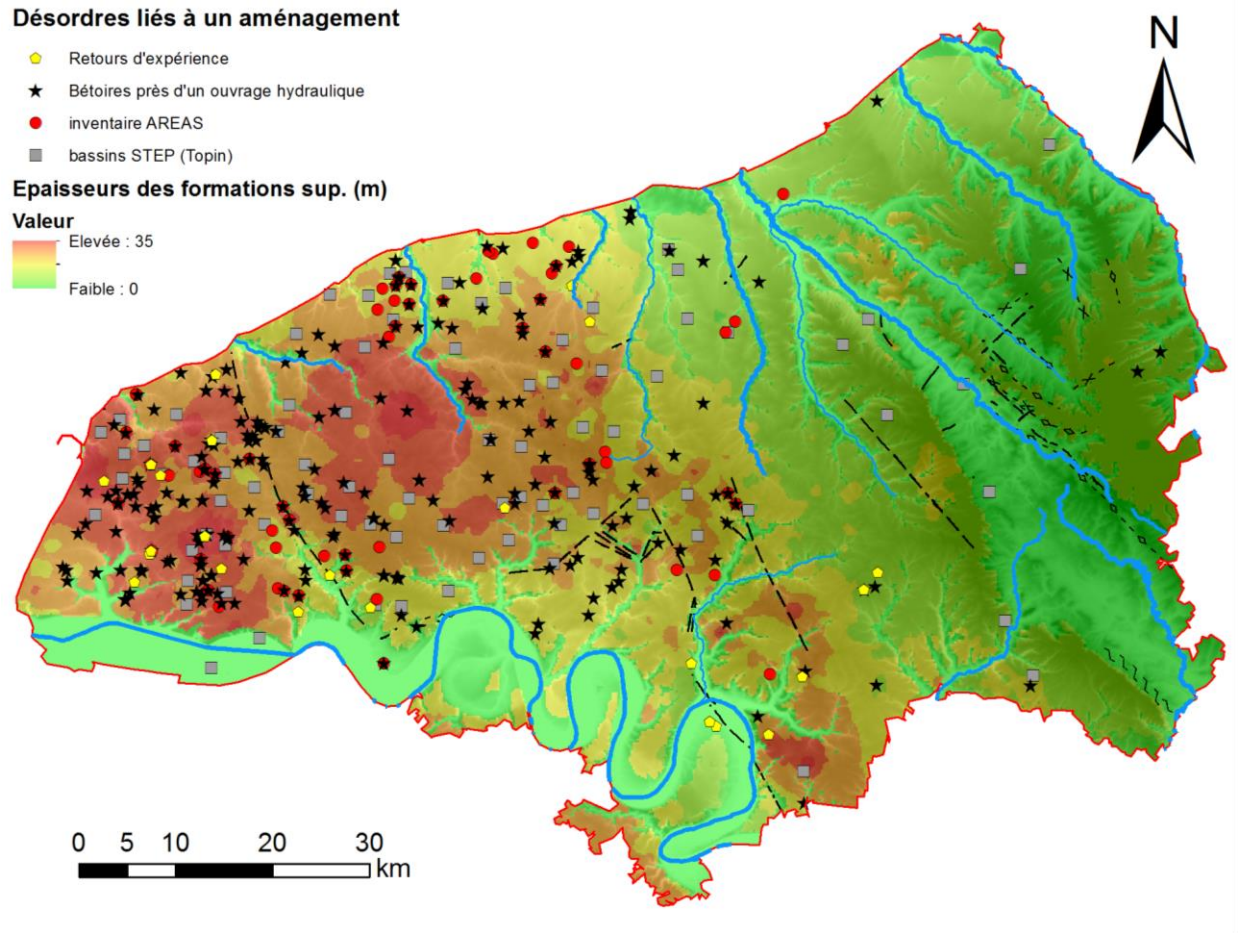



*Illustration 16 - Carte du département Seine-Maritime montrant les désordres apparus en lien avec des aménagements hydrauliques et l'épaisseur des formations superficielles.*

L'Illustration 17 montre qu'il n'y a pas de différences significatives de contexte géologique et hydrogéologique entre toutes les bétoires recensées dans la base de données de Seine-Maritime et les bétoires apparues en lien avec un ouvrage hydraulique. Ce résultat semble indiquer que les désordres ne sont pas liés à un contexte (hydro-)géologique particulier mais bien à la présence d'aménagement hydraulique.

| | Nb | Épaisseur de la couverture | Épaisseur des loess | Épaisseur des argiles | Épaisseur de la zone non saturée |
|---|---|---|---|---|---|
| **Toutes les bétoires** | 7 176 | 14,1 m | 3 m | 12 m | 50 m |
| **Bétoires à moins de 50 m d'un ouvrage hydraulique** | 333 | 15,4 m | 3 m | 13 m | 47 m |

*Illustration 17 - Comparaison des épaisseurs moyennes (en m) de la couverture et de la zone non saturée (Quesnel, 1997) entre la population de bétoires à moins de 50 m d'un ouvrage hydraulique et toutes les bétoires.*

La base de données des ouvrages hydrauliques de l'AREAS contient un certain nombre d'informations sur les ouvrages (dimensions, conception, capacité, etc.). Il a donc semblé intéressant de comparer les caractéristiques des deux populations d'ouvrages : ceux impactés par l'ouverture d'une bétoire (62 cas) et ceux n'ayant pas été impactés (351 cas). Cette comparaison montre que deux fois plus d'ouvrages non imperméabilisés sont impactés par des bétoires et les ouvrages impactés, bien que sensiblement de même capacité de stockage que les autres, semblent plus étalés en superficie (plus large emprise, mais tranche d'eau moindre) (Illustration 18).

En outre, l'Illustration 19 montre que pour les quatre types d'ouvrage hydraulique principaux (mare tampon, bassin de retenue en déblai, bassin de retenue en déblai/remblai et digue avec prairie inondable, représentant 90 % des ouvrages), les proportions d'ouvrages impactés et non impactés sont sensiblement les mêmes à l'exception des ouvrages de type digue avec prairie inondable qui apparaissent comme plus impactés (76 % des ouvrages hydrauliques sans bétoire et 24 % des ouvrages ayant montré l'apparition d'une bétoire).

| | ouvrages sans bétoire | ouvrages avec bétoire |
|---|---|---|
| Nombre | 351 | 62 |
| Imperméabilisation du fond | 19 % | 10 % |
| Hauteur max. de remplissage (m) | 3,1 | 2,1 |
| surface moy du fond ($m^2$) | 2 905 | 4 744* |
| emprise moy. totale ($m^2$) | 6 291 | 10 102* |
| capacité moy. totale ($m^3$) | 6 414 | 6 998 |

*Illustration 18 - Comparaison entre les ouvrages hydrauliques impactés et non impactés par une ouverture de bétoire ; * indique une valeur moyenne possiblement peu représentative car calculée sur 14 valeurs (informations issues de base de données des ouvrages hydrauliques de l'AREAS).*

| | Avec bétoire | Sans bétoire |
|---|---|---|
| Mare tampon | 17 % | 83 % |
| Bassin retenue déblai | 13 % | 87 % |
| Bassin retenue déblai/remblai | 13 % | 87 % |
| Digue avec prairie inondable | **24 %** | **76 %** |

*Illustration 19 -Impact des désordres sur le type d'ouvrage hydraulique (90 % des ouvrages correspondent à une des quatre catégories représentées).*

La dynamique d'apparition des désordres peut être approchée en comparant la date de réalisation de l'ouvrage hydraulique (disponible pour 27 cas) et la date de constat du désordre ; l'écart donne une durée maximale d'apparition puisqu'il est tout à fait concevable que le désordre se soit produit avant la date de constat. Pour les 27 ouvrages renseignés, la différence de temps est comprise entre 1 et 15 ans (6,6 ans en moyenne).

### *Analyse à l'échelle d'un bassin versant (Commerce, Pays de Caux)*

Le bassin versant de Commerce (168 $km^2$) en Pays de Caux a été retenu pour cette analyse, car il offre à la fois une densité élevée d'indices karstiques et de désordres liés au karst et une géologie relativement contrastée (deux types de craie, épaisseur variable de recouvrement) (Illustration 20). La BD-bétoires de Haute-Normandie (http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article116) recense un total de 424 bétoires (pertes, effondrements, dolines) au sein du bassin versant, parmi lesquelles 129 correspondent à des désordres (décrites comme effondrement ou affaissement de terrain). La grande majorité des désordres sont situés dans les limons des plateaux alors que pour quelques cas, le désordre est situé à proximité du contact avec les argiles à silex, il est donc possibles que ceux-ci se développent dans les argiles. Une faille importante orientée NNW-SSE traverse le bassin versant de part en part et fait remonter dans le compartiment Est des craies plus anciennes et plus argileuses. Il semble que la densité d'indices karstiques soit réduite dans ce secteur à présence de craie argileuse.

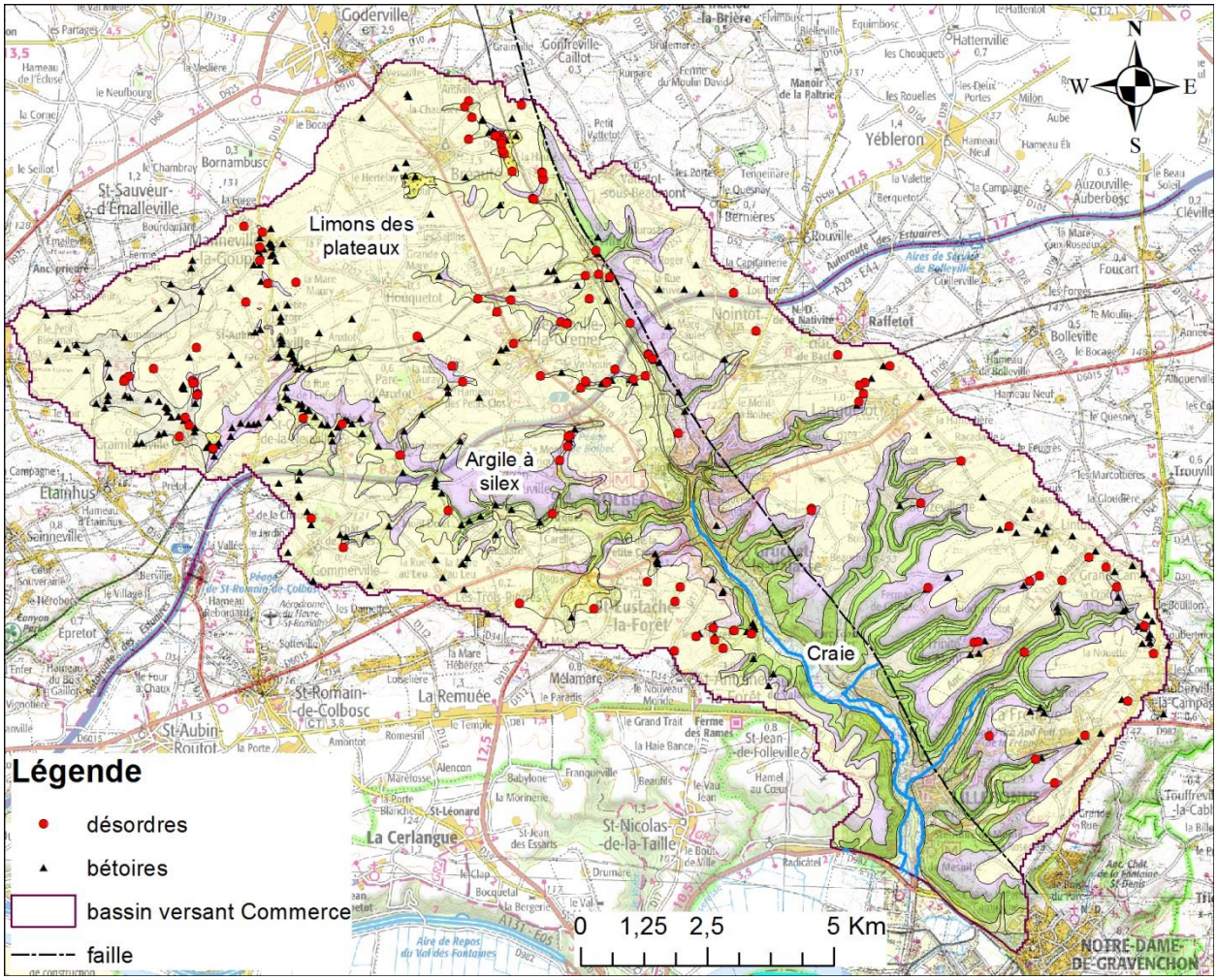



*Illustration 20 - Carte géologique à 1/50 000 du bassin versant de Commerce avec report des bétoires (pertes, dolines) recensées (BD-bétoires HNO) et des désordres (effondrements/affaissements de la BD-bétoires et 3 ajouts tirés des REX de la présente étude).*

La répartition des bétoires et désordres est fortement corrélée au réseau de talwegs (issus du MNT à pas de 25 m) et partiellement à l'épaisseur des formations superficielles avec plus d'indices dans les secteurs à plus forte épaisseur ; les parties amont des sous-bassins versant semblent également plus impactées par les bétoires (Illustration 21).

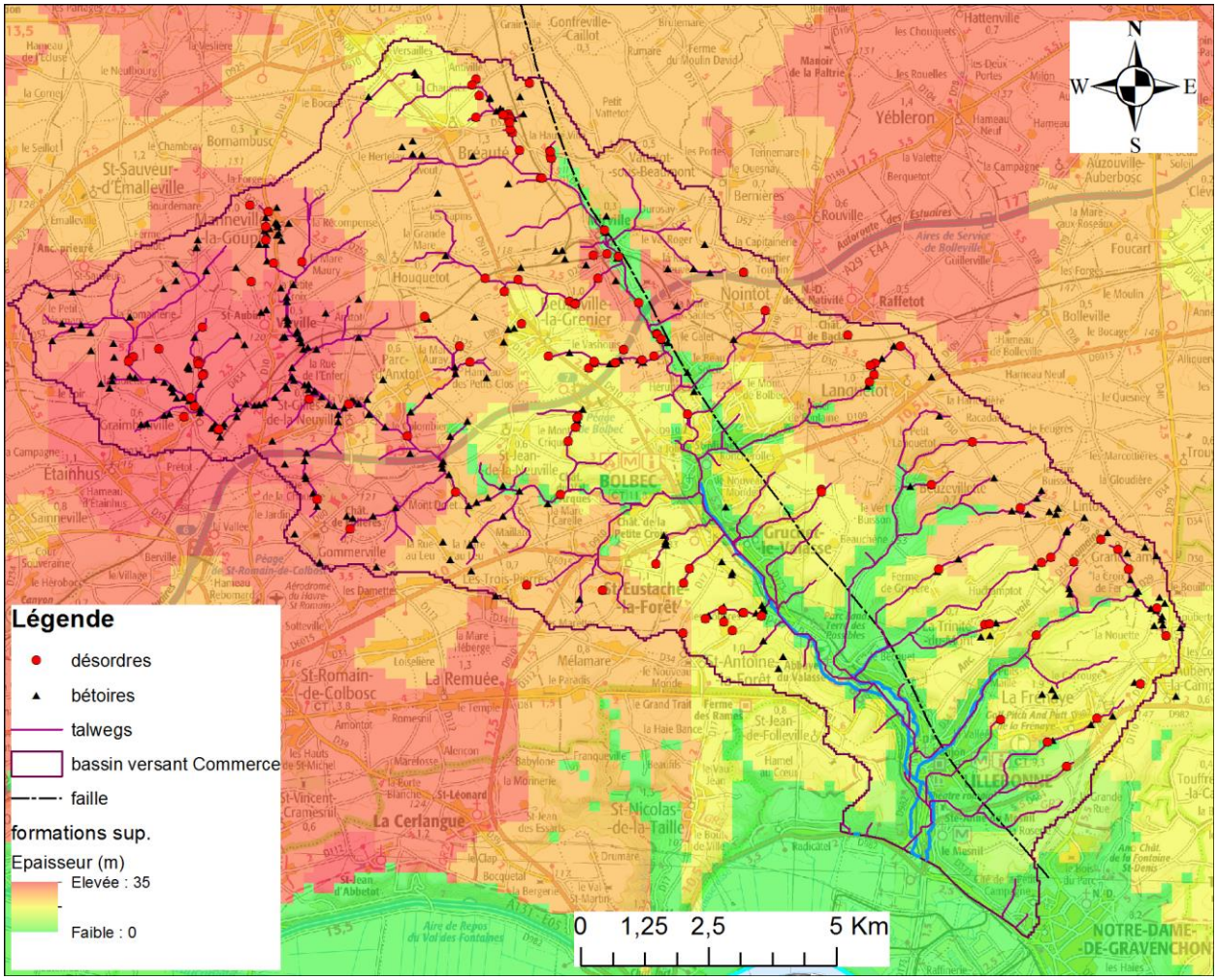



*Illustration 21 - Carte des épaisseurs des formations superficielles (argiles à silex et limons des plateaux) et réseau de talwegs montrant le lien avec la distribution spatiale des désordres et bétoires.*

Sur les 129 désordres recensés, 28 (22 %) sont en lien avec un aménagement à savoir (Illustration 22) : 7 bassins de STEP, 14 bassins de rétention, 6 aménagements assurant le drainage des eaux superficielles (drains, buses) et 1 mare. Dans tous les cas, il s'agit d'aménagements hydrauliques, ce qui est cohérent avec la localisation des désordres dans l'axe de talwegs (à l'exception de la mare). Il est possible qu'un nombre plus important de désordres soient liés à un aménagement, cependant les informations fragmentaires disponibles ne permettent pas d'en juger. Au regard de leur distribution spatiale, on ne remarque pas de différence significative entre les désordres liés à un aménagement et les désordres qui ne le sont *a priori* pas.

Peu de données sont disponibles quant aux dimensions des désordres : plusieurs effondrements sont de taille métrique alors que dans deux cas, des affaissements relativement importants sont indiqués (6 m de diamètre et 2 m de profondeur pour l'un, 20 m de diamètre et 3 m de profondeur pour l'autre).

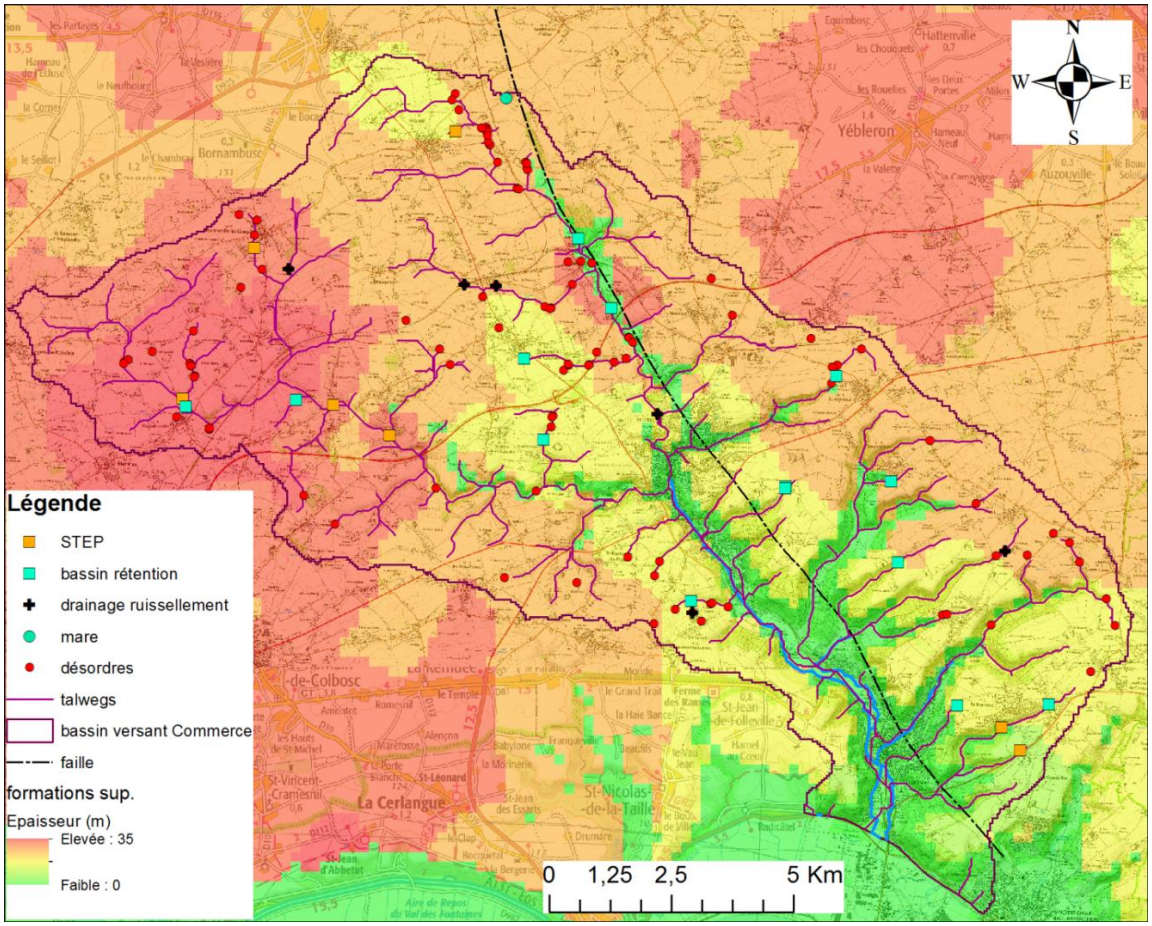



*Illustration 22 - Types d'aménagement à l'origine d'un désordre (14 bassins de rétention, 6 drainages, 7 STEP, 1 mare ; soit 28 désordres) sur fond de carte de l'épaisseur des formations superficielles.*

Le traitement préconisé est bien décrit dans les rapports d'expertise obtenus dans le cadre des retours d'expérience (trois évènements) :

- REX33 (2008) : curage ; béton de blocage en fond de fouille sur 1 à 1,5 m d'épaisseur ; remblai avec limon traité jusqu'au niveau fini du corps de digue ; imperméabilisation depuis le sommet de digue jusqu'à 10 m en amont du désordre par une géomembrane ; ancrage du complexe d'imperméabilisation en amont et à l'aval (sommet de digue) ;
- REX34 (2010, Illustration 23) : purge ; remblai compacté par couches de 0,4 m intercalées d'une géomembrane (dont une en fond de fouille) jusqu'à 1 m sous le niveau du terrain naturel ; pose d'une membrane étanche de type bentonitique ; remblaiement jusqu'au niveau du terrain naturel avec de la terre végétale et pose d'une borne témoin ;
- REX35 (2012) : terrassement et purge ; remblai avec matériaux argileux de bonne qualité (perméabilité inférieure à $10^{-7}$ m/s) ; étanchéification du secteur impacté et ses alentours par une géomembrane en PEHD ; modelage de terrain en vue de concentrer les eaux de ruissellement dans la partie étanchée.

Les traitements préconisés ont été réalisés dans les trois cas et aucun nouveau désordre n'a été signalé à ce jour, soit plusieurs années après le traitement (communication personnelle A. Dacar 8/12/2015).

Pour ces trois évènements décrits en détail, il semble que le désordre ne s'est développé que dans les limons des plateaux.

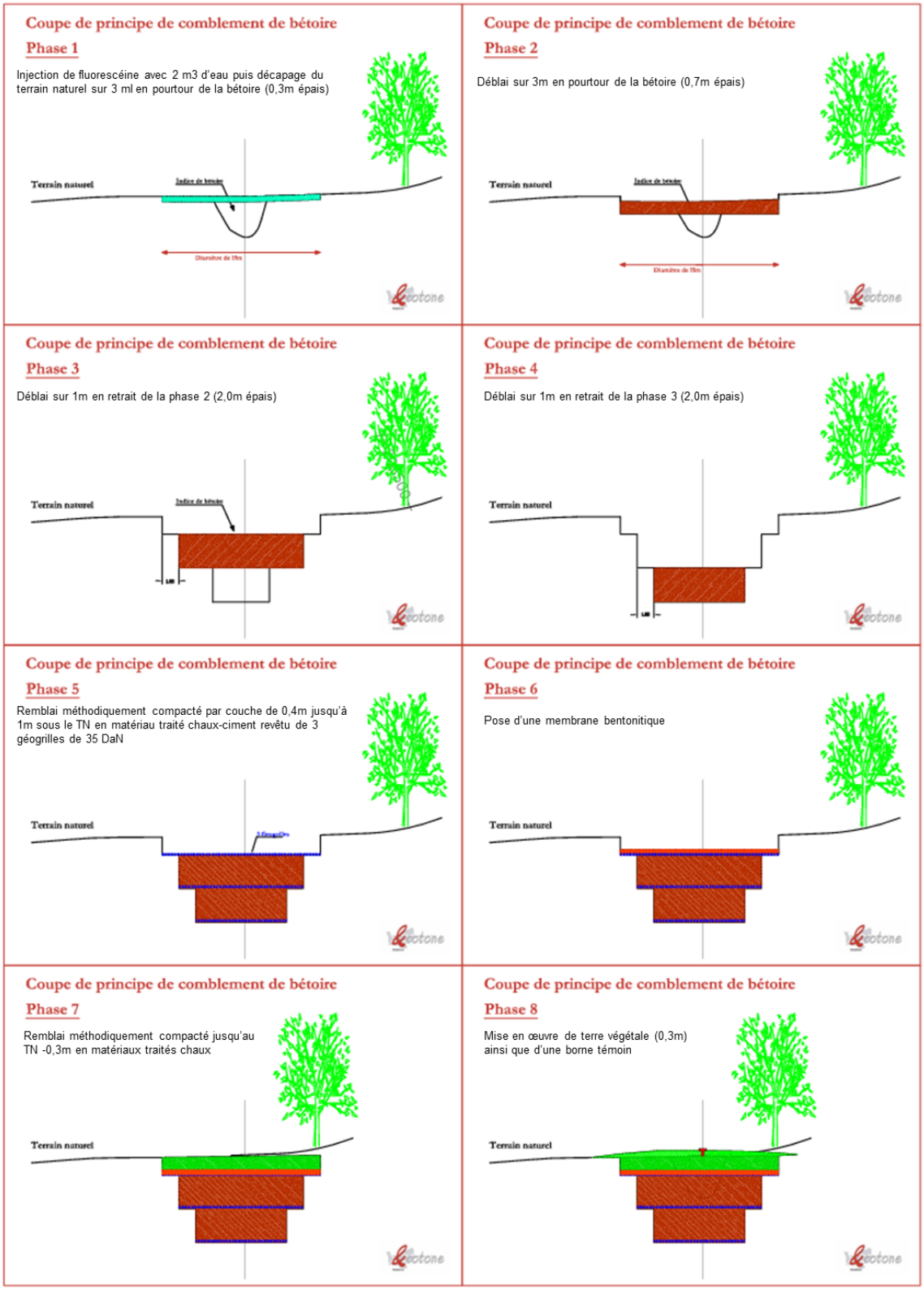



*Illustration 23 - Principe de comblement d'un désordre (bétoire) décrit dans le REX34 (C. Védieu, Ecotone Ingénierie).*

### 2.4.2. 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. Il est alimenté par la Neste d'Aure au niveau d'un barrage à l'altitude 642 m situé une dizaine de kilomètres en amont du village de Hèches. Sa construction s'est étalée de 1848 à 1862. Aux alentours de 1950, sa capacité a été portée de 7 à 14 $m^3/s$.

#### *Contexte géologique*

Le canal de la Neste se positionne en amont dans un contexte de schistes ordoviciens (o1-2, o1-6, o3-6, Illustration 24) puis passe dans un contexte sédimentaire carbonaté au niveau du village de Rebouc (sud de la commune de Hèches) plissé et écaillé (Illustration 25). Les formations géologiques suivantes sont recoupées :

**J1-5** : Aalénien - Oxfordien : Dolomies noires et grises fétides, calcaires à oncolites (jD de la carte géologique papier) ;

**J4-5** : Callovien - Oxfordien : Dolomies noires à Trocholines, calcaires et calcaires dolomitiques (j5-6 de la carte géologique papier) ;

**J6B** : Kimméridgien : Brèches, calcaires blancs (j7-8 de la carte géologique papier) ;

**J6** : Kimméridgien : Calcaires noirs à exogyres et lituolidés, brèches dolomitiques (j7-8 de la carte géologique papier) ;

**J7** : Tithonien inférieur : Dolomies, calcaires et calcaires dolomitiques à ibérines, brèches calcaires (j9 de la carte géologique papier) ;

**N1Br** : Berriasien : « Brèche limite », calcaires à Trocholines et Dasycladacées (n1 de la carte géologique papier) ;

**N1-4** : Néocomien - Barrémien : calcaires à Toucasia, calcaires à Annélides (n4 de la carte géologique papier) ;

**N5** : Aptien inférieur-supérieur : Marnes à Deshayesites (n5-6a de la carte géologique papier) ;

**N5-6M** : Aptien - Albien : Marnes noires et calcaires argileux (n6-7a de la carte géologique papier) ;

**N5-6C** : Aptien - Albien : Calcaires à Toucasia (faciès urgonien), calcarénites à entroques (n6U de la carte géologique papier).

En aval du village de Hèches, le substratum est constitué par des flyschs (n6B-cF : Flysch noir ardoisier).

Les faciès carbonatés sont donc essentiellement localisés sur la commune de Hèches, là où les désordres situés le long du canal ont été recensés (Illustration 24). L'absence de désordres sur certains tronçons du canal pourrait être liée à la présence d'un substratum marneux (n5 ou n5-6M) recouvert de formations meubles (Fw : terrasses d'alluvions anciennes du Mindel). Les nombreux sondages géotechniques réalisés le long du canal permettent de préciser la nature et l'épaisseur de ce recouvrement (documents dans la BSS) : il s'agit essentiellement d'argiles à blocs (matériaux fluvio-glaciaires) avec par endroits des passées plus sableuses d'épaisseurs très variables (moins de 1 m à plus de 20 m).

Le contexte géologique montre que les désordres, décrits en détail dans la suite du § 1.1.1, se concentrent uniquement dans les secteurs constitués par des calcaires sous couverture. La karstification de ces calcaires est illustrée par la présence de cavités naturelles inventoriées dans la BDCavité (Illustration 24).

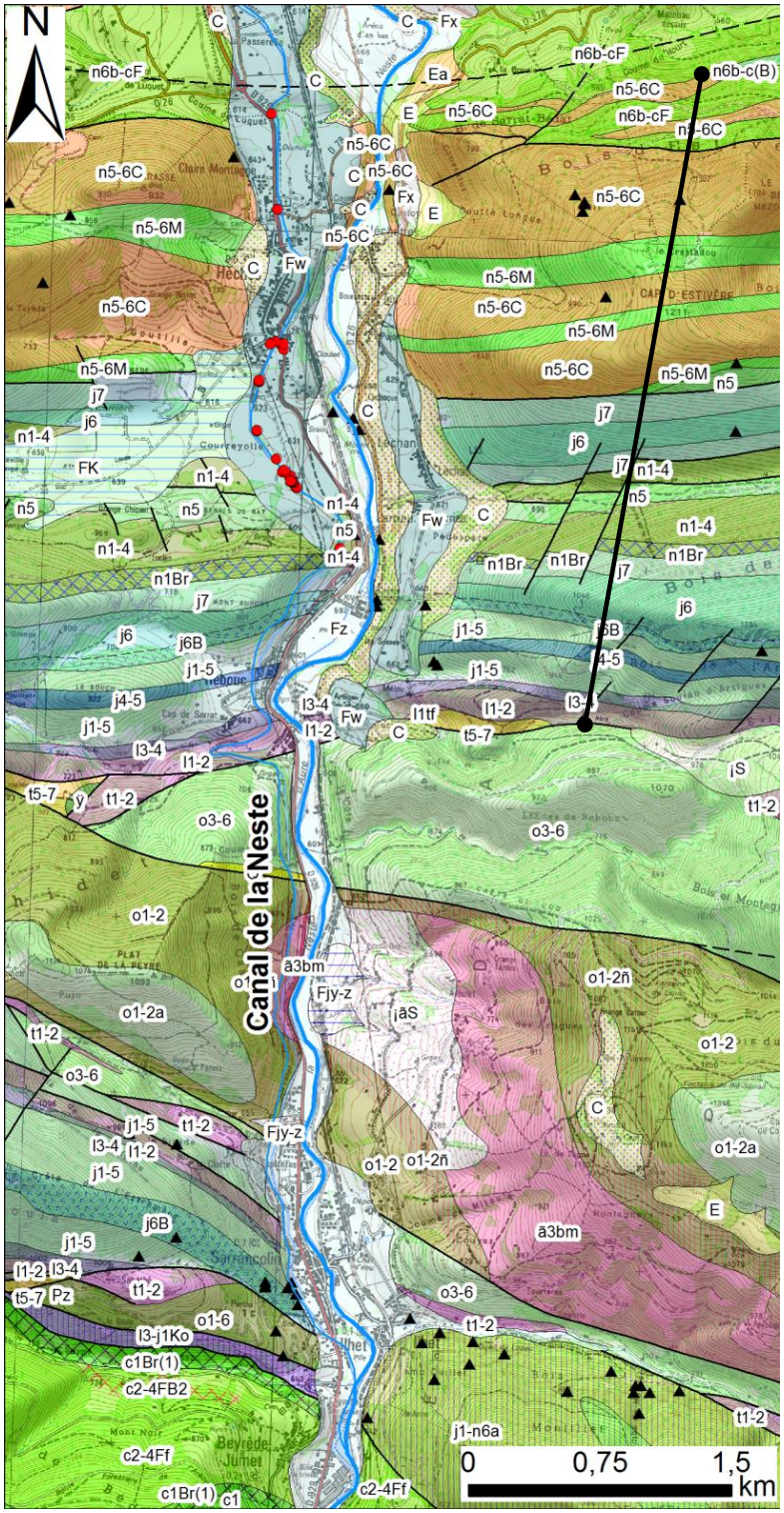



*Illustration 24 - Carte géologique depuis la source du canal de la Neste jusqu'à l'aval de la commune de Hèches ; les points rouges indiquent des désordres ; la ligne noire matérialise l'axe de la coupe géologique représentée Illustration 25 ; les triangles noirs indiquent les cavités naturelles recensées dans la BDcavités.*

**N** **S**

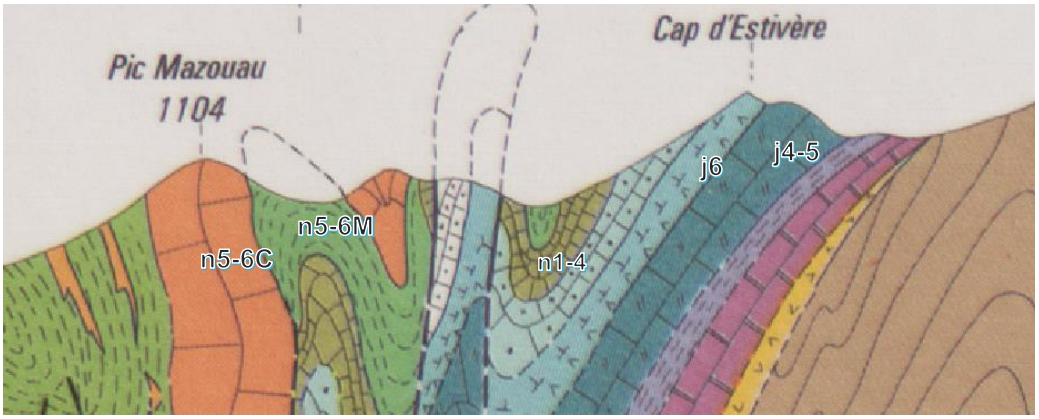



*Illustration 25 - Coupe géologique issue de la carte géologique à 1/50 000.*

### *Contexte hydrogéologique*

Les formations carbonatées sont karstifiées et constituent donc un aquifère karstique à forte perméabilité. Cet aquifère alimente des sources karstiques en fond de vallée (localisées par des triangles jaunes sur l'Illustration 26) : source du Moulin de Léchan en rive droite et résurgence de Coureyolle en rive gauche drainant l'écaille de calcaire du Jurassique (ces deux sources sont situées au Sud du village de Hèches) ; source du Castoy, au nord-est du village, drainant les calcaires crétacés (Urgonien). Les sources amont sont situées à environ 575 m d'altitude alors que la source aval se trouve vers 570 m. Ces sources sont essentiellement alimentées par l'infiltration sur les versants, là où les calcaires sont karstifiés (dolines).

Les formations fluvio-karstiques qui couvrent les calcaires ont une faible perméabilité, on ne peut toutefois pas exclure la présence de petites nappes dans les secteurs plus sableux ; aucune donnée piézométrique n'est disponible pour cette formation. Les infiltrations au sein de ces formations de recouvrement vont alimenter le karst ; l'altitude de la nappe karstique est très proche de l'altitude des sources ; il existe donc une épaisseur de zone d'infiltration sous le canal de l'ordre de 50 m, la cote du canal étant comprise entre 625 m et 620 m.

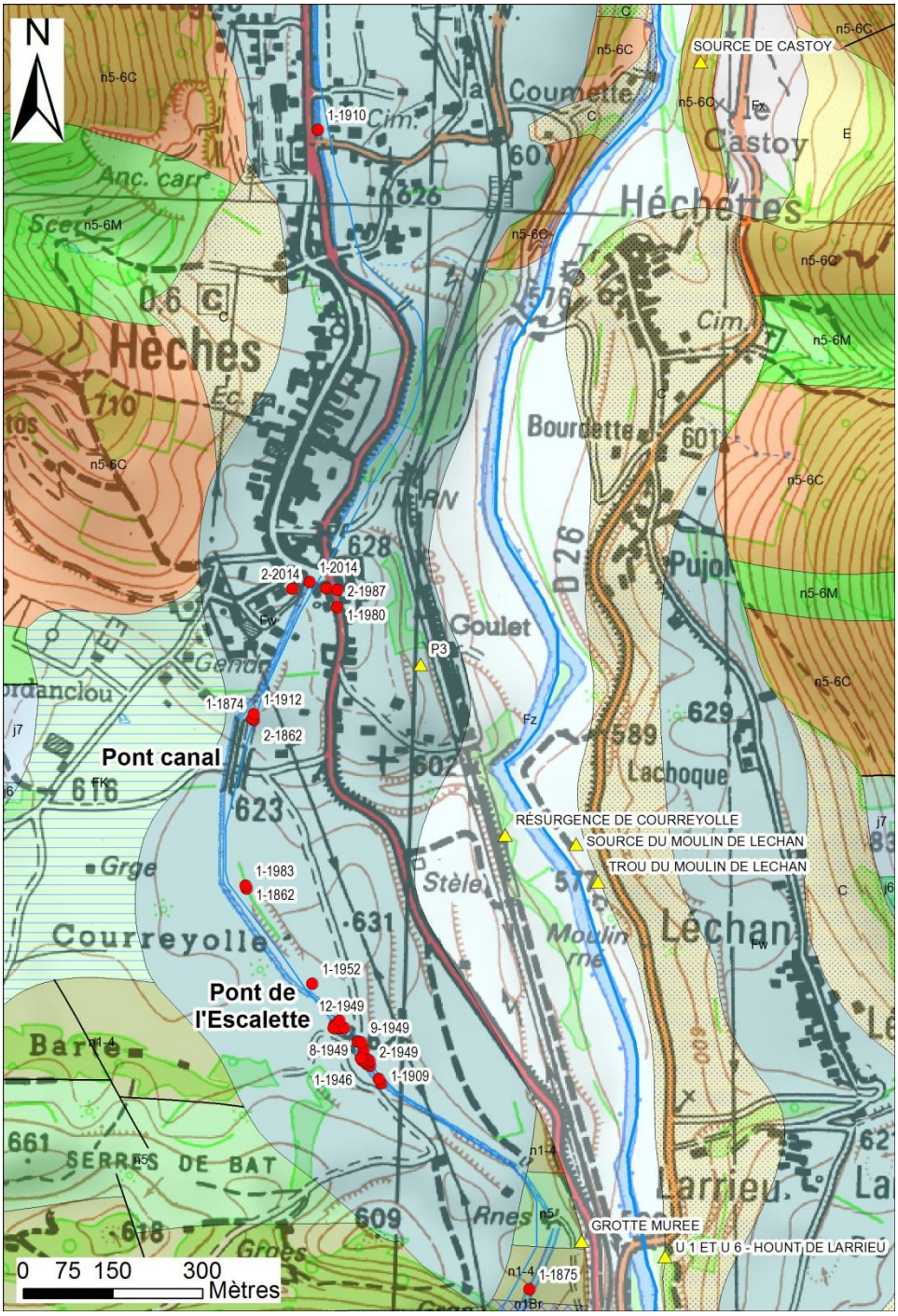



*Illustration 26 - Localisation des principaux désordres recensés le long du canal (ronds rouges) et principales cavités naturelles (triangles jaunes) sur fond de carte géologique.*

## *Désordres recensés*

Dans le cadre d'un projet de PPR pour la commune de Hèches, un inventaire des désordres de type effondrement/affaissement a été réalisé (Bouroullec, 2014). Cette source d'information a permis de localiser sur une carte un certain nombre de désordres ; des informations complémentaires ont été trouvées sur les plans géotechniques disponibles dans la BSS (études pour le canal et études sur le bâti) : étude de la société parisienne pour l'Industrie électrique, Paris (1950), société fondations et travaux miniers, Toulouse (1956), étude du bureau d'investigation géophysique (1983), étude géologique du laboratoire régional de l'équipement, Toulouse (1981). Les coupes de plus de 100 sondages géotechniques issus de ces études sont également disponibles dans la BSS.

Ces informations permettent de proposer une synthèse des événements les plus marquants reportés sur l'Illustration 26.

**1909** : un effondrement daté du 2/10/1909 est apparu sur l'emprise du canal 80 m en amont du pont de l'Escalette (Illustration 26). D'après le plan d'archive, ses dimensions étaient d'environ 18 x 10 m ; la profondeur n'est pas renseignée. La coupe géologique à proximité de ce désordre est donnée par trois sondages réalisés en 1949 (sondages n° 12, 13, 30) : deux des sondages montrent entre 3,6 m et 4,5 m d'argiles et galets recouvrant un calcaire gris/noir alors que le forage central (n° 13), situé dans l'axe de l'effondrement, montre 8,3 m de couverture sur les calcaires avec 1,5 m d'argiles et galets en surface puis 6,8 m de sable et galets. Cette information montre le relief karstique du toit calcaire avec une dépression d'au moins 4-5 m de profondeur scellée par le fluvio-glaciaire ; on note également que le remplissage de la dépression est essentiellement sableux.

**1913** : un effondrement daté du 1/9/1913 est apparu sur l'emprise du canal 40 m en amont du pont de l'Escalette (Illustration 26) . D'après le plan d'archive, ses dimensions étaient d'environ 8x7 m ; la profondeur n'est pas renseignée. La coupe géologique à proximité de ce désordre est donnée par trois sondages réalisés en 1949 (sondages n° 1, 2, 10) : le toit calcaire plonge légèrement vers le nord (aval du canal) avec un recouvrement essentiellement argileux (et intercalations de blocs et galets) de 4,8 m à 8,3 m d'épaisseur. L'argile est décomprimée puisque dans le sondage 10 (le plus en aval) on note des pertes de circulation en forage à environ 2 m au-dessus du toit calcaire.

**Vers 1949** : 14 effondrements sont cartographiés sur le plan géotechnique ; la légende du plan indique qu'il s'agit d'effondrements récents, sans que la date d'apparition ne soit précisée. Ces effondrements s'alignent le long du canal, à moins de 10 m de sa rive (11 en rive gauche, 2 en rive droite et 1 directement dans le lit) avec des diamètres variables compris entre 2 m et une douzaine de mètres ; la profondeur n'est pas renseignée. Leur répartition s'étale entre l'aval immédiat de l'effondrement de 1909 et 45 m en aval du pont de l'Escalette (Illustration 26). D'amont en aval, le premier groupe d'effondrements se situe à proximité de l'effondrement de 1913, dans un secteur où les sondages indiquent un approfondissement soudain du toit calcaire du sud vers le nord, passant de 7 m à plus de 20 m sur une dizaine de mètres pour remonter ensuite vers 5 m sous la surface au niveau du pont de l'Escalette.

Le deuxième groupe d'effondrements en aval du pont est situé dans un secteur où le toit calcaire est également très irrégulier passant de 6 m sous la surface à 11 m puis 17 m au droit des effondrements principaux.

La grande majorité des sondages indiquent un remplissage d'argiles et galets avec, dans certains cas, des passées plus sableuses ; seuls quelques sondages indiquent une composition essentiellement sableuse. Le calcaire est souvent décrit comme fissuré à très fissuré. Dans certains sondages, la coupe indique deux zones calcaires entrecoupées par des formations argileuses ; il est possible qu'il s'agisse de vides karstiques colmatés. Les argiles fluvio-glaciaires peuvent être décomprimées avec pour conséquence une perte de circulation en forage pour quelques sondages.

La topographie du secteur est relativement plane, cependant la profondeur du toit calcaire est très variable avec des pointements signalés en surface dans le fond du canal et, à l'inverse, des sondages d'une profondeur totale de 20-21 m qui n'atteignent pas le toit. L'amplitude des variations dépassent donc 20 m.

**1952** : effondrement de la fondation du canal de la Neste dans le secteur de Coureyrolles ; la localisation précise de cet effondrement n'est pas connu (entre les bornes hectométriques 67 et 69, d'après le document projet de PPR). Toutefois les coupes de 56 sondages géotechniques donnent des informations sur le contexte du secteur. Pour environ 20 % des

sondages, les calcaires sont très karstifiés avec des vides pluri-métriques traversés dans certains cas ; dans la majorité des sondages, les calcaires sont très fracturés. Les secteurs les plus karstifiés semblent se concentrer autour des bornes hectométriques 71-72. La profondeur du toit calcaire est très variable : il fluctue entre 5 et 10 m entre les bornes 68-69 pour ensuite s'approfondir jusque vers 15 m autour de la borne 70 ; il remonte ensuite rapidement entre 5 et 10 m autour de la borne 71. Les plus fortes variations sont observées autour de la borne 72 avec des sauts entre 4 m et plus de 20 m sur 10 m de distance. Dans deux cas, le toit calcaire n'a pas été atteint à 25 m de profondeur (profondeur maximale des sondages). La nature de la couverture est essentiellement argileuse (argile jaune) avec des passées de blocs et de sable.

**14 janvier 1983** : le canal de la Neste s'effondre sur un linéaire d'environ 50 m, entre le pont de l'Escalette et le pont canal (Illustration 26, bornes hectométriques 68-71). D'après la coupe de synthèse, on compterait trois « dolines » situées dans l'emprise du canal : la 1ère au droit de la borne 68, la 2ème à mi-chemin entre les bornes 69 et 70 et la 3ème 20 m en aval de la borne 70. En mars de la même année, une étude géophysique accompagnée de sondages est réalisée dans l'optique des travaux de réparation du canal (Bureau d'investigation géotechnique, 1983). Cette étude comprend des levés sismiques et de résistivité électrique sur deux linéaires parallèles à la portion de canal effondré et décalés vers le Nord d'environ 10 m (profil 1) et 20 m (profil 2). Le tracé de ces levés géophysiques correspond à l'emprise du canal actuel. Plus de 50 sondages ont été réalisés sur ces deux tracés, cependant seuls 5 coupes sont archivées dans la BSS. Deux coupes de synthèse combinant données géophysiques et résultats de sondages, archivées en BSS, apportent les éléments suivants :

- une couche superficielle de 5-10 m d'épaisseur constituée essentiellement de formations argileuses avec une vitesse sismique (Vp) moyenne de 500 m/s ;
- une couche intermédiaire, d'une épaisseur comprise entre 7 et 15 m, avec des vitesses sismiques moyennes de 1 350 m/s correspondant à des formations argileuses, des vides, des calcaires fracturés, des moraines/moraines argileuses ;
- une couche inférieure avec des vitesses de 3 500 m/s correspondant au substratum calcaire.

Il est intéressant de constater l'existence de vides pluri-métriques au sein de la couverture argileuse, correspondant très vraisemblablement à des cloches de fontis (Illustration 27). Ces secteurs correspondent à des résistivités électriques supérieures à 500 ohm.m. Ces vides sont essentiellement décrits sur le profil 1 qui est celui qui longe le côté ouest du canal ; le profil 2, décalé de 10 m plus à l'ouest, ne montre pas de vide. Ce constat semble indiquer que l'évolution des cloches de fontis est essentiellement active au droit du canal. Il est également possible de déduire quelques informations quant à l'évolution de ces cloches car des sondages avaient été réalisés en 1952 (sur un linéaire à proximité immédiate du profil 1), soit 31 ans auparavant :

- le sondage 45 de 1952 n'indique pas de vide dans la couverture argileuse, alors que sur le profil de 1983 un vide de près de 10 m de haut est décrit (observation du sondage 66) ;
- le sondage 44 de 1952 recoupe un vide de 3,5 m à la base de la couverture ; le vide recoupé par le sondage 60 de 1983 fait 10 m de haut (cependant les deux sondages sont distants de 4-5 m, ce qui pourrait expliquer en partie cette différence) ;
- les sondages 42 et 43 de 1952 n'ont pas rencontré de vides, alors que les sondages 46 et 54 de 1983 recoupent des vides compris entre 3 et 7 m de haut environ.

Ces informations semblent corroborer une évolution significative des cloches de fontis au sein de la couverture argileuse (plusieurs mètres en 30 ans), et ce à proximité immédiate du canal.

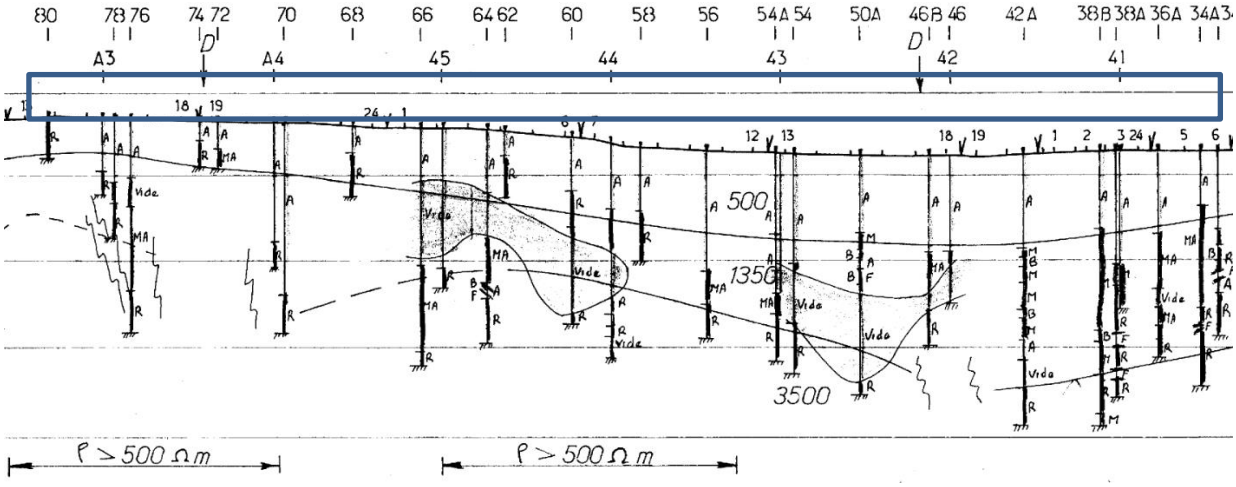



*Illustration 27 - Extrait du profil synthétique n° 1 passant directement au nord du canal effondré ; la lettre D indique la position de deux « dolines ». A = argile, M, M = moraine, MA = moraine argileuse, B = blocs, R = rocher, R F= rocher fracturé, F = fracture ; le rectangle bleu contoure les identifiants de sondages réalisés en 1952 ; les lignes horizontales sont à 10 m d'intervalle (d'après bureau d'investigation géotechnique, mars 1983).*

En plus de l'impact des effondrements sur le canal, plusieurs désordres impactant le bâti et le réseau routier ont été recensés dans la partie Sud du village de Hèches, à une distance de la rive est du canal comprise entre 0 et 50 m (Illustration 26). Il s'agit d'affaissements qui se sont produits en trois occasions (1980, 1987 et 2014) (Illustration 28). Un quatrième désordre, recensé dans le projet de PPR, daté de février 1993 n'a pas pu être localisé précisément mais pourrait également être situé dans le même secteur. Ces désordres ont sérieusement impacté le bâti puisque trois bâtiments ont été détruits en 1980, une habitation a dû être détruite en 1987 et la démolition d'urgence d'un immeuble a été préconisée en 1993. Une étude géotechnique est archivée en BSS pour l'événement de décembre 1980. Celle-ci montre une emprise de l'affaissement d'environ 20 x 12 m ; les sondages révèlent une épaisseur de recouvrement comprise entre 16 m et 26 m, constitué de matériaux argileux, argilo-sableux et de grave argileuse (matériau morainique ?) ; le substratum est constitué de calcschistes correspondant au faciès cartographié au sein de la formation Aptien - Albien (n5-6C). Sur un des sondages, un niveau statique de la nappe de calcschistes a été mesuré à -26 m sous la surface, soit au toit des calcschistes (cote 595 m NGF environ) ; les autres sondages n'indiquent pas de niveau piézométrique.

Deux affaissements ont été décrits en 2014 : le premier de forme allongée de 3 x 1 m et 0,1 m de profondeur a impacté la chaussée ; le second d'une dizaine de mètres de diamètre et 0,2 m de profondeur est situé dans un jardin ; l'observation de fissures sur la façade du bâtiment adjacent pourrait être lié à cet affaissement (Bouroullec, 2014).

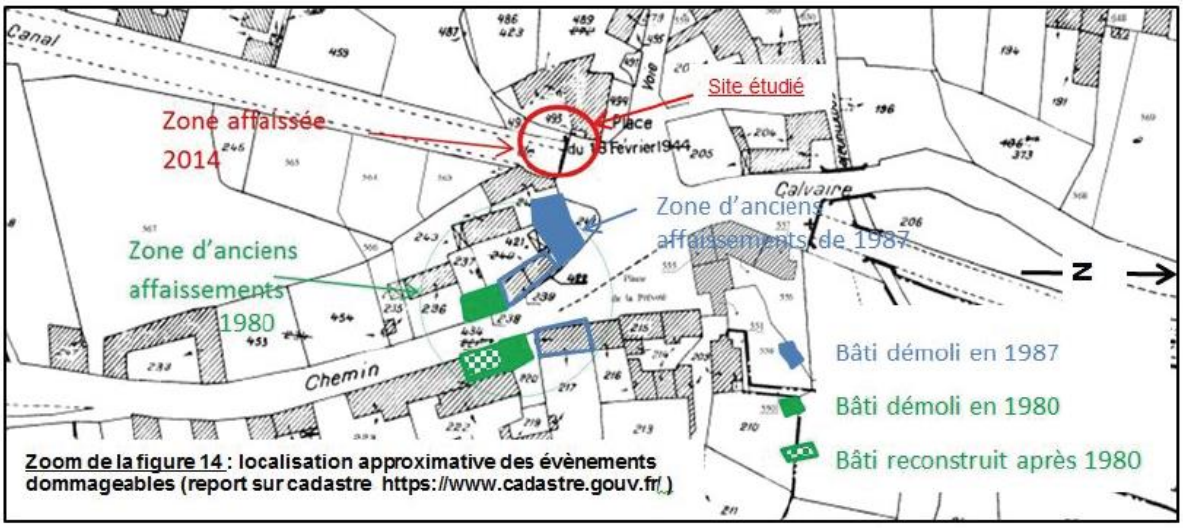



*Illustration 28 - Impact des désordres sur le bâti du village de Hèches ; les désordres se situent à proximité immédiate du canal de la Neste (Bouroullec, 2014).*

## *Conclusion*

La présence de nombreux désordres le long du canal de la Neste, dans le secteur où les calcaires karstifiés sont sous couverture, illustre le rôle de cet aménagement dans l'apparition des mouvements de terrain. Il s'agit soit d'effondrements dans le secteur amont du site, soit d'affaissements dans le secteur du village. La répartition des désordres est fortement contrôlée par le contexte géologique d'une part (karst sous couverture) et l'aménagement (linéaire du canal). L'absence de désordres dans certains secteurs pourrait être liée à la présence d'un substratum marneux sous la couverture.

Dans le secteur amont, plusieurs études géotechniques permettent de confirmer la présence d'un substratum calcaire très karstifié avec de fortes variations de la profondeur du toit (moins de 1 m à plus de 20 m) sur de courtes distances ; la couverture est de nature essentiellement cohésive (formations argileuses et argilo-sableuses) et permet la formation de cloche de fontis identifiées en sondage. L'existence de sondages sur des emplacements quasi-identiques à 31 ans d'intervalle permet d'obtenir des informations sur l'évolution de ces cloches de fontis essentiellement au droit du canal (évolution de plusieurs mètres en 30 ans pour certaines cloches). La dimension des effondrements est peu documentée avec seulement une étude cartographiant des diamètres compris entre 2 et 12 m. L'interprétation d'un profil géophysique associé à des sondages indique la présence d'une cloche à la base de la couverture atteignant 20 m de longueur et 10 m de hauteur maximale ; le toit de cette cavité est à environ 12 m sous la surface.

Pour le secteur au sud du village, il s'agit essentiellement d'affaissement dans un contexte géologique un peu différent puisque le substratum est constitué de calcschistes.

### 2.4.3. 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 recouvertes 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 29) ; deux effondrements ont été étudiés : 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 30) :

- 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'un enrochement composé de blocs de 500 à 1 000 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 Dmax = 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 Dmax = 600 mm, sur environ 1,5 m d'épaisseur.

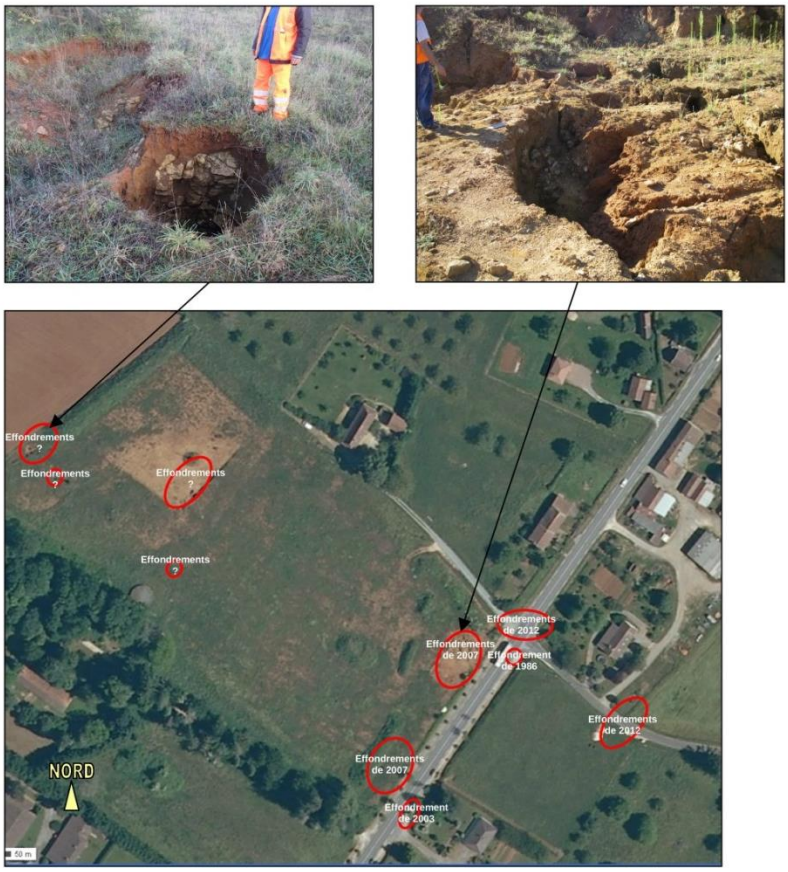



*Illustration 29 - Localisation des principaux effondrements apparus sur le secteur d'étude (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA).*

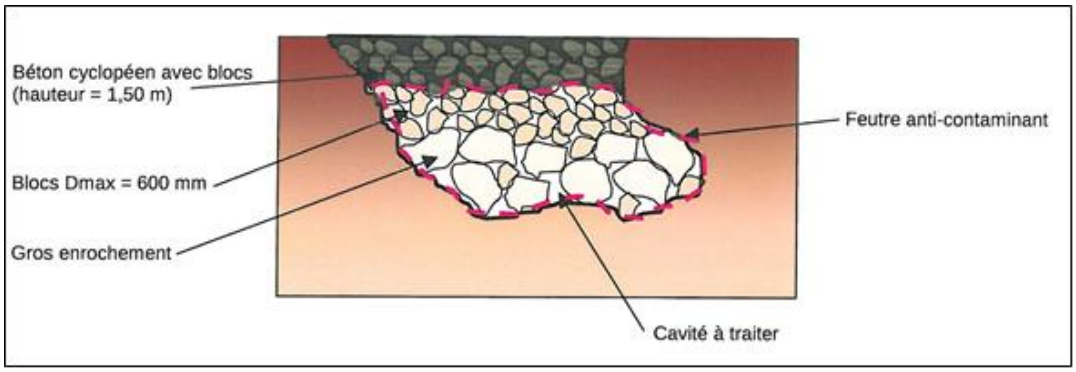



*Illustration 30 - Schéma de principe du traitement des effondrements par comblement en matériaux granulaires (Thiviers, 24) (crédit : F. Clément, CEREMA).*

### 2.4.4. 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 31).

Plusieurs sources émergent en amont du village au contact entre les calcaires marneux de l'Argovien qui forment l'aquifère et les marnes de l'Oxfordien. Les sources nord (Velloreille) sont à faible débit et l'intégralité de celui-ci est capté ; au contraire les sources sud (Bonnevent) ont des débits importants et seule une partie est captée pour l'eau potable alors que le trop-plein rejoint le lit du cours d'eau. Le débit est de l'ordre de 10 L/s ; il serait peu variable au cours de l'année (communication personnelle Madame le Maire).

Historiquement, ce cours d'eau était dévié en aval du village par un système de drainage ; celui-ci a été par la suite abandonné (manque d'entretien) et depuis, l'eau est directement infiltrée dans le terrain par des ouvrages (puisards) situés entre les sources sud et la route principale qui traverse le village. Au trop-plein de la source, s'ajoutent les eaux du réseau pluvial. La mise en service des puisards aurait été réalisée dans les années 1980 (Bayle, 2008).

Plusieurs désordres impactant le bâti et la route départementale sont apparus entre 1993 et 2008 (Illustration 32) avec des tailles d'effondrement pouvant atteindre 2 m de diamètre et 3 m de profondeur (Bayle, 2008). Depuis lors, aucun autre évènement n'a été signalé.

Les désordres se sont produits à proximité d'une faille mettant en contact les marnes en amont avec les calcaires karstifiés du Dogger (karst de contact) recouverts de plusieurs mètres d'argile de décalcification. La karstification des calcaires est attestée par la présence de gouffres au nord de Velloreille et de dolines de dissolution. Lors de l'effondrement de la chaussée en 2003, une galerie à taille humaine, s'étant formée au sein des argiles et parcourue par un ruisseau, était visible. Les eaux qui s'infiltrent dans l'aquifère karstique du Dogger résurgent à la source de la Douain située 3,5 km au sud (Illustration 32).

Sur la base de l'historique du site, il semble clair que la réinfiltration des eaux de source et pluviale par des puisards a fortement accéléré l'érosion interne du colmatage des vides karstiques (débourrage) faisant apparaître des désordres à plusieurs reprises dans un secteur construit. Sur la base de ce diagnostic, les travaux de traitement ont été les suivants :

- 1993 : création d'une dalle béton sur environ 50 m au niveau du puisard à proximité de la route principale (RD3) ;
- 2003 : réparation de la chaussée effondrée sur 20 mètres et renforcement par un système parachute. Depuis lors, la chaussée n'a plus été impactée ;
- vers 2003 : rebouchage du puisard en bordure de la RD3 et collecte des eaux du trop-plein de la source par le réseau d'eau pluvial qui longe la chaussée direction sud pour se perdre dans les champs. En période pluvieuse, le réseau est sous-dimensionné et une partie du débit ruisselle en surface le long de la route pour se perdre progressivement dans les champs ;
- 2015 : à Velloreille (nord commune), tranchée ouverte dans les argiles de décalcification pour ré-infiltrer les eaux pluviales et mise au jour d'un vide karstique. Celui-ci a été rebouché (dalle béton puis remplissage matériaux inertes). Cependant, cette solution est provisoire et une recommandation a été faite de drainer les eaux pluviales en aval de la route et des habitations ;

- 2015-2016 : travaux d'assainissement au niveau de Bonnevent comprenant l'ouverture de la chaussée et la pose d'une conduite renforcée (poutre béton) de diamètre 800 mm pour amener l'eau en aval du village direction sud dans un bassin de rétention (séparation des hydrocarbures). Lors de la visite de site en mai 2016, le système n'était pas encore opérationnel.

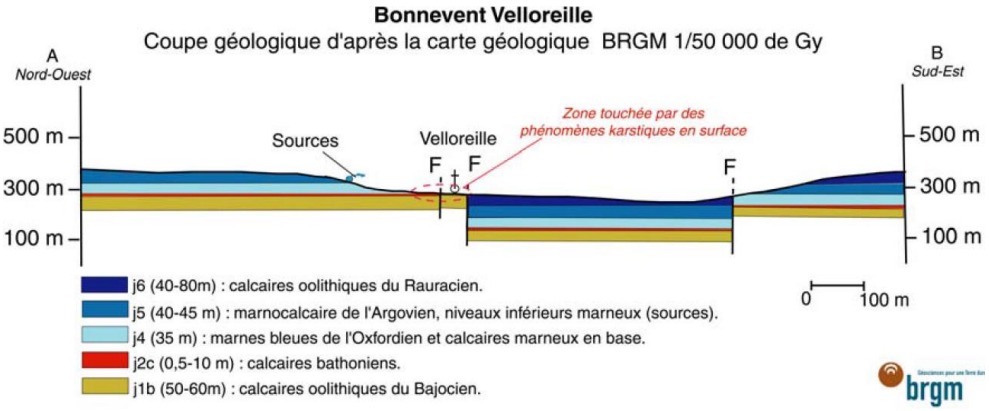



*Illustration 31 - Contexte géologique du site de Bonnevent-Veloreille (Haute-Saône) (d'après Bayle, 2008).*

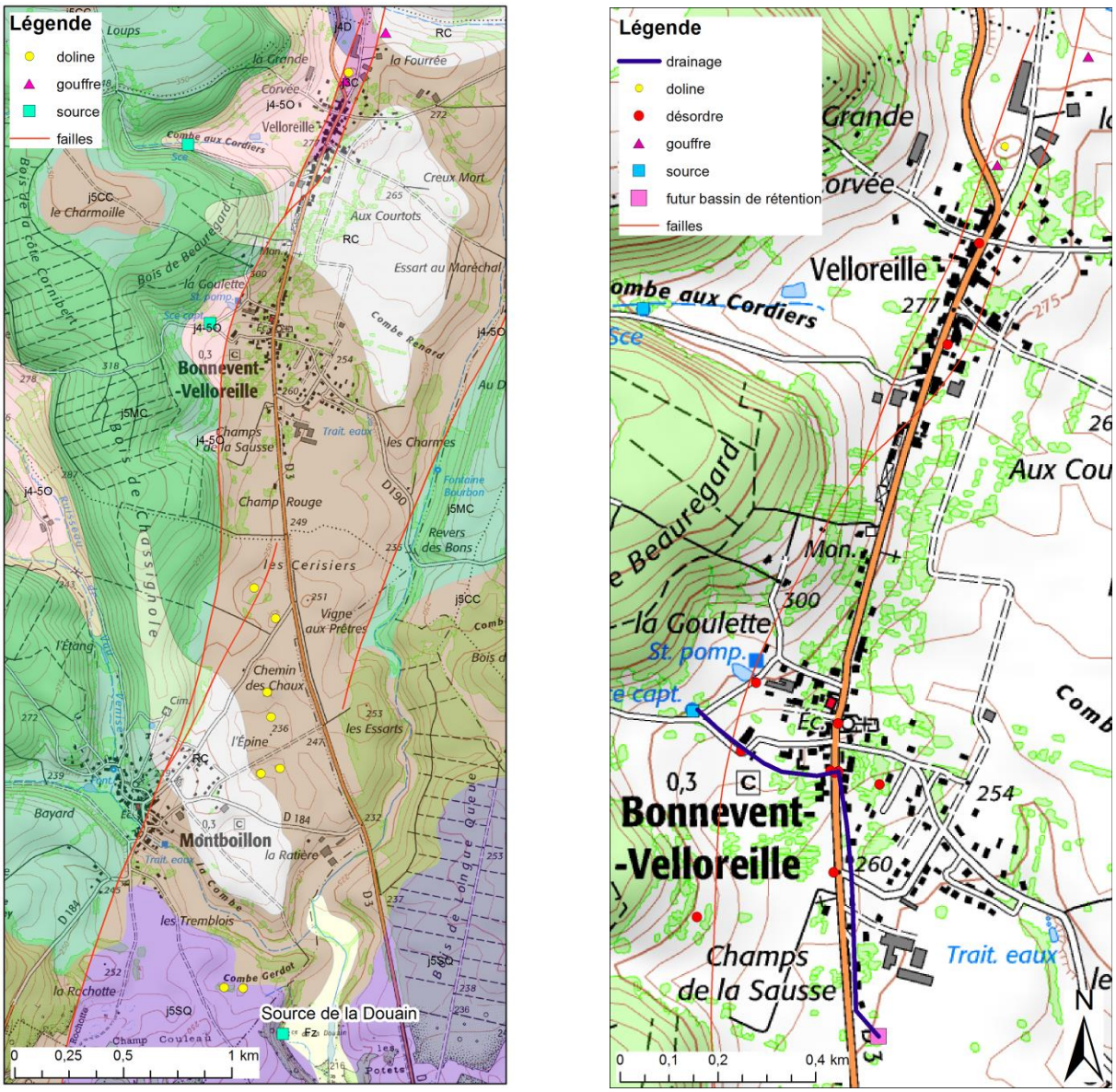



*Illustration 32 - Contexte géologique et hydrogéologique du site de Bonnevent-Velloreille à gauche ; vue détaillée du secteur impacté par les désordres à droite.*

### 2.4.5. Forage (informations fournies par F. Clément, CEREMA-Bordeaux)

La localisation de ce site ne peut pas être communiquée car une enquête est en cours.

Le contexte géologique du site consiste en des formations superficielles du Quaternaire essentiellement sableuses et graveleuses suivies, à partir de 7 à 10 m de profondeur, des formations de l'Oligocène de nature marneuse et calcaire, très altérées. Cette ancienne plateforme carbonatée représente une épaisseur moyenne d'environ 10 m, et repose sur les formations de l'Éocène Supérieur, montrant des marnes sur une quinzaine de mètres d'épaisseur, puis des calcaires plus ou moins fracturés et karstifiés.

D'un point de vue hydrogéologique, le toit de la nappe dans les formations superficielles est à 2 m sous la surface alors que la charge dans la nappe captive des calcaires de l'Éocène a une cote environ 4 m inférieure (estimation basée sur des piézomètres d'observation existant dans un périmètre de 2 km).

Un forage d'eau pour un particulier initialement prévu pour capter la nappe dans le Quaternaire (10 m de profondeur) a été poursuivi plus en profondeur, car le débit n'a pas été jugé comme satisfaisant. À 37 m sous la surface, lorsque le toit du calcaire karstifié de l'Éocène est atteint (perte totale d'injection de forage dans un vide karstique), un effondrement d'environ 7 m de diamètre et 2 à 3 m de profondeur se produit brutalement sous la machine de forage. Dans les jours qui ont suivi, plusieurs autres effondrements de plus petite taille se sont manifestés dans une zone de 1 100 $m^2$. La vidange soudaine de la nappe superficielle (en charge par rapport à la nappe karstique) vers la nappe karstique avec entraînement par soutirage dans le vide karstique sous-jacent de sédiments semble être le processus déclencheur de l'effondrement.

Cet évènement a nécessité l'évacuation d'un nouveau lotissement en cours de construction (comprenant plusieurs habitations récentes) et a provoqué un accident mortel (personne ensevelie lors de l'effondrement).

Le forage aurait été réalisé de manière inadéquate sans tubage des formations superficielles (simple ajout de polycol pour faire tenir les parois). Les autres problèmes constatés sont l'évacuation des matériaux fins dans les cuttings et le remaniement des éléments grossiers (élargissement progressif du trou de forage). Cette situation a pu créer une cavité aveugle sous un niveau plus superficiel induré (couche d'alios gréseux).

### 2.4.6. Rabattement 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 33) : « *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 voûtes 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* ».

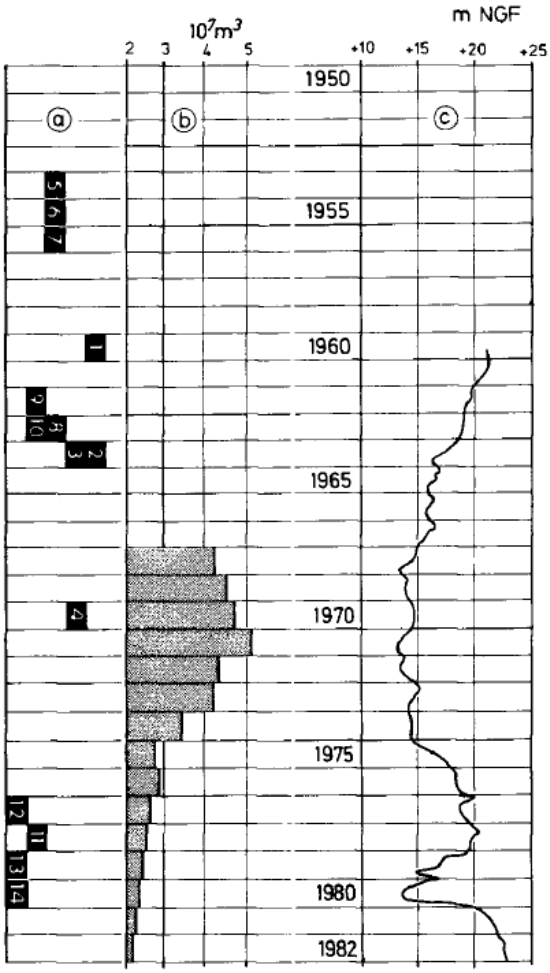



*Illustration 33 - Distribution chronologique des principaux désordres survenus au nord de l'agglomération parisienne et corrélation avec l'évolution piézométrique de la nappe du Lutétien : a : désordres identifiés par un numéro ; b : volumes annuels prélevés à la nappe pour des usages industriels (données accessibles depuis 1968) ; c : évolution piézométrique de la nappe Éocène - rue Réaumur (d'après Toulemont, 1987).*

Pour information, un cas d'étude montrant le rôle des pompages liés à l'exploitation d'une carrière sur l'apparition de désordres nous a été communiqué lors de la phase de rédaction du rapport final. Il n'a donc pas pu être intégré à notre analyse. Le détail de cette problématique est décrit dans un rapport de Safege (2009). Ce rapport décrit plusieurs effondrements apparus en 2007 sur la commune de Saint-Rémy-du-Nord (59) dans un contexte de calcaires altérés et karstifiés du Carbonifère sous couverture de 8-10 m d'alluvions argilo-silteuses. Les désordres se sont produits à proximité immédiate des ruisseaux drainant le secteur et dans une zone où le rabattement piézométrique liés à l'exhaure de la carrière en exploitation est maximal. La recrudescence de désordres semble être liée à l'augmentation des rabattements suite à l'approfondissement de la carrière. Ce site offre donc un exemple caractéristique du rôle des pompages dans l'apparition de désordres en contexte de karst carbonaté.

# 3. Conceptualisation

Sur la base du retour d'expérience et de l'étude bibliographique (Perrin et Noury, 2015), les aménagements peuvent être regroupés en trois grandes catégories : ceux qui concentrent les eaux d'infiltration, ceux qui entraînent le rabattement de la nappe karstique et ceux qui engendrent des perturbations physiques du sol. Pour ces trois catégories, il s'agit d'identifier les mécanismes à l'origine de l'apparition d'un désordre afin d'être en mesure d'évaluer des indicateurs (vitesses, flux, niveaux de nappe, etc.) et des valeurs seuils pouvant servir à appuyer les recommandations (§ 4). La première catégorie étant la plus impactante sur le territoire national, l'essentiel de l'analyse y est consacré. Cette modélisation conceptuelle est réalisée en deux étapes : la première (§ 3.1) se base sur une approche théorique (bibliographie et formules empiriques) et la deuxième (§ 3.2) s'appuie sur une analyse de sensibilité au moyen de simulations numériques des écoulements. Les études de site (§ 2.4) servent à « paramétrer » les modèles et à vérifier l'adéquation des résultats obtenus.

Cette démarche se veut exploratoire et nécessite des travaux de recherche à venir[3] pour préciser les mécanismes et aboutir à des résultats plus quantitatifs. Elle ne porte que sur les contextes carbonatés, le contexte du gypse faisant intervenir également d'autres types de processus qui n'ont pas été documentés dans cette étude (processus de dissolution).

## 3.1. APPROCHE THÉORIQUE

Tous les retours d'expérience montrent que les processus menant à l'effondrement sont essentiellement le soutirage/suffosion/desquamation des matériaux de couverture vers le karst (initiation et évolution d'une cavité aveugle/cloche de fontis jusqu'à l'effondrement du toit dans le cas de formation cohésive ; affaissement progressif des terrains superficiels dans le cas de formation non cohésive) et dans une moindre mesure le débourrage du remplissage d'un vide karstique. Aucun cas ne fait référence à la rupture du toit rocheux d'une cavité karstique.

Dans la littérature, le débourrage n'est pas décrit, par contre on trouve des références qui abordent le soutirage/suffosion/desquamation : il s'agit de distinguer deux types de processus : la « desquamation »[4] qui opère par des micro-ruptures mécaniques de la voûte d'une cavité (par exemple cloche de fontis) liées au poids de l'eau (pression interstitielle) (Tharp, 1999, 2002) et le soutirage/suffosion qui consiste en une érosion interne des particules causée par l'écoulement d'eau (processus actif lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau est supérieure à la résistance critique au cisaillement) (Jiang *et al*., 2015). Le soutirage/suffosion nécessite un milieu saturé alors que la desquamation peut se produire en milieu initialement saturé (baisse du niveau piézométrique) ou non saturé (front de percolation).

De manière schématique, la desquamation va opérer essentiellement en conditions non saturées sous l'effet du front de percolation induit par l'infiltration concentrée alors que le soutirage/suffosion nécessite des terrains saturés et des conditions hydrauliques qui maximisent la vitesse d'infiltration (fort gradient, perméabilité élevée, faible porosité efficace).

Ces deux types de processus sont traités en détail pour le scénario « concentration des eaux d'infiltration », puis quelques éléments bibliographiques sont également présentés pour les scénarios « rabattement de la nappe karstique » et « perturbations physiques du sol ».

[3] Pour information, le BRGM a initié une collaboration avec l'IRSTEA pour réaliser des modélisations d'évolution de cloches de fontis pour différents scénarios (modèle couplé écoulement-transport granulaire pour simuler l'érosion interne) (postdoc financé par le Brgm, projet de recherche soumis à la région Centre-Val de Loire).

[4] Terme choisi par le BRGM pour la traduction de « hydraulic fracturing » ou « ravelling ».

### 3.1.1. Concentration des eaux d'infiltration

La **desquamation** est bien abordée par Tharp pour le cas d'une nappe karstique libre (1999) et le cas d'une nappe captive, au moins initialement (2002).

Pour que la desquamation puisse s'initier, Tharp (1999) montre qu'il faut faire intervenir la pression interstitielle dans la formation de couverture. La desquamation peut devenir active lorsque la pression interstitielle devient supérieure aux résistances exercées via l'effet de voûte sur les parois de la cavité existante. En régime permanent, le gradient de pression interstitielle n'est pas suffisant pour permettre la rupture. En régime transitoire, quatre cas de figure pouvant conduire à la desquamation sont décrits de manière qualitative :

1) une baisse rapide du niveau de la nappe (perte de la poussée d'Archimède, poids transféré sur l'eau interstitielle) ;
2) gradient de pression interstitielle élevé au travers d'un front de percolation (le soutirage peut se produire quand le front de percolation atteint le mur de la cloche de fontis) ; cette situation se produit lors d'évènements de recharge ou par concentration des eaux d'infiltration ;
3) rôle des bulles d'air piégées dans un front de percolation qui vont influencer la perméabilité et augmenter les gradients de pression interstitielle ;
4) la charge dynamique produite par des travaux en surface (explosifs, vibrations, passage d'équipements lourds) conduit à un compactage du sol et une augmentation concomitante de la pression interstitielle et du gradient de pression ; l'effet sera d'autant plus marqué lorsque le terrain est très saturé.

Dans ses conclusions, Tharp (1999) conseille les pratiques d'infiltration suivantes afin de limiter le risque d'apparition de désordres : procéder à des infiltrations dans la couverture en deux phases : la première afin de faire progresser le front de percolation vers la cloche de fontis à des pressions limitées avant de transmettre des pressions plus élevées dans une deuxième phase. Des cycles de saturation et séchage sont à proscrire.

Le **soutirage/suffosion** semble essentiellement étudié sur des ouvrages hydrauliques (Bonelli, 2012) ; pour le contexte de karst sous couverture, Jiang *et al.*, (2015) établissent la relation entre la vitesse critique d'écoulement ($v_{cr}$) et la contrainte critique de cisaillement ($\tau_{cr}$) au-delà de laquelle la suffosion opère :

$v_{cr} = \tau_{cr} \times d / (8 \times \mu)$ avec d le diamètre du pore et $\mu$ la viscosité dynamique de l'eau.

Dans leur étude, les tests expérimentaux en laboratoire ont été menés sur des sols argileux ayant des contraintes critiques de cisaillement moyennes de 21,5 Pa. Le diamètre moyen des pores déterminé par microscopie électronique étant de 31,6 nm, la vitesse critique d'écoulement est établie à 0,54 cm/min ($8.8\ 10^{-5}$ m/s).

La contrainte de cisaillement est très variable en fonction des matériaux et donc les résultats de Jiang *et al.* (2015) ne peuvent *a priori* pas être appliqués à d'autres contextes.

Des approches empiriques permettent d'obtenir rapidement des informations sur le type de processus qui pourrait opérer en fonction de la configuration du site (type d'aménagement) :

**1) bassin** (également valable pour d'autres structures hydrauliques maintenant une charge hydraulique) ;

Bouwer (2002) montre qu'il existe deux configurations hydrauliques (Illustration 34) :

- un horizon peu perméable s'intercale entre le fond du bassin et le toit de la nappe ; dans ce cas, l'écoulement sous cet horizon se fait en conditions non saturées ;
- une formation perméable entre le fond du bassin et le toit de la nappe ; dans ce cas l'écoulement se fait en conditions saturées (passé la période transitoire de progression du front de percolation) ; le rapport entre la distance fond du bassin-toit de la nappe (Dw) et la largeur du bassin (W) détermine la vitesse d'écoulement : si le rapport est supérieur à 2, l'infiltration est verticale avec gradient hydraulique proche de 1, dans le cas contraire le flux d'infiltration est contrôlé par le gradient de la nappe. C'est donc pour le cas Dw/W > 2 que la vitesse d'infiltration sera maximale (gradient hydraulique plus élevé) pour des matériaux ayant les mêmes propriétés hydrodynamiques.

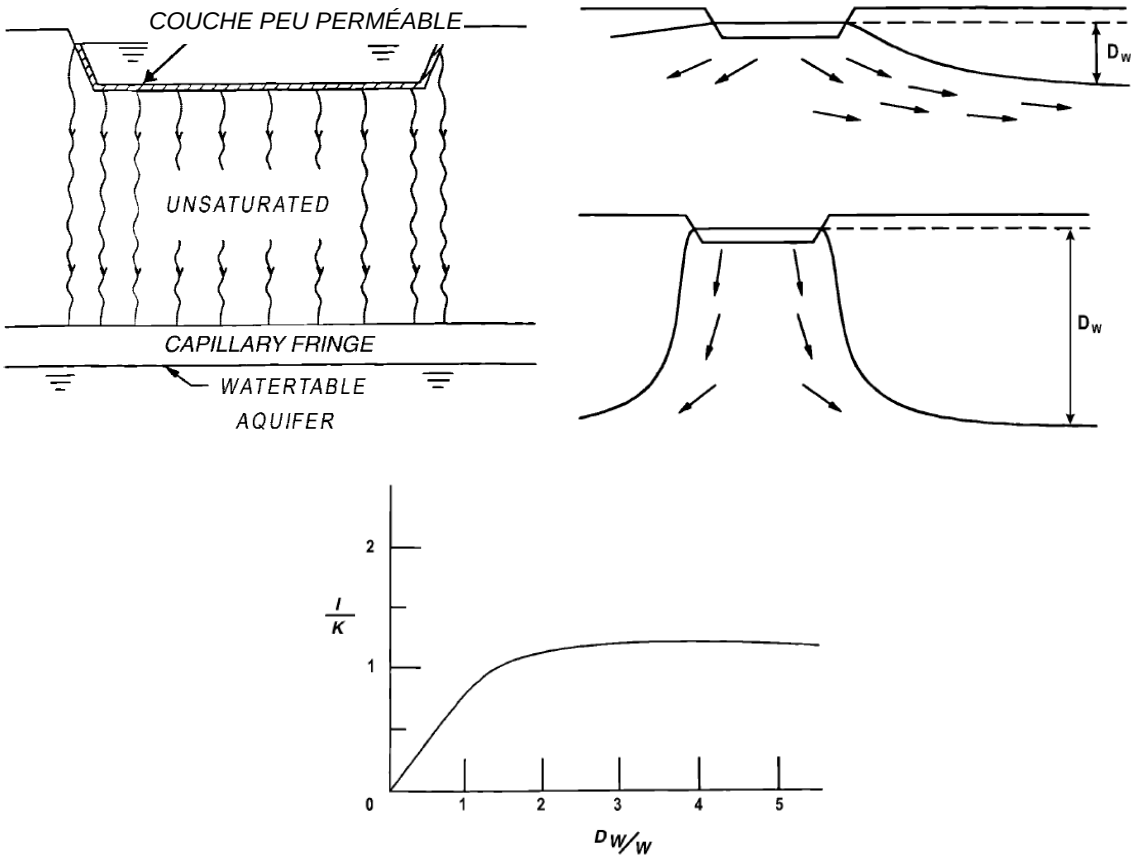



*Illustration 34 - En haut à gauche : bassin avec présence d'une couche peu perméable sous-jacente impliquant des écoulements en conditions non saturée (zone « unsaturated ») ; à droite, bassin dans un contexte perméable, le flux d'infiltration est contrôlé par le rapport Dw/W. En bas, diagramme sans dimensions donnant l'évolution du rapport flux d'infiltration (I) sur perméabilité (K) en fonction de Dw/W (d'après Bouwer, 2002).*

Les vitesses d'écoulement ($V_z$) maximales sont donc atteintes pour le cas des bassins pour lesquels le ratio Dw/W > 2 ; dans ce cas la vitesse peut être approchée par la loi de Darcy :

$$V_z = K \times i/n_e$$

Avec K la perméabilité verticale en m/s, i le gradient hydraulique (= 1) et $n_e$ la porosité efficace. Pour des conditions réalistes, les vitesses verticales maximales peuvent avoisiner $10^{-4}$ m/s. À titre de comparaison, des vitesses d'écoulement critiques permettant le soutirage/suffosion ont été estimées par des modèles expérimentaux pour des conditions de site en Chine : 6,5 $10^{-3}$ m/s pour des formations argileuses, 1.46 $10^{-3}$ m/s pour du sable (Lei *et al*., 2002), 8,8 $10^{-5}$ m/s pour une formation cohésive argileuse (Jiang *et al*., 2015). Sato & Kuwano (2015) déterminent une vitesse critique de 1,5 $10^{-4}$ m/s pour l'initiation du soutirage/suffosion dans un sol sableux cohésif sur la base de données expérimentales en colonne.

Il semble donc que seulement dans les contextes les plus perméables, le soutirage/suffosion puisse opérer ; le processus principal d'évolution des cloches de fontis semble donc être plutôt lié à la desquamation pour ce qui concerne les ouvrages hydrauliques de type bassin de rétention ou digues.

**2) Puisards et forages** (ouvrages d'infiltration ponctuelle)

Pour le cas des puisards et forages, la situation est différente puisque les vitesses d'écoulement peuvent être significativement plus importantes. La formule de Zangar applicable pour les puits/forages en zone vadose, c'est-à-dire n'atteignant pas le toit de la nappe (Bouwer, 2002), permet d'obtenir une estimation des débits infiltrés, et partant des vitesses d'écoulement à l'extrados de l'ouvrage :

$$Q = \frac{2\pi \mathrm{K} Lw^2}{\ln\left(\frac{2\mathrm{Lw}}{\mathrm{rw}}\right) - 1}$$

L'équation n'est valide que si Lw>10 rw

Avec Q le débit d'infiltration ($m^3$/s), K la perméabilité des terrains d'infiltration (m/s), Lw la hauteur de la colonne d'eau dans le puits (m) et rw le rayon du puits (m).

Pour des valeurs typiques de perméabilité et de porosité efficace d'une formation géologique de couverture, ces vitesses sont comprises entre 1 et 5 000 m/h, c'est-à-dire des vitesses rendant le mécanisme de soutirage/suffosion possible (vitesse seuil comprise entre 0,3 et 23 m/h en fonction des matériaux).

En forage, les pressions utilisées par les foreurs peuvent être élevées et directement proportionnelle aux profondeurs de foration. En plus de l'action de forer, l'autre aspect est la possible mise en communication de deux nappes ayant des charges hydrauliques différentes et donc rendant possible la mise en place d'un écoulement.

### 3.1.2. Rabattement de la nappe karstique

Waltham *et al*. (2005) donnent quelques pistes sur la base d'exemples en Chine et en Floride :

- de manière générale, en Chine, les effondrements apparaissent essentiellement lorsque la nappe karstique <u>est rabattue sous le toit de la formation karstifiée et/ou si le rabattement est de plus de 3 m</u>. Si la nappe est, à l'origine, déjà sous le toit de la formation (nappe libre), le rabattement n'est pas sensible et les effondrements sont liés à la concentration d'infiltration (3.1.1) ;

- en Floride, deux aquifères sont superposés : une nappe libre dans une formation sableuse séparée de l'aquifère karstique captif par une formation argileuse. La charge dans la nappe libre est supérieure à celle de la nappe karstique et l'exploitation de cette dernière augmente le différentiel de charge, ce qui contribue à l'augmentation des apparitions d'effondrements.

Tharp (2002) montre par une modélisation hydromécanique (poro-élastique) qu'un rabattement rapide de la nappe au sein de la couverture peut conduire à la montée rapide de cloche de fontis et l'effondrement consécutif par le processus de soutirage. En effet le rabattement cause un gradient de pression interstitielle important dans la couverture. Une analyse de sensibilité est réalisée sur le rabattement (vitesse, amplitude), les propriétés du sol (poro-élasticité, conductivité hydraulique, résistance à la traction) et la géométrie (profondeur du vide initial, taille et forme du vide initial). Pour ces différentes configurations, la vitesse de rabattement doit être au moins de 1 cm/heure et l'amplitude du rabattement d'au moins 1-2 m pour que le soutirage se fasse (pressions de pores plus élevées que les contraintes). Les situations les plus critiques sont rencontrées pour une couverture peu perméable, des couvertures ayant de faibles résistances à la traction et, des cavités initiales de taille importante. Des plus fortes épaisseurs de recouvrement vont réduire l'effet de la desquamation par contre la relaxation de déformations plastiques va au contraire favoriser la desquamation.

Lei & Jiang (2001) montrent par un modèle expérimental que la variation de pression hydrostatique dans la cloche de fontis est critique pour l'apparition d'un effondrement ; en fonction du contexte (nature des terrains, géométrie des vides), les valeurs critiques de variation de pression sont comprises entre 2 et 40 kPa (correspondant à une baisse du niveau de nappe de 0,2 à 4 m). La vitesse de la baisse de niveau est également un paramètre déterminant : les valeurs critiques sont 240 cm/heure pour une formation argileuse de couverture et 50 cm/heure pour une formation sableuse. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Tharp (2002) où décrits par Waltham *et al*. (2005) avec toutefois des vitesses de rabattement significativement plus élevées.

Un autre élément critique est la fluctuation piézométrique au niveau de l'interface formation karstifiée - couverture (Newton, 1987, Illustration 35). La nature de la formation géologique coiffant directement la formation karstique est importante : une formation argileuse limitera l'apparition d'effondrement ; par contre l'épaisseur totale de la couverture n'est pas un facteur limitant.

Le rôle d'une formation peu perméable à l'interface a également été montré par modèles expérimentaux par Chen & Beck (1989).

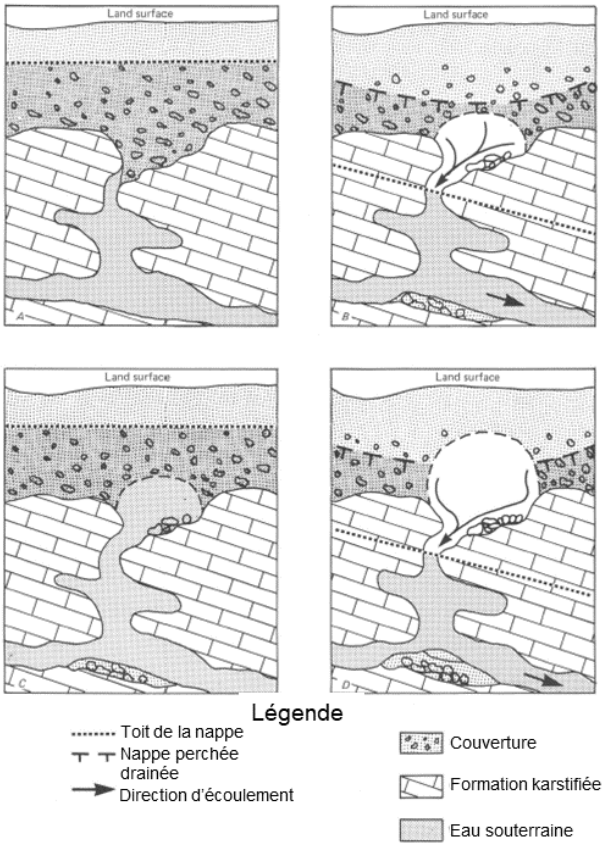


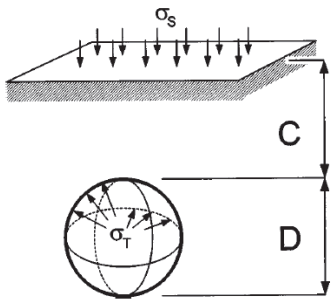

*Illustration 35 - Processus de soutirage par battement de la nappe karstique au niveau de l'interface karst-couverture envisagé par Newton (1987) ; les schémas décrivent une séquence temporelle allant du haut à gauche jusqu'en bas à droite avec deux battements de nappe successifs.*

### 3.1.3. Perturbations physiques du sol

Les perturbations physiques du sol peuvent correspondre à différentes activités : surcharge lié à des travaux, réalisation de sondages/forages (cf. 2.4.5), remblai d'une dépression karstique, mise en place d'une couverture meuble lors d'un aménagement (par exemple remblai, digue, etc.) sur une formation karstifiée.

En règle générale, ces perturbations et leurs conséquences sont abordées de manière descriptive sans outils de modélisation. Des recommandations sont édictées pour limiter l'apparition de désordres (diagnostic préventif avant réalisation de l'aménagement, dimensionnement prenant en compte le contexte karstique, sensibilisation des équipes travaux par le maître d'ouvrage, etc.).

Si la taille et la position de la cavité est connue, il existe des approches théoriques qui permettent d'estimer la stabilité du terrain sus-jacent en cas de surcharge pour des cavités dans la couverture meuble (Augarde *et al*., 2003, Drumm & Yang, 2005) (Illustrations 36 et 37) et pour des cavités dans le massif rocheux (Waltham & Lu, 2007, Illustration 38). Cependant ces approches ne sont valides que si la cavité n'évolue pas. L'applicabilité de ces méthodes est donc limitée.




$$\frac{(\sigma_S - \sigma_T)}{c_u} = 4\ln\left(\frac{2C}{D}+1\right) - \frac{\gamma D}{c_u}\left(\frac{C}{D}+\frac{3}{4}\right)$$

*Illustration 36 - Calcul de la stabilité du toit d'une cavité dans la couverture pour un contexte non-saturé et une cavité qui n'évolue pas en taille ; les paramètres sont explicités dans le schéma de gauche et $c_u$ = la résistance au cisaillement, $\gamma$ = la masse volumique (Augarde* et al., *2003).*

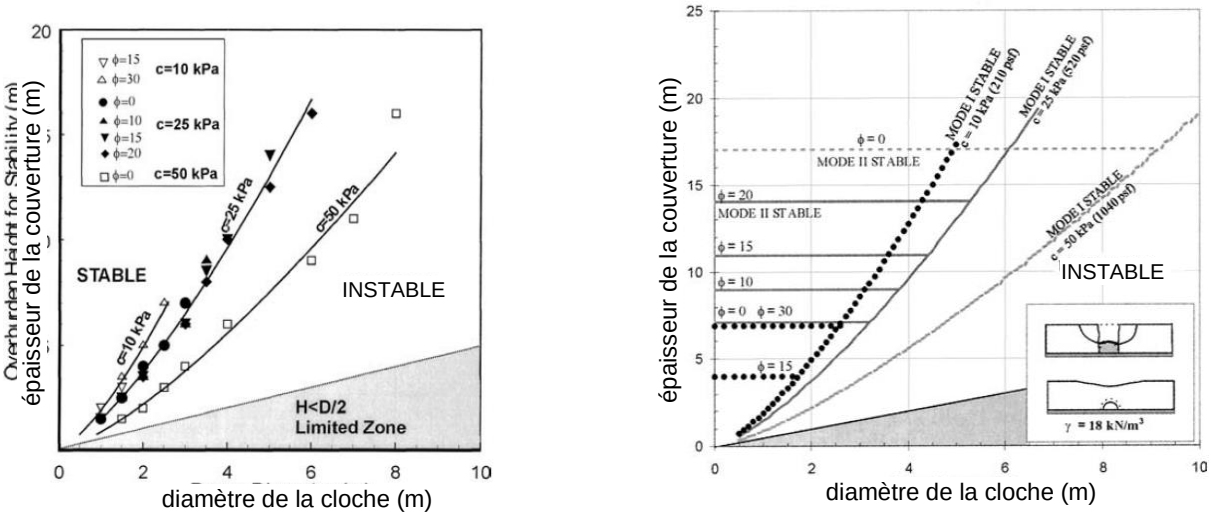



*Illustration 37 - Diagrammes de stabilité du toit d'une cavité dans la couverture pour le modèle fontis (à gauche) et pour les deux types de désordres (fontis = Mode I et affaissement = Mode II) (à droite), c = cohésion et $\phi$ = angle de frottement, H = épaisseur de la couverture, D = diamètre de la cavité (d'après Drumm & Yang, 2005).*

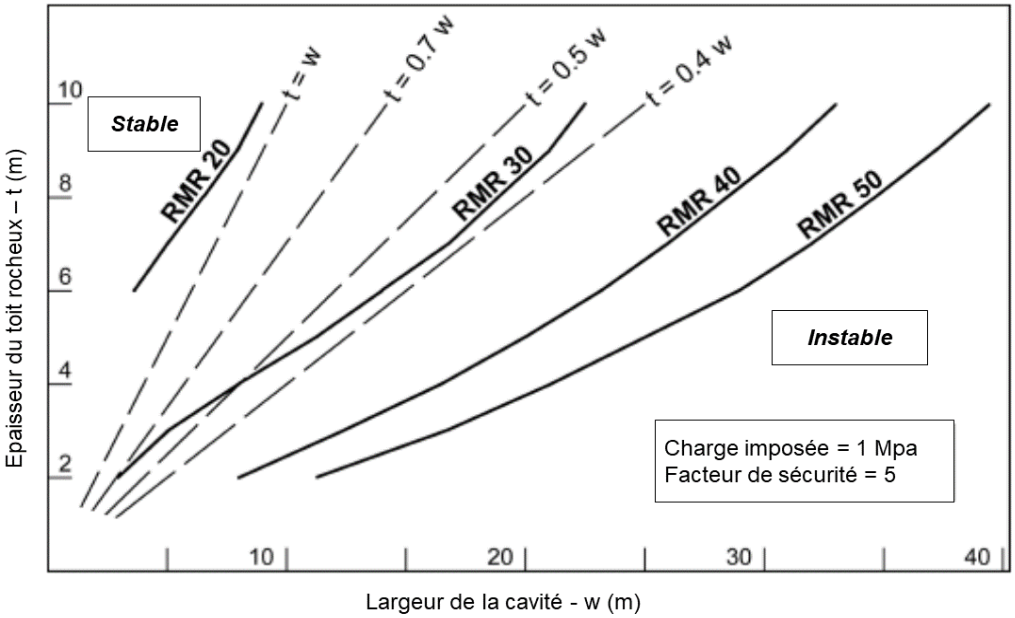



*Illustration 38 - Courbes de stabilité à l'effondrement du toit de cavités présentant des configurations variables (largeur w, épaisseur du toit rocheux t, qualité du massif rocheux RMR), soumises à une charge située à la surface du sol (Waltham & Lu, 2007).*

## 3.2. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

L'objectif de ces simulations exploratoires est de tester pour quelques configurations la dynamique de saturation d'un milieu initialement non saturé et d'obtenir l'évolution du profil des gradients de pression interstitielle au cours de la saturation du milieu. Ces tests doivent permettre d'identifier les situations pour lesquelles on aboutit à des conditions saturées donc favorables au soutirage/suffosion et celles qui maintiennent un milieu non saturé, auquel cas le gradient de pression interstitielle peut donner des informations sur l'activation possible du mécanisme de desquamation.

Les configurations envisagées comprennent deux conditions aux limites (charge imposée pour représenter le cas d'un bassin et flux imposé pour représenter le cas d'une fuite de canalisation ou l'infiltration d'un fossé ou d'un puisard) et plusieurs géométries (épaisseur de la couverture, dimension des aménagements) et paramètres hydrodynamiques (perméabilité et porosité de la couverture).

### 3.2.1. Méthodologie

Le logiciel MARTHE, développé au BRGM, a été utilisé. Ce code est un logiciel de calcul d'écoulement en milieu poreux (en aquifère) basé sur la méthode des volumes finis (maillage du domaine). Le schéma conceptuel correspond à une formation poreuse homogène (couverture du karst) d'une épaisseur non saturée initiale de 16 m (profondeur de la nappe à 16 m) au sommet de laquelle un aménagement est introduit (bassin ou infiltration concentrée). Pour la simulation, le schéma adopté est une coupe verticale du terrain discrétisé en éléments de 0,5 m (hauteur et largeur). La largeur totale du système est de 17 m. Afin de simuler la progression du front de percolation suite à l'aménagement, on simule en régime transitoire un domaine initialement non saturé[5] avec une charge imposée à la base représentant la nappe permanente. La durée de chaque simulation est fixée de manière à ce qu'un régime d'écoulement pseudo-permanent s'installe.

Les paramètres hydrodynamiques et les géométries sont choisis dans des gammes correspondant aux valeurs représentatives des sites tests :

<u>Perméabilités :</u>

- argile à silex (craie de Haute-Normandie) : $4 \times 10^{-5}$ m/s à $4 \times 10^{-9}$ m/s ;
- moraine et fluvio-glaciaire (canal de la Neste) : $10^{-4}$ à $10^{-6}$ ; 15-20 % de porosité ;
- terrasse alluviale ancienne (par exemple glacis d'Olivet) : $10^{-5}$ à $10^{-6}$ m/s ; 10-20 % de porosité.

<u>Épaisseur de la couverture :</u>

- argiles à silex et limons des plateaux (craie de Haute-Normandie) : 10-30 m ;
- moraine et fluvio-glaciaire (canal de la Neste) : 5-25 m ;
- terrasse alluviale ancienne (p ex. glacis d'Olivet) : 5-10 m ;
- argile de décalcification (Bonnevent) : 3-5 m.

[5] Pour toutes les simulations, teneur en eau résiduelle : 5 % ; loi de rétention homographique ; succion à demi-saturation : 1,778 m ; exposant de la loi de rétention : 0,25 ; perméabilité relative selon une loi de puissance 4.

Dimensionnement des aménagements

- bassins de rétention (Haute-Normandie) : 3 000-5 000 $m^2$ (50-70 m de côté) et hauteur d'eau 1-3 m ;
- canal de la Neste : 7-10 m de large ; 1-2 m d'eau ;
- puisards : débit d'infiltration de quelques l/s ;
- fuite de conduite : quelques l/min à quelques l/s.

### 3.2.2. Résultats

#### *Bassin (charge imposée)*

Le scénario de base est constitué par une formation géologique relativement peu perméable ($3 \times 10^{-6}$ m/s) homogène avec une porosité efficace de 20 % et une zone non saturée d'une épaisseur initiale de 16 m. Un bassin de rétention occupant environ 1/3 de la surface du domaine modélisé est alors mis en eau avec un potentiel imposé de 18 m (correspondant à la somme de la lame d'eau dans le bassin (2 m) et l'altitude du fond du bassin (16 m), (Illustration 39). La nappe est drainée par un potentiel imposé à +2 m à la limite droite du modèle (opposé du bassin).

Des simulations en régime transitoire ont été réalisées pour le scénario de base et différentes variantes (perméabilité, porosité, charge hydraulique dans le bassin, taille du bassin, épaisseur de la zone non saturée). Pour chacune des simulations, la durée entre la mise en eau du bassin et la saturation complète des terrains entre le bassin et le toit de la nappe sont relevés (« temps de saturation », Illustration 40), ainsi que le profil des pressions interstitielles au sein de la zone non saturée à la moitié du temps de saturation (Illustration 41). Les points d'observation correspondent à un profil vertical allant de la base du bassin au toit de la nappe.

Les résultats montrent le fort contrôle exercé par la perméabilité avec des temps de saturation 10 fois plus longs pour une perméabilité passant de $3 \times 10^{-6}$ à $3 \times 10^{-7}$ m/s ; la géométrie du système impacte également de manière significative les temps de saturation avec un temps divisé par un facteur 5 pour une zone non saturée passant de 16 m à 8 m et un temps qui double quasiment pour un bassin de taille réduit de moitié. Les autres paramètres (porosité, charge hydraulique dans le bassin) ont par contre peu d'influence sur le temps de saturation. Lorsque le temps de saturation est atteint, un régime pseudo-permanent se met en place avec un relativement fort gradient hydraulique créé par la charge constante en surface que constitue le bassin.

Les profils de pression interstitielle (Illustration 41) présentent tous une forme similaire avec les gradients les plus forts au droit du front de percolation.

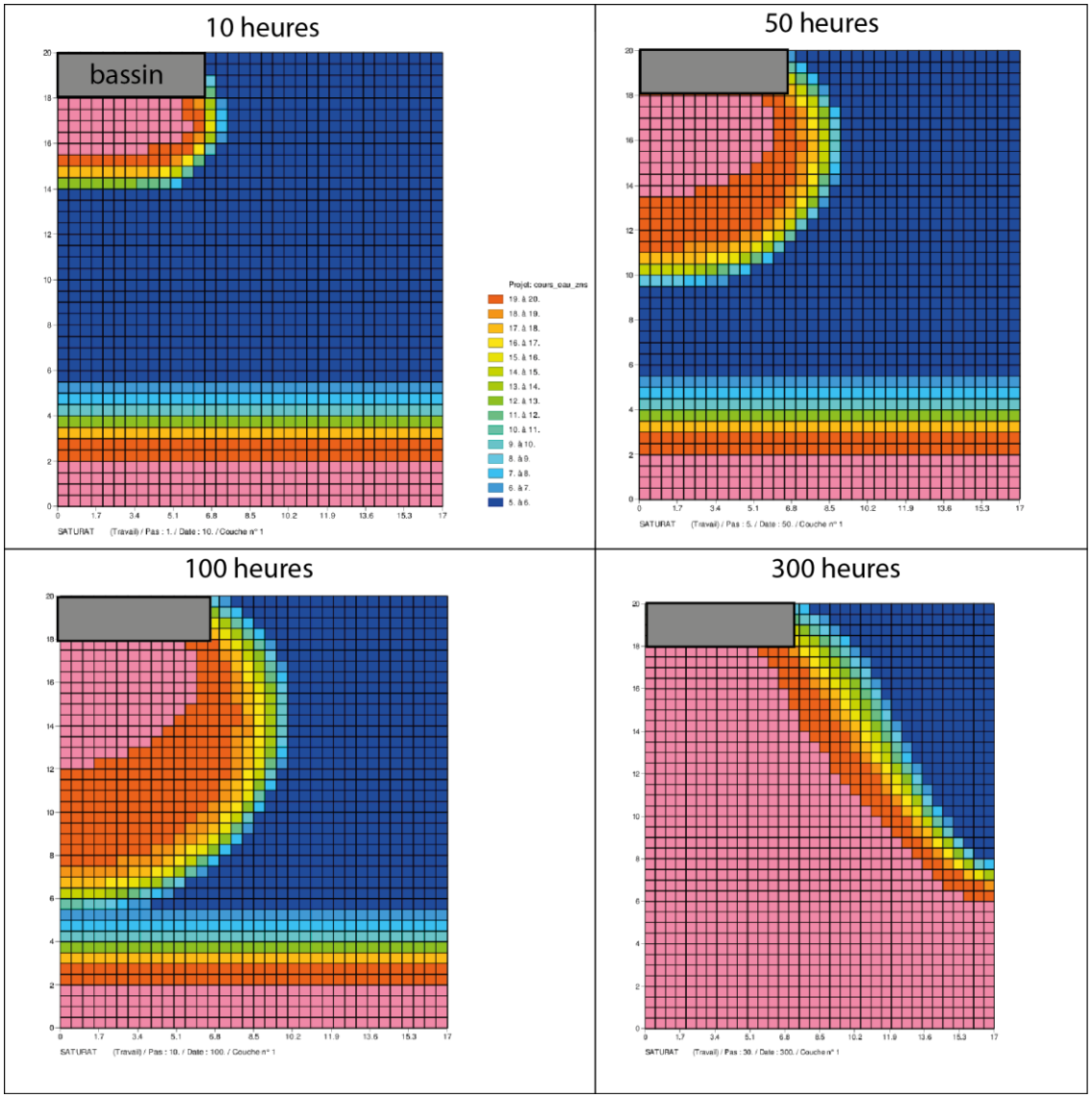



*Illustration 39 - Évolution des teneurs en eau pour le cas du bassin de rétention (scénario de base) à quatre temps successifs ; les conditions saturées sont représentées en rose (100 % de saturation).*

| | Temps de saturation (jours) |
|---|---|
| scénario de base | 5,8 |
| K= 3 x $10^{-5}$ m/s | 0,8 |
| K= 3 x $10^{-7}$ m/s | 57,5 |
| porosité 15% | 3,8 |
| porosité 10 % | 2,1 |
| lame d'eau bassin = 1 m | 6,7 |
| lame d'eau bassin = 3 m | 5,4 |
| bassin taille 2 x inférieure | 9,2 |
| ZNS= 8 m | 1,3 |

*Illustration 40 - Temps de saturation simulés pour le scénario de base et huit configurations ; ZNS = épaisseur de la zone non saturée.*

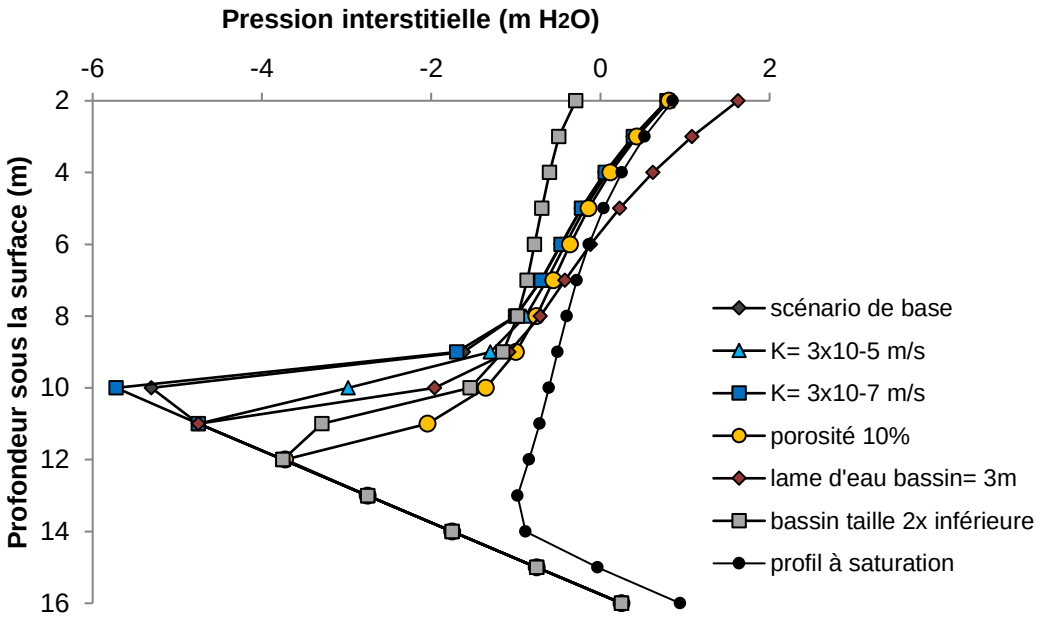



*Illustration 41 - Évolution de la pression interstitielle entre la base du bassin et le toit de la nappe pour les différentes configurations à la moitié du temps de saturation (le profil à saturation est également représenté pour comparaison).*

### *Fuites de canalisation/puisard (débit imposé à la surface)*

Le scénario de base est similaire à celui du bassin de rétention à la différence que le bassin (charge imposée) est remplacé par un débit imposé sur une des mailles de la ligne supérieure du modèle afin de représenter une fuite et la perméabilité est 10 fois supérieure ($3 \times 10^{-5}$ m/s). Pour faciliter le calcul, des charges sont imposées (2 m) aux limites latérales droite et gauche du modèle sur les quatre cellules inférieures ; cela permet de matérialiser le toit de la nappe à la cote 2 m (Illustration 42). Le débit de fuite est de 0,1 L/s, constant sur la durée de la simulation.

Des simulations en régime transitoire ont été réalisées pour le scénario de base et différentes variantes (perméabilité, porosité, débits de fuite, épaisseur de la zone non saturée). Pour chacune des simulations, la durée entre le début de la fuite et le degré de saturation maximale atteinte par les terrains entre la surface et le toit de la nappe sont relevés (« temps d'atteinte du régime pseudo-permanent », Illustration 43) ainsi que le profil des pressions interstitielles au sein de la zone non saturée à la moitié du temps d'atteinte (Illustration 44). Les points d'observation correspondent à un profil vertical allant de la maille où le débit de fuite se produit jusqu'au toit de la nappe.

Les résultats montrent que <u>seule la configuration avec un débit de fuite de 1 L/s permet d'atteindre des conditions saturées</u> ; toutes les autres configurations atteignent un régime pseudo-permanent en conditions de sous-saturation (taux de saturation compris entre 45 % et 90 %). Une perméabilité plus élevée permet d'atteindre le régime pseudo-permanent plus rapidement mais à des taux de saturation plus faible et à l'inverse pour des perméabilités plus faibles. Une diminution de la porosité réduit le temps d'atteinte du régime pseudo-permanent et augmente le taux de saturation. Une réduction de moitié de l'épaisseur de la zone non saturée réduit évidemment significativement le temps d'atteinte mais a par contre peu d'effet sur le taux de saturation.

Une simulation avec une perméabilité de <u>$3 \times 10^{-7}$ m/s montre que cette valeur n'est pas suffisante pour permettre l'infiltration</u> ; en conséquence, on observe une augmentation de la charge hydraulique en surface (débordement). Une autre simulation avec un débit de fuite de 0,01 L/s montre que ce débit n'est pas suffisant pour faire progresser le front de percolation jusqu'à la nappe ; après 50 jours de fuite, le front atteint une profondeur maximale de 7 m (50 % de saturation) puis l'écoulement se fait en régime pseudo-permanent.

Les profils de pression interstitielle (Illustration 44) présentent tous une forme similaire avec les gradients les plus forts au droit du front de percolation.

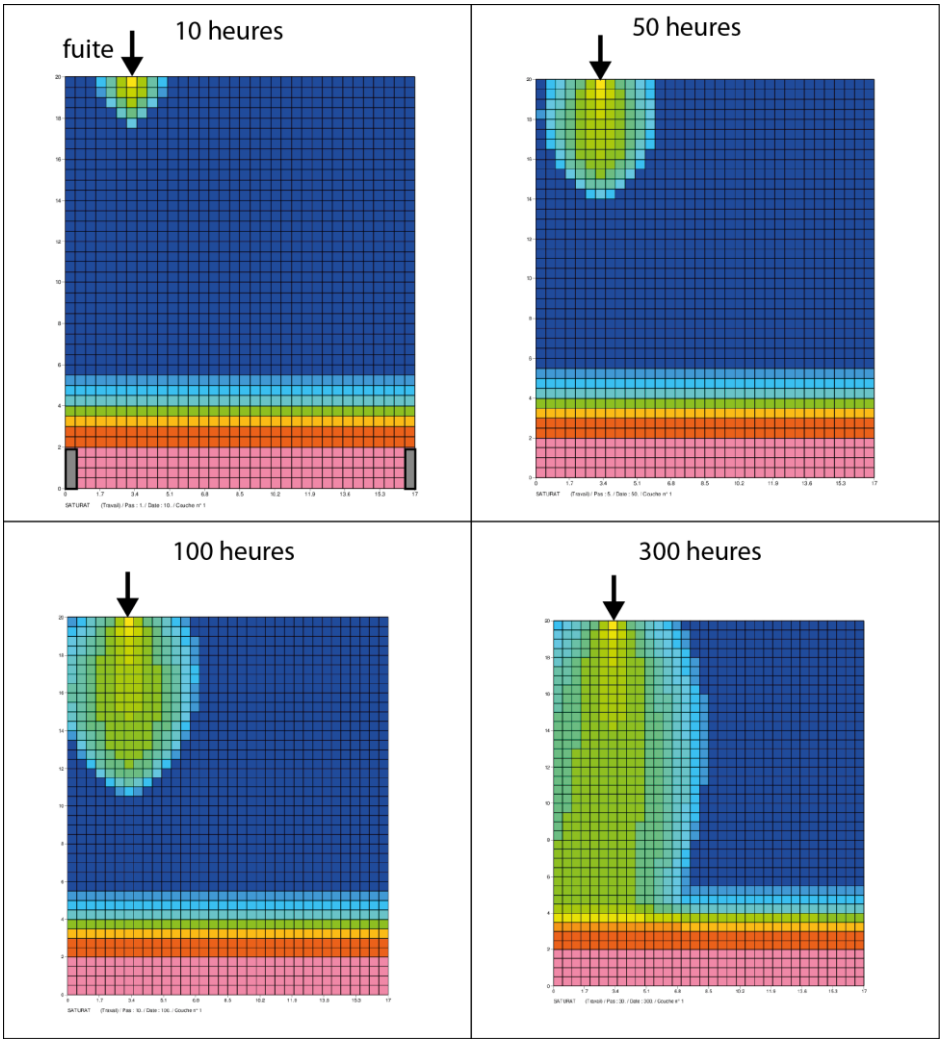



*Illustration 42 - Évolution des teneurs en eau pour le cas d'un débit de fuite en surface (scénario de base) à quatre temps successifs ; les conditions saturées sont représentées en rose (100 % de saturation) ; les mailles à charge imposée (zone saturée) sont indiquées en gris sur le graphique 10 h.*

| | Atteinte régime pseudo-permanent (jours) | Taux de saturation |
|---|---|---|
| scénario de base | 13,3 | 60% |
| K= 3x10$^{-4}$ m/s | 5,4 | 45% |
| K= 3x10$^{-6}$ m/s | 30,0 | 90% |
| porosité 15% | 6,7 | 67% |
| porosité 10% | 3,3 | 80% |
| Qinj= 1 L/s | 2,9 | 100% |
| ZNS= 9m | 6,7 | 65% |

*Illustration 43 - Temps d'atteinte du régime pseudo-permanent et taux de saturation atteint sous ce régime (valeur minimale sur le profil vertical) ; ZNS = épaisseur de la zone non saturée.*

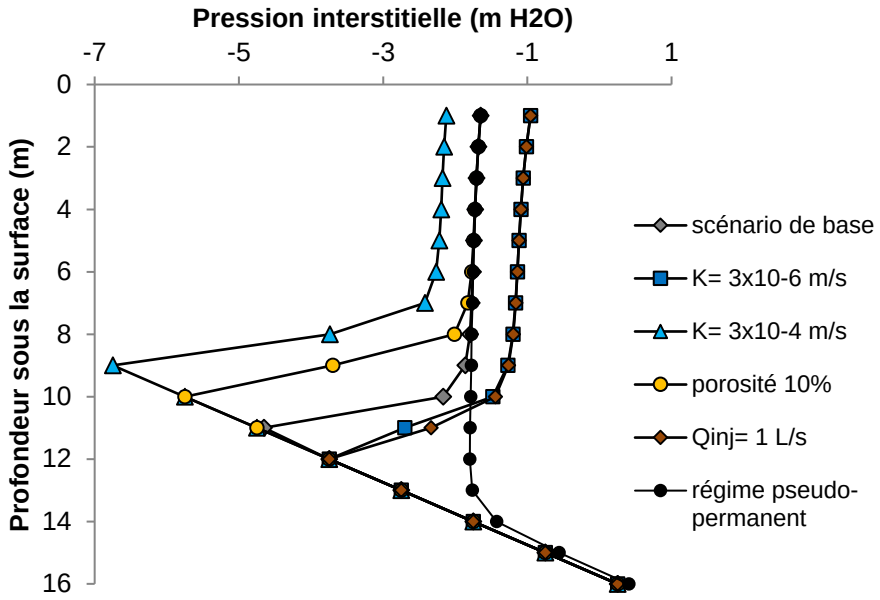



*Illustration 44 - Évolution de la pression interstitielle entre la surface du sol et le toit de la nappe pour les différentes configurations à la moitié du temps d'atteinte du régime pseudo-permanent (le profil au régime pseudo-permanent est également représenté pour comparaison).*

### 3.2.3. Synthèse des résultats des simulations numériques

Pour les deux scénarios, les gradients de pression interstitielle sont les plus marqués au droit du front de percolation. Ces conditions sont favorables au processus de desquamation comme déjà indiqué par Tharp (1999).

Dans les conditions de la simulation, les scénarios avec un bassin de rétention montrent qu'un régime saturé est atteint selon une durée variable (1 à 58 jours) après la mise en eau du bassin en fonction de la configuration. La perméabilité des terrains a le plus fort contrôle sur cette durée. Après saturation, le processus de soutirage/suffosion peut alors se mettre en place.

Au contraire, les scénarios de fuite d'une canalisation ou de puisard en surface montrent que pour des débits modestes (< 1 L/s), la saturation n'est pas atteinte et qu'un régime pseudo-permanent s'établit en condition non saturée. Le processus de soutirage/suffosion ne semble donc pas pouvoir être évoqué dans le cas d'une fuite (sauf en cas de forts débits).

Ces simulations ont été réalisées pour des conditions initiales particulièrement sèches (teneurs en eau initiales égales à la teneur en eau résiduelle, soit 5 %). Ces conditions maximisent les gradients de pression ; dans des conditions initiales plus humides, les gradients sont amortis et le temps de saturation devient plus court. De telles conditions pourront favoriser le processus de soutirage/suffosion au détriment de la desquamation.

Ces résultats, obtenus dans le cadre d'une modélisation exploratoire des processus, sont préliminaires. Il serait intéressant de pousser plus loin les tests en considérant des contextes hétérogènes et des scénarios plus réalistes (variations temporelles de charge ou de débit).

# 4. Synthèse et recommandations

L'analyse des retours d'expérience montre des désordres liés à des aménagements pour tous les types de contexte karstique (calcaire, craie, gypse) avec une prépondérance d'événements dans le cas des karsts carbonatés sous couverture meuble. Ce résultat est cohérent avec la forte sensibilité de ces karsts couverts à l'aléa mouvement de terrain (Perrin *et al*., 2014). Dans ce cas, le processus dominant est le soutirage/suffosion et la desquamation des matériaux meubles de la couverture vers les vides karstiques qui en sont le réceptacle.

Les différents types d'aménagement à l'origine de désordres (bassins, canalisations à l'air libre ou enterrées, ouvrages d'infiltration ponctuelle, pompages et tunnel) correspondent aux principaux types d'aménagement identifiés dans les références bibliographiques internationales (§ 1.2). Une différence notable est le rôle minime des pompages puisque ceux-ci ne sont évoqués que dans quatre cas dans le cadre du retour d'expérience réalisé à l'échelle nationale.

Les aménagements touchés par ces désordres sont presque toujours mis hors d'usage (ouvrages hydrauliques) ou mis en péril (bâtiments). Quelques cas de ruines ou de victimes liées aux désordres doivent être retenus comme cas extrêmes.

La vitesse d'apparition des désordres suite à la mise en place d'un aménagement est très variable (à titre d'exemple : instantanée lors de la réalisation d'un forage à plus d'un siècle pour le cas d'un canal de dérivation). La nature de l'aménagement (par exemple flux d'eau ou charge hydraulique imposée en surface) et le contexte géologique (cohésion des matériaux, épaisseur de la couverture, nature du karst, *etc*.) vont fortement contrôler la cinétique du phénomène.

Dans tous les cas, l'aménagement va accélérer des mécanismes déjà actifs mais qui, normalement, progressent sur des échelles de temps bien plus longues (accélération de l'érosion interne en karst sous couverture, accélération de la dissolution en contexte de gypse) voire pourra initier un processus inopérant en conditions naturelles (mise en place d'un gradient hydraulique, saturation d'un terrain non saturé, augmentation des pressions d'eau interstitielle, etc.) Les résultats de la modélisation exploratoire et les éléments issus de la bibliographie montrent que les paramètres clés dans l'accélération ou l'apparition de l'instabilité sont :

<u>Dans le cas d'une concentration de l'infiltration</u> :

La perméabilité, la cohésion et l'épaisseur de la couverture ; la nature de l'aménagement (débit d'infiltration, charge imposée, variations de charge ou de débits).

<u>Dans le cas de modifications du niveau piézométrique</u> :

La position de la nappe par rapport à l'interface couverture-karst, la dynamique de la nappe (amplitude des variations, vitesses de variation).

Sur la base de ces résultats, il est pertinent de proposer une série de **recommandations** qui pourront ensuite servir dans des **documents de gestion du risque gravitaire** en particulier pour des territoires vulnérables aux désordres liés à la présence de karst (karst carbonaté sous couverture, gypse). De telles recommandations ont aussi un intérêt dans des documents à portée plus générale sur l'aménagement du territoire (**planification, urbanisme**), la **gestion des eaux superficielles**, etc.

De manière générale, si le contexte géologique est sensible, la première étape d'une étude doit comprendre un **diagnostic karstique** par un bureau d'étude spécialisé afin de préciser l'aléa mouvement de terrain. Cette analyse ne doit pas se contenter d'étudier le seul site du projet, elle doit s'étendre à la zone d'influence potentielle du projet vis-à-vis du fonctionnement de l'ensemble du secteur karstique. Ce type d'étude comprend typiquement une enquête documentaire (contexte géologique, hydrogéologique, analyse des désordres survenus dans le secteur), suivie, selon les résultats de cette première approche, d'investigations plus ou moins approfondies : mesures géophysiques et/ou géotechniques. Une des difficultés à ce stade est de prévoir l'extension du réseau karstique et la profondeur d'initiation des désordres potentiels afin d'adapter en conséquence les techniques géophysiques/géotechniques à mettre en œuvre. Seule une étude bibliographique sérieuse permet d'apprécier ces aspects.

**En cas d'aléa avéré et si l'aménagement ne peut pas être déplacé** en dehors de la zone d'aléa ou si le risque est considéré comme acceptable, alors il convient d'adapter la construction à l'aléa en prenant certaines **mesures préventives**. La littérature à ce sujet est abondante. Nous proposons ici quelques principes déclinés en fonction du type d'aménagement et du type de karst (Illustration 45). Ces principes sont basés sur les résultats du retour d'expérience, de la modélisation exploratoire et de l'analyse bibliographique.

| Aménagement | Karst nu | Karst s/couverture | Evaporites |
|---|---|---|---|
| Bassin (de rétention)<br>Canalisation à l'air libre (fossé de drainage, dérivation de cours d'eau, canal) | Imperméabilisation locale des points où le karst est comblé, drainage hors zone de karst comblé ; décapage du comblement jusqu'au rocher | Imperméabilisation des secteurs en eau en particulier si la perméabilité des terrains favorise l'infiltration (> $10^{-6}$ - $10^{-7}$ m/s) | Imperméabilisation des secteurs en eau |
| Canalisation enterrée | Vérification régulière des canalisations, suivie d'une réparation des zones de fuite | Utilisation de conduites flexibles à joint télescopique<br><br>Inspection régulière des canalisations | Utilisation de conduites flexibles à joint télescopique<br><br>Inspection régulière des canalisations |
| Puits/puisard pour la réinfiltration des eaux | Eviter le choix d'un site où le karst est comblé ; isoler la partie altérée du calcaire (zone épikarstique) par cimentation.<br><br>Dans le cas d'ouvrages existants, limiter les débits d'infiltration | Isoler les formations de couverture et le toit du karst : cimentation jusqu'à la zone saine (forage télescopique)<br><br>Dans le cas d'ouvrages existants, limiter les débits d'infiltration | Isoler l'ensemble des couches évaporitiques de possibles fuites. |
| Réalisation d'un sondage ou forage[6] | Pas de précaution particulière (s'assurer de l'absence de vide ou de bouchon d'altération à faible profondeur) | Isoler les formations de couverture : tubage à l'avancement, cimentation (forage télescopique) | Isoler les formations de couverture et les zones d'évaporites : tubage à l'avancement, cimentation, fluide de forage adapté |
| Pompage | Vérifier l'influence du pompage sur le possible débourrage de conduits verticaux colmatés par un suivi piézométrique et une évaluation de la zone d'influence du pompage | Limiter le rabattement (ne pas dénoyer la couverture et l'interface avec le karst) ; éviter les fluctuations à proximité de l'interface | Eviter d'initier ou augmenter les écoulements d'eau dans la formation évaporitique |
| Tunnel, excavation | Peu de REX pour cette étude ; se reporter aux recommandations de l'AFTES : http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html | | |
| Travaux BTP | Traitement préventif (renforcement des cavités sous-jacentes) ; en cas de surcharge se reporter aux éléments présentés au § 3.1.3 | Traitement préventif (cimentation, compaction dynamique, géotextiles, *etc.*) ; en cas de surcharge se reporter aux éléments présentés au § 3.1.3 | Traitement préventif (cimentation, compaction dynamique, géotextiles) ; en cas de surcharge se reporter aux éléments présentés au § 3.1.3 |

*Illustration 45 - Tableau synthétisant les mesures préventives préconisées en cas d'aménagement dans un contexte sujet au risque mouvement de terrain lié à la présence de karst.*

[6] Les références AFNOR (2014) & BRGM (2004) & Herbaux *et al.*, (2015) donnent des recommandations générales sur les bonnes pratiques lors de la réalisation de forages d'eau et pour la géothermie.

En outre, il convient de rappeler que des mesures prises sur la gestion des eaux superficielles peuvent avoir un impact sur les problématiques connexes que sont la préservation de la **qualité des eaux souterraines** et la prévention des **inondations** en contexte karstique.

En cas d'apparition de désordres, il existe plusieurs **méthodes de traitement et de remédiation**. Le principe premier de ces mesures curatives consiste à préserver le fonctionnement hydrogéologique de l'ensemble de la zone : l'eau étant le principal facteur déstabilisant, imperméabiliser totalement un désordre lié au karst risque d'engendrer à terme un nouveau désordre à proximité. On peut, dans ce cadre citer les principes suivants :

David *et al*. (2010) présentent un état des lieux des traitements des bétoires (effondrements et pertes) en Haute-Normandie. Le rapport détaille les différents types d'aménagements de bétoires en distinguant dispositifs étanche ou infiltrant (Annexe 3) 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.* » On peut également se reporter à l'Illustration 23 qui montre l'exemple d'un traitement réalisé dans ce type de contexte.

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 46).

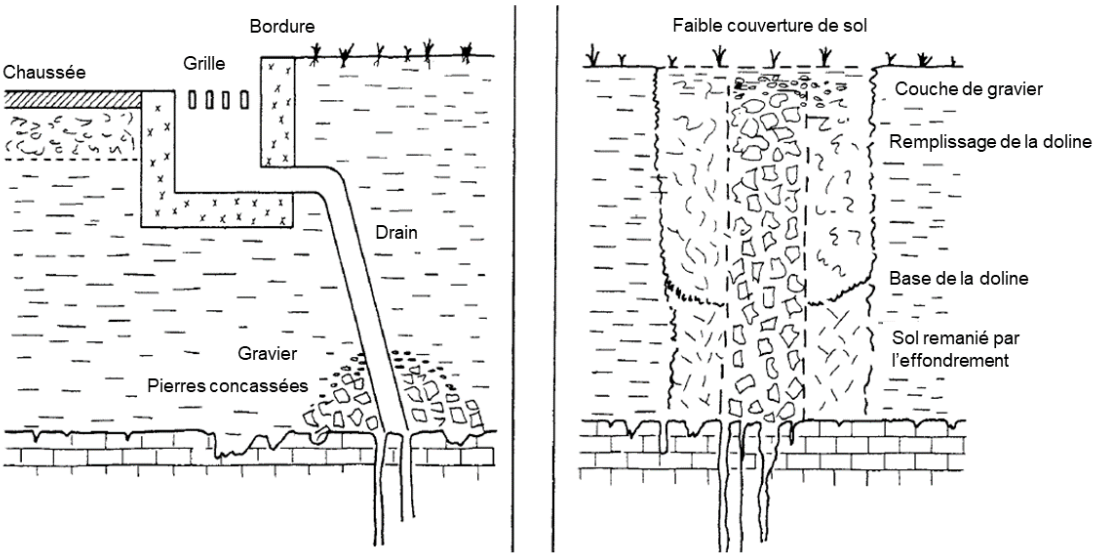



*Illustration 46 - À gauche : aménagement du drainage d'un secteur imperméabilisé (route, parking) vers un drain karstique ; à droite : traitement d'un fontis permettant de préserver son rôle de drainage des eaux superficielles (d'après White* et al., *1986).*

Stephenson *et al*. (1999) montrent un exemple de gestion des eaux de ruissellement d'une autoroute en région karstique (Tennessee, États-Unis) et une solution de ré-infiltration et traitement dans une doline aménagée (Illustration 47).

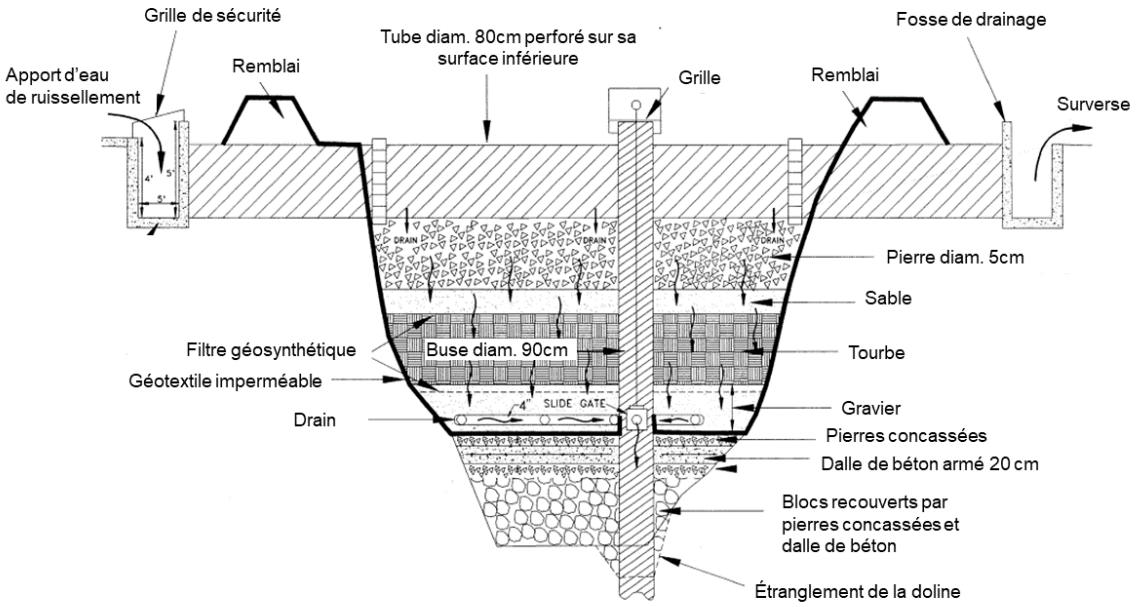



*Illustration 47 - Design d'un système de traitement des eaux de ruissellement d'une autoroute et réinjection concomittante à la nappe par le biais d'une doline aménagée (Tennessee, Stephenson* et al., *1999).*

Dans tous les cas, le comblement des dépressions (en particulier les dolines de dissolution) (Nicod, 1984, Chovrot, 2012) devrait être soumis à des conditions particulières. Un comblement imperméabilisant la surface risque de mener ultérieurement à des mouvements de terrain (tassement différentiel, affaissement), voire à modifier durablement les écoulements d'eau (risque d'inondation, modification des débits et de la qualité des eaux souterraines en aval). De tels comblements doivent naturellement être adaptés non seulement au contexte hydrogéologique de l'ensemble de la zone (rôle naturel de la dépression dans les infiltrations), mais aussi au site en lui-même et à l'usage qui en est prévu (gestion des eaux y arrivant).

# 5. Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de réunir 77 retours d'expérience illustrant clairement le rôle des aménagements dans l'apparition de désordres en contexte karstique[7] (40 cas concernant le karst du calcaire, 30 le karst de la craie et 7 pour le cas du gypse). Des trois grandes catégories d'aménagement pouvant être à l'origine de désordres (concentration des eaux d'infiltration, rabattement de la nappe karstique et perturbations physiques du sol), la concentration des eaux d'infiltration semble la plus impactante sur le territoire national compte-tenu de nos retours d'expérience. Celle-ci est causée par quatre types d'aménagements : les bassins, les canalisations aériennes, les canalisations enterrées et les ouvrages d'infiltration ponctuelle. Pour chacun de ces cas, la modélisation conceptuelle a montré que l'infiltration d'eau accélère très significativement les processus d'érosion interne menant au désordre. En conséquence, les aménagements sont généralement impactés par l'apparition du désordre (55-66 % sont mis hors d'usage, 8-17 % sont mis en péril).

Ce constat montre la nécessité de proposer des recommandations pour limiter l'apparition de désordres lors d'aménagements dans des secteurs à aléa avéré. Ces recommandations sont déclinées par type d'aménagements et par contexte karstique (Illustration 45).

Les recommandations proposées pourront être affinées ultérieurement en s'appuyant sur les travaux de recherche en cours visant à modéliser l'érosion interne pour différents types de configuration (collaboration en cours avec l'IRSTEA). À terme, ces recommandations pourront alimenter un guide méthodologique portant sur la caractérisation de l'aléa mouvements de terrain lié au karst et les moyens de réduction de cet aléa.

Il pourrait également être intéressant de mener une analyse économique comparant les approches préventives pouvant être proposées à des situations où un traitement a dû être réalisé suite à l'apparition de désordres.

[7] Ces fiches sont disponibles au BRGM pour consultation.

# 6. Bibliographie

**Association Française de Normalisation** (AFNOR). Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisées par forages. Norme française NF X 10-999, Septembre 2014 : indice de classement X 10-999. 72 p.

**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.

**Augarde C.E., Lyamin A.V., Sloan, S.W.** (2003) - Prediction of undrained sinkhole collapse. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 129(3): 197-205.

**Bayle E.** (2008) - Bonnevent-Veloreille (70) - Avis géologique sur les phénomènes karstiques -BRGM/RP-56955-FR - Avis du BRGM - Rapport final.

**Bonelli S.** (2012) - Érosion des géomatériaux - Érosion interne et de surface. (sous la direction de). Lavoisier, Mécanique et Ingénierie des Matériaux.

**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.

**Bouwer H.** (2002) - Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal 10:121-142.

**Brezinski D.K.** (2007) - Geologic and anthropogenic factors influencing karst development in the Frederick region of Maryland. Environmental Geosciences 14(1): 31-48.

**BRGM** (2004) - Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau. 92 p. Format PDF, travail coordonné par Albouy, L et Seguin, J, J.. Disponible sur : http://www.loire.gouv.fr/IMG/pdf/rubrique1110.pdf.

**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.

**Chovrot G.** (2012) - Un patrimoine à préserver: les dolines. *In* Inventaire spéléologique du Doubs, tome 5. GIPEK, Ornans.

**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., Dörfliger N.** (2010) - Aménagements des bétoires en Haute-Normandie - État de l'art et préconisations de bonnes pratiques. Rapport BRGM RP-58795-FR.

**David P-Y.** (2012) - Inventaire régional Haute-Normandie des bétoires, trajets souterrains des eaux (traçages) et des exutoires. Rapport final BRGM/RP-61691-FR : 128 p.

**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.

**Drumm E.C., Yang M.C.** (2005) - Preliminary screening of residual soil stability in karst terrain. Environmental and Engineering Geoscience 11(1): 29-42.

**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**. (2015) - 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 preparé pour la DGATLP du Ministère de la Région Wallonne: 349 p.+ annexes.

**Luu LH., Philippe P., Noury G., Perrin J., Brivois O.** (2017) - Erosion of cohesive soil layers above underground conduits. Accepté à la conférence Powder and Grains, Montpellier 2017.

**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. Quaterly 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 3rd 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.

**Perrin J., Noury G.** (2015) - Évaluation du rôle des aménagements sur l'apparition d'effondrements en contexte karstique. Phase 1 : bibliographie et retours d'expérience. Rapport BRGM/RP-65280-FR, 52 p.

**Quesnel F.** (1997) - Cartographie numérique en géologie de surface ; application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris - Documents du BRGM 263.

**Regazzoni P.-L., Marot D.** (2013) - A comparative analysis of interface erosion tests. Natural Hazards 67: 937-950.

**Safege.** (2009) - Recherche des causes d'effondrement le long du ruisseau de Cligneux, commune de Saint-Rémy-du-Nord. Rapport d'étude.

**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 bétoires en station d'épuration (département de Seine Maritime). Étude 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.

**Valdes D., Dupont J-P., Laignel B., Slimani S., Delbart C.** (2014) - Infiltration processes in karstic chalk investigated through a spatial analysis of the geochemical properties of the groundwater: The effect of the superficial layer of clay-with-flints. Journal of Hydrology 519: 23-33.

**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

# 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[1] : _____

_____

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 ? _____

[1] Effondrement est pris au sens large et comprend tout type de mvt. 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 2

# Tableau de synthèse des retours d'expérience

| Réf. Fiche | Lieu dit | Commune | Dpt | Date visite site | Terrain karstifié | Typologie karst | Origine ruissellement | Aménagement - Type | Type de désordre | Processus | Année d'apparition | Diam. (m) | Prof. (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | Grainville | 27 | 05/11/1996 | craie | karst sous couverture | | bassin | Affaissement | Soutirage | 1996 | 4.5 | 0.5 |
| 2 | parcelle AT 314 | Petit Quevilly | 76 | 26/06/2008 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement (quasi) | Soutirage | 2008 | 0.5 | 0.5 |
| 3 | | Gommerville | 76 | 01/12/2009 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Affaissement | Soutirage | 2009 | 9 | 0.5 |
| 4 | parcelle AC92a | Longuerue | 76 | 21/03/2005 | craie | karst sous couverture | eau pluviales | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2008 | 0.4 | 1.4 |
| 5 | parcelle B383 | Saint Pierre Le Viger | 76 | 13/12/2005 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2005 | 4 | 3 |
| 6 | La carrhée | Criquetot-L'esneval | 76 | 28/12/1999 | craie | karst sous couverture | écoulement pluvial bord de route | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 1999 | 12 | 4 |
| 7 | bassin d'infiltration | Criquetot-L'esneval | 76 | 29/03/2010 | craie | karst sous couverture | bassin d'infiltration de STEP | bassin | Effondrement | Soutirage | 2007 | 15 | 3 |
| 8 | 112 route de Dieppe | Maromme | 76 | 21/05/2012 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2012 | 4 | 4.5 |
| 9 | bassin | Sausseuzemare-en-Caux | 76 | 02/03/2011 | craie | karst sous couverture | bassin d'infiltration de STEP | bassin | Effondrement | Soutirage | 2011 | 14 | 5 |
| 10 | Sainte Hélène | Saint Jouin Bruneval | 76 | 06/11/2009 | craie | karst sous couverture | fossé drainage bassin | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2009 | 5 | 1.5 |
| 11 | piézomètre | Brametot | 76 | 15&16/12/2008 | craie | karst sous couverture | | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2008 | 2.5 | 1.7 |
| 12 | Les Noyers | Saint-Maixant | 33 | 21/06/2010 | calcaire | karst sous couverture | sur coteau argileux et surface imperméabilisées | bassin | Effondrement | Soutirage | 2010 | 3 | 3 |
| 13 | Les Acroux | Moulins-Engilbert | 58 | 12/07/2011 | calcaire | karst sous couverture | route | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2011 | 4 | 3 |
| 16 | parcelle AS171 | Petit Quevilly | 76 | 25/10/2001 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2001 | 0.7 | 3 |
| 17 | parcelle AT 13 | Petit Quevilly | 76 | 16/10/2000 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2000 | 0.4 | 1.2 |
| 18 | parcelle ZH60 | Saint Leonard | 76 | 01/10/2000 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2000 | | |
| 19 | Hameau de l'Anerie | La Sabotterie | 8 | 21/05/2008 | calcaire | karst sous couverture | route | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement ? | Soutirage | 2008 | 1 | 1.5 |
| 20 | 23 rue Cronstadt | Périgueux | 24 | 28/07/2009 | calcaire | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2009 | | |
| 21 | quartier Escalès | Illats | 33 | 12/03/2014 | calcaire | karst sous couverture | route | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage | 2014 | 4 | 2 |
| 22 | bassin de | Manéglise | 76 | 04/09/2015 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2015 | 2 | |
| 23 | bassin du bourg | Manéglise | 76 | 04/09/2015 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2015 | | |
| 24 | Eneaumare | Saint Martin du Manoir | 76 | 04/09/2015 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2015 | | |
| 25 | fossé | Criquetot-L'esneval | 76 | | craie | karst sous couverture | | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | | | |
| 26 | Val Postel | Bourg Achard | 27 | | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | | | |
| 27 | Bassin Champ Cornu | Le Mesnil Esnard | 76 | 21/07/2011 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2011 | | |
| 28 | Bassin n°1 | Roncherolles sur le vivier | 76 | 11/07/2014 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2014 | 5 | 2 |
| 29 | bassin n°2 | Roncherolles sur le vivier | 76 | 11/07/2014 | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2012 | | |
| 30 | bassin | Roncherolles sur le vivier | 76 | | craie | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | | 3 | |
| 31 | rue Jean Bogé | Port sur Saône | 70 | 08/06/2011 | calcaire | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2011 | 0.5 | |
| 33 | La Crosse F4 | La Frenaye | 76 | 18/05/2008 | craie | karst sous couverture | amorce de thalweg | bassin | effondrement | Soutirage | | 0.1 | 1.5 |
| 34 | Bassin du Centre GRA-1 | Graimbouville | 76 | 26/07/2010 | craie | karst sous couverture | vallon | bassin | effondrement | Soutirage | 2009 | 1.8 | 1 |
| 35 | Digue de la Bretonniere | Gruchet le Valasse | 76 | 01/09/2012 | craie | karst sous couverture | thalweg | bassin | Affaissement | Soutirage | | 6 | 2 |
| 36 | Le Nouveau Monde | Saint Nicolas de la Taille | 76 | 12/05/2011 | craie | karst sous couverture | vallon | bassin | Effondrement | Soutirage | | 1.7 | 2 |
| 37 | rue du Petit Muids | Chapelle-Saint-Mesmin | 45 | 29/10/2012 | calcaire | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Débourrage ou Soutirage | 2012 | 2 | 2.2 |
| 38 | 180 rue de Rolland | Mézières-lez-Cléry | 45 | 09/08/2013 | calcaire | karst sous couverture | vidange piscine | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2013 | 1.6 | 0.3 |
| 39 | RD126 | Dasle | 25 | 18/09/2012 | calcaire | karst sous couverture | naturel et apport surfaces imperméabilisées | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Débourrage | 2008 | 2 | 3.5 |
| 40 | Bois de la Chenalaie | Orchamps-Vennes | 25 | 08/01/2011 | calcaire | karst nu | ruisseau temporaire naturel à faible débit dans fossé | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage | 2011 | 1 | 5 |
| 41 | RD683 | Roche-lez-Beaupré | 25 | 30/07/2013 | calcaire | karst sous couverture | parking | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage | 2012 | 2.5 | 4.5 |
| 42 | Rue de la petite Voie | Bougey | 70 | 12/12/2011 | calcaire | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2011 | 3.5 | 3 |
| 43 | | Bonnevent Veloreille | 70 | 05/12/2008 | calcaire | karst de contact | bassin versant sur les marnes | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Débourrage ou Soutirage | | 2 | 3 |
| 44 | La Chutenaie | Saffré | 44 | 2011-2013 | calcaire | karst sous couverture | bassin versant hydrographique | pompage | Effondrement | Soutirage | | | |
| 45 | Zone d'activités Moulin l'Ecalles | Vieux Manoir | 76 | 09/04/2001 | craie | karst sous couverture | thalweg | bassin | Effondrement | Soutirage | 2001 | | 0.6 |
| 46 | rue du vieux Moulin | Yvetot | 76 | 10/06/2013 | craie | karst sous couverture | thalweg | bassin | Effondrement | Soutirage | 2012 | | |
| 47 | LGV | Malataverne | 26 | | calcaire | karst sous couverture | forte pluviométrie | bassin | effondrement | Soutirage | 1997 | 12 | 7 |
| 48 | Effondrement de la dérivation du Gour | Champlive | 25 | 26/06/2015 | calcaire | karst nu | bassin versant | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage | 1997 | 2 | 5 |
| 49 | Hameau Granges Feuillet | Salins les Bains | 39 | 08/06/2011 | calcaire | karst de contact | bassin versant naturel, eaux usées et pluviale | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage | 1980 | 4 | 4 |
| 50 | n°18 rue Pezeau | Beautiran | 33 | 26/07/2014 | calcaire | karst sous couverture | eau toiture | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2014 | 1 | 0.8 |
| 51 | Le Douée | St Aubin les Forges | 58 | 28/05/2014 | calcaire | karst nu | ruisseau | canalisation aérienne | Effondrement | Débourrage ou Soutirage | 2014 | 1 | 0.5 |
| 52 | plaine de Coureyrolles | Hèches | 65 | 06/11/2014 | calcaire | karst sous couverture | | canalisation aérienne | Affaissement | Soutirage | 2014 | 2.5 | 0.03 |
| 53 | Aire autoroute Pech Montat | Cressenssac | 46 | | calcaire | karst nu/sous couverture | doline évacuation bassin de | bassin | effondrement | Soutirage | | 6.5 | 2.5 |
| 54 | les Vergers du Ruquet | Villers-Pol | 59 | 02/07/2015 | craie | karst sous couverture | | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2015 | 3.5 | 1 |
| 55 | Hameau du Bois | Beaufort | 59 | 18/07/2012 | calcaire | karst sous couverture | | pompage | Effondrement | Soutirage | 2012 | 2.5 | 1 |
| 56 | Carreau | Grayant | 33 | 18/06/2012 | calcaire | karst sous couverture | | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2006 | 7 | 2.5 |
| 57 | | Aubervilliers | 93 | | gypse | Karst sous couverture | | pompage | Effondrement/Affaissements | Dissolution | | | |
| 58 | Les Marimonts | Thiviers | 24 | 18/12/2012 | calcaire | karst nu/sous couverture | | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2012 | 0.8 | 1.5 |
| 59 | Peyrié | Savignac-sur-Leyze | 47 | 03/09/2013 | calcaire | karst sous couverture | précipitations sur bassin versant | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2012 | 1.5 | 3 |
| 60 | Centre Ville | Bargemon | 83 | 07/11/2011 | gypse | Karst sous couverture | versant et surfaces imperméabilisées | canalisation enterrée | Affaissements | Dissolution | | | |
| 61 | Avenue des Arènes de Cimiez | Nice | 6 | | gypse | karst nu | | canalisation enterrée | Effondrement/Affaissements | Dissolution | 2015 | 6 | 25 |
| 62 | RD465 | Miserey-Salines | 25 | 14/05/2013 | calcaire | karst de contact | route et versant | canalisation aérienne | Effondrement ? | Soutirage | 2008 | 3 | 2 |
| 63 | Trou du Prélot | Geney | 25 | | calcaire | karst de contact | | bassin | Effondrement | Débourrage | 2008 | 2 | 4 |
| 64 | Puits des égouts | Gondenans-Montby | 25 | | calcaire | karst nu | égouts | canalisation enterrée | Effondrement ? | Débourrage | 1992 | | 10 |
| 65 | Perte de l'autoroute | Voillans | 25 | | calcaire | karst sous couverture | bassin versant | bassin | effondrement | Débourrage ou Soutirage | 2001 | 1.5 | 7 |
| 66 | La Houpette | Rupt-aux-Nonains | 55 | 25/12/1997 | calcaire | karst sous couverture | route | bassin | Effondrement | Débourrage | | 1 | 1 |
| 67 | Morfondé (Bassin Ouest de) | Villeparisis | 77 | Avant Mars 1996 | Gypse | karst nu | Ecoulements superficiels sur sols marno-argileux | bassin | Effondrement/Affaissement | Dissolution | | | |
| 68 | Rue Etienne Fajon | Villetaneuse | 93 | Juillet/Octobre 2004 | Gypse | karst nu | | canalisation enterrée | Effondrement/Affaissement | Dissolution | 2004 | | |
| 69 | Quartier Rougemont et Perrin | Sevran | 93 | 01/05/1974 | Gypse | Karst sous couverture | | pompage | Effondrement/Affaissement/Tassement | Dissolution | 1974 | | |
| 70 | Oudan | Oudan | 58 | 2009-2010 | Calcaire | Karst sous couverture | Ecoulements d'eau de pluie d'une gouttière d'un bâtiment | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2009 | 0.7 | 5 |
| 71 | Polaincourt-et-Clairefontaine | Polaincourt-et-Clairefontaine | 70 | 17/07/2015 | Gypse | karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2011 | 4 | 12 |
| 72 | 1 rue de la petite voie | Bougey | 70 | 15/12/2011 | Calcaire | Karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Débourrage | 2011 | 3.5 | 3 |
| 74 | 197 rue de Pounelle | Olivet | 45 | 15/03/2016 | Calcaire | Karst sous couverture | Ecoulement d'eau favorisé par rupture canalisation | canalisation enterrée | Effondrement | Soutirage | 2016 | 5.1 | 2.1 |
| 75 | Aire du Larzac | L'Hospitalet-du-Larzac | 12 | | Calcaire | Karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2012 | 2 | 2 |
| 76 | Tunnel de la Thoraise | Thoraise | 25 | | Calcaire | Karst nu | | autre | Effondrement | Débourrage | 1855 | | |
| 77 | Terre-plein central de l'autoroute A71 | Saint-Pryvé-Saint-Mesmin | 45 | 13/11/2012 | Calcaire | Karst sous couverture | Ruissellement eaux pluviales | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2012 | 8 | 5 |
| 78 | Bassin 1298 S de l'Autoroute A89 | Eyliac | 24 | Année 2012 | Calcaire | Karst sous couverture | | bassin | Effondrement | Soutirage | 2012 | 1.5 | 0.5 |
| 80 | RD 54 | Missègre | 11 | | Calcaire | Karst sous couverture | fossés et suppression de la perte naturelle | canalisation aérienne | Effondrement | Soutirage | 2002 | | |
| 82 | 365 rue des Ormeteaux | Olivet | 45 | 01/12/2013 | Calcaire | Karst sous couverture | | ouvrage d'infiltration ponctuelle | Effondrement | Soutirage | 2013 | | |
| 85 | Bassin des Aulnais | Olivet | 45 | 01/08/2015 | Calcaire | Karst sous couverture | Bassin de collecte des eaux pluviales | bassin | Effondrement | Débourrage | 2015 | 2.5 | 1.5 |

| Réf. Fiche | Enjeu | Gravité dommages | Traitement préconisé | Investigations/Traitement réalisés | Type d'expertise | Expert intervenu | Référence |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | bassin infiltration école | Mise hors usage | travaux de reconnaissance | | Avis / Urgence | BRGM | RP-39174-FR |
| 2 | sous sol habitation + station de lavage | Possible mise en péril | comblement+réparation | | Avis / Urgence | BRGM | RP-56498-FR |
| 3 | station relèvement, route | Possible mise en péril | drainage hors zone | | Avis / Urgence | BRGM | RP-57950-FR |
| 4 | entrée de garage d'un particulier | Mise hors usage | comblement | | Avis / Urgence | BRGM | RP-53829-FR |
| 5 | remise utilisée comme chaufferie | Mise en péril | comblement + réparation + drainage eaux hors zone+ infiltration contrôlée + maintien arrêt de péril | | Avis / Urgence | BRGM | RP-54395-FR |
| 6 | route communale | Mise hors usage | comblement | | Avis / Urgence | BRGM | RP-50076-FR |
| 7 | bassin + AEP liés à la bétoire | Mise hors usage | infiltration stoppé + traitement de tous les effluents | | Avis / Urgence | BRGM | RP-58294-FR |
| 8 | AEP, installations | Mise en péril | déplacer l'activité | comblement par filtre inversé | Avis / Urgence | BRGM | RP-61171-FR |
| 9 | bassin de STEP + AEP liées à la bétoire | Mise hors usage | comblement + drainage des eaux hors zone | | Avis / Urgence | BRGM | RP-59779-FR |
| 10 | route communale | Mise hors usage | réparation / comblement | | Avis / Urgence | BRGM | RP-57881-FR |
| 11 | piézomètre | Mise hors usage | comblement | comblement | Remise en état | CEBTP | dossier VRN.7.0109 |
| 12 | constructions | Possible mise en péril | comblement, réparation conduites, drainage hors zone | comblement, réflexion sur la gestion du système d'assainissement | Etude complète (CEREMA) | BRGM | RP-58705-FR & RP-59426-FR |
| 13 | route communale | Possible mise en péril | Etancheification/déviation des eaux | comblement tout venant | Avis / Urgence | BRGM | RP-60137-FR |
| 16 | jardin | Pas de dommage | comblement | | Avis / Urgence | BRGM | RP-51261-FR |
| 17 | jardin | Pas de dommage | sondages | | Avis / Urgence | BRGM | RP-50453-FR |
| 18 | jardin | Non précisé | | comblement | Avis / Urgence | BRGM | RP-50455-FR |
| 19 | route départementale | Possible mise en péril | canalisation de l'écoulement | | Avis / Urgence | BRGM | note technique Ppannet |
| 20 | route & constructions | Ruine | étude à grande échelle | | Avis / Urgence | BRGM | RP-57534-FR |
| 21 | route communale | Mise hors usage | comblement par filtre inversé et étanchement fossé drainage | | Avis / Urgence | BRGM | RP-63635-FR |
| 22 | bassin | Possible mise hors usage | | étanchéification + comblement | Constat ? | Agglo Le Havre | |
| 23 | bassin | Possible mise hors usage | | | Remise en état | Agglo Le Havre | |
| 24 | bassin | Non précisé | | | Constat ? | Agglo Le Havre | |
| 25 | fossé | Mise hors usage | | | Constat ? | Agglo Le Havre | |
| 26 | bassin | Mise hors usage | | | Constat ? | BRGM | |
| 27 | bassin | Mise hors usage | | Comblement + étanchéification | Etude site | Hydrogéotechnique | dossier C/ME/10/K/341bis/L/199-ind2 |
| 28 | bassin | Mise hors usage | | | Remise en état | Agglo Rouen | |
| 29 | bassin | Mise hors usage | | | Remise en état | Agglo Rouen | |
| 30 | | Mise hors usage | | | Etude site | Hydrogéotechnique | |
| 31 | route + maison | Mise en péril | évacuation maison + intervention BE | comblement | Avis / Urgence | BRGM | RP-60060-FR |
| 33 | digue | Mise hors usage | béton de blocage, remblaiment limons, étanchement, drainage hors zone | béton de blocage, remblaiment limons, étanchement, drainage hors zone | Etude site & Remise en état | Hydrogéotechnique | rapport hydrogéotechnique (CommComm Caux) |
| 34 | | Mise hors usage | purge puis remblai, géotextile puis pose d'une membrane | purge puis remblai, géotextile puis pose d'une membrane | Etude site | IMSRN | rapport IMS-RN (ComCom Caux) |
| 35 | digue | Mise hors usage | traitement curatif puis étanchéification du bassin par géomembrane | traitement curatif puis étanchéification du bassin par géomembrane | Etude site | Hydrogéotechnique | rapport hydrogéotechnique (CommComm Caux) |
| 36 | | Mise hors usage | décapage puis comblement par argile compactée et géotextile de renforcement, étanchéifi | non réalisé | Etude site | IMSRN | rapport IMS-RN (ComCom Caux) |
| 37 | Bassin de | Mise hors usage | drainage des eaux hors zone ou étude complémentaire | | Avis / Urgence | BRGM | RP-61660-FR |
| 38 | Néant | Pas de dommage | Comblement par des matériaux du type concassé calcaire | étude complémentaire & surveillance | Etude site & Avis / Urgence | BRGM & CEBTP | RP-62630-FR |
| 39 | route départementale | Mise hors usage | | soutènement de la RD par palplanches | Etude site | Hydrogéotechnique | rapport géotec hydrogéotechnique Est |
| 40 | route départementale | Mise hors usage | comblement par béton et matériaux drainants | comblement par béton et matériaux drainants | Exploration | Spéléologues | rapport CDS Doubs |
| 41 | route départementale | Mise hors usage | comblement par béton et imperméabilisation du fossé | comblement par béton et imperméabilisation du fossé | Avis / Urgence | CD25 | rapport de visite CG25 |
| 42 | | Mise hors usage | comblement | comblement | Avis / Urgence & Remise en état | BRGM | RP-60727-FR |
| 43 | habitations et route départementale | Mise en péril | maitrise des eaux, schéma d'assainissement | canalisation des eaux et rejet en aval du village | Etude complète | BRGM | RP-56955-FR |
| 44 | | Cas multiples | Comblement avec cheminée pour échappement de l'air | | Etude complète | Calligee | Mondain & Boulay (2013) |
| 45 | bassin | Mise hors usage | renforcement et étanchement du bassin par pose d'un géotextile et membrane imperméable | | Avis / Urgence | CETE | Rapport CETE (A Quiniou DDT 76) |
| 46 | bassin | Mise hors usage | purge, comblement, étanchéification | sondages | Etude site | CETE | Rapport CETE (A Quiniou DDT 76) |
| 47 | future LGV | Mise hors usage | | diagnostic karstologique complet | Etude complète | CENOTE | Camus (2010) |
| 48 | aucun | Mise hors usage | | nouvelle dérivation permettant de dévier une partie du cours d'eau | Exploration | Spéléologues | GIPEK T5 |
| 49 | Batiments | Possible mise en péril | maitrise des eaux, schéma d'assainissement | comblements tout venant | Avis / Urgence | BRGM | RP-60031-FR |
| 50 | néant | Mise hors usage | arrêt des rejets | | Avis / Urgence | BRGM | RP-63880-FR |
| 51 | étang | Mise hors usage | etancheification | comblement tout venant | Avis / Urgence | BRGM | RP-63669-FR |
| 52 | canal; constructions, route | Mise en péril | sécurisation, études complémentaires | renforcement des fondations du canal à plusieurs reprises (pieux) | Etude complète | BRGM | RP-64129-FR |
| 53 | | Possible mise hors usage | transport eaux pluviales hors zone | investigations géophysique et hydrogéologique | Etude site | CEBTP | Muet (2008) |
| 54 | voirie | Mise hors usage | | | CatNat | BRGM | RP-64957-FR |
| 55 | aucun | Pas de dommage | étude géotechnique | | Avis / Urgence | BRGM | RP-61376-FR |
| 56 | lotissement (évacuation) | Victime(s) | | expertise, interdiction d'accès, étude géophysique | Etude complète | CEREMA | Clément 2014 |
| 57 | infrastructures s.l. | Cas multiples | | cartographie d'aléa | Etude complète | Toulemont | Toulemont 1987 |
| 58 | route nationale RN21 (fermeture) | Mise hors usage | purge, comblement, réparation conduites, étanchéification | purge, comblement et réparation conduites | Etude complète | CEREMA | Clément et Gardet 2012 |
| 59 | perte d'eau d'irrigation | Possible mise en péril | Comblement et rétablissement de la continuité hydraulique du fossé | effondrements non traités à ce jour | Etude complète | CEREMA | Clément 2014 |
| 60 | bâti | Cas multiples | gestion eaux pluviales, confortement du bâti, normes pour nouvelles constructions | géophysique, sondages géotechniques | Etude complète | BRGM | RP-60536-FR |
| 61 | chaussée, bâti | Mise hors usage | | comblement béton (300 tonnes), PPR effondrement colline de Cimiez (CETE) | Devis | BRGM | information direction régionale BRGM-PACA |
| 62 | route départementale | Possible mise en péril | aucun | | Avis / Urgence ? | BRGM | |
| 63 | | Possible mise hors usage | | | Exploration | Spéléologues | GIPEK T5 |
| 64 | | Mise hors usage | | | Exploration | Spéléologues | GIPEK T5 |
| 65 | | Mise hors usage | | | Exploration | Spéléologues | GIPEK T5 |
| 66 | route nationale RN4 | Mise hors usage | | comblement | Etude site | Jaillet | thèse Jaillet |
| 67 | Route nationale RN3 | Mise hors usage | Comblement et étanchéité | Diagnostic géotechnique | Etude site | CEREMA | |
| 68 | RD24, piles de l'ouvrage d'art, réseau d'assainissement | Mise hors usage | Comblement, injection & réfection du réseau d'assinissement | Comblement des vides karstiques et traitements des sols par injections comprimées | Etude complète | CEREMA | |
| 69 | Habitations/Constructions, chaussées (ouvrages enterrés) | Cas multiples | - | | Etude complète | CEREMA | |
| 70 | Bâtiments d'habitation | Mise en péril | Evacuation des habitations et établissement d'un PPR | Absence d'information sur le traitement réalisé | Etude complète | BRGM & CEREMA | Rapports CEREMA & BRGM |
| 71 | Bassin de traitement des eaux | Possible mise hors usage | Non renseigné | Reprofilage du bassin (comblement avec de gros blocs ?) | Etude site | CEREMA | |
| 72 | | Mise hors usage | Rebouchage du trou à l'aide de gros blocs (pas de déchets ni ciment) | Absence d'information sur le traitement réalisé | Avis / Urgence | BRGM | RP-60727-FR |
| 74 | Maisons et mur d'enceinte à proximité | Mise hors usage | Réalisation d'un bouchon de fond en béton, réfection réseau, remplissage jusqu'en surface | NC (mais traitement préconisé) | Avis / Urgence & remise en état | CEREMA | |
| 75 | route, autoroute | Mise hors usage | | | incomplet | CEREMA | |
| 76 | tunnel | Possible mise hors usage | | | Etude site & Remise en état | EGIS | |
| 77 | Chaussée d'autoroute (impactée par l'effondrement) | Mise hors usage | Mise en place d'une couche de matériaux drainants dans le fond de la cavité, comblement | NC (mais traitement préconisé) | Etude site & Remise en état | CEBTP | Rapport expertise CEBTP |
| 78 | Bassin de collecte des eaux | Mise hors usage | Etanchéification du bassin et comblement avec de gros blocs | Comblement à l'aide de gros blocs et de tout venant sans étanchéification | Etude site & Remise en état | CEBTP | Rapport CEBTP |
| 80 | Route (RD54) | Mise hors usage | Etanchéification, création perte forcée, réouverture perte naturelle, etc. | Comblement | Etude complète | BRGM | RP-52843-FR |
| 82 | Bâtiment | Possible mise en péril | Comblement | Sondages et comblement | Etude site | CEBTP | Rapport CEBTP |
| 85 | Bassin | Possible mise hors usage | Traitements préconisés largement développé dans le rapport (détenu par Mr G. Pensuet - C | Selon le chargé d'affaire, pas de traitement réalisé | Etude site | CEBTP | Rapport CEBTP |

# Annexe 3

# Préconisations pour l'aménagement des bétoires 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.

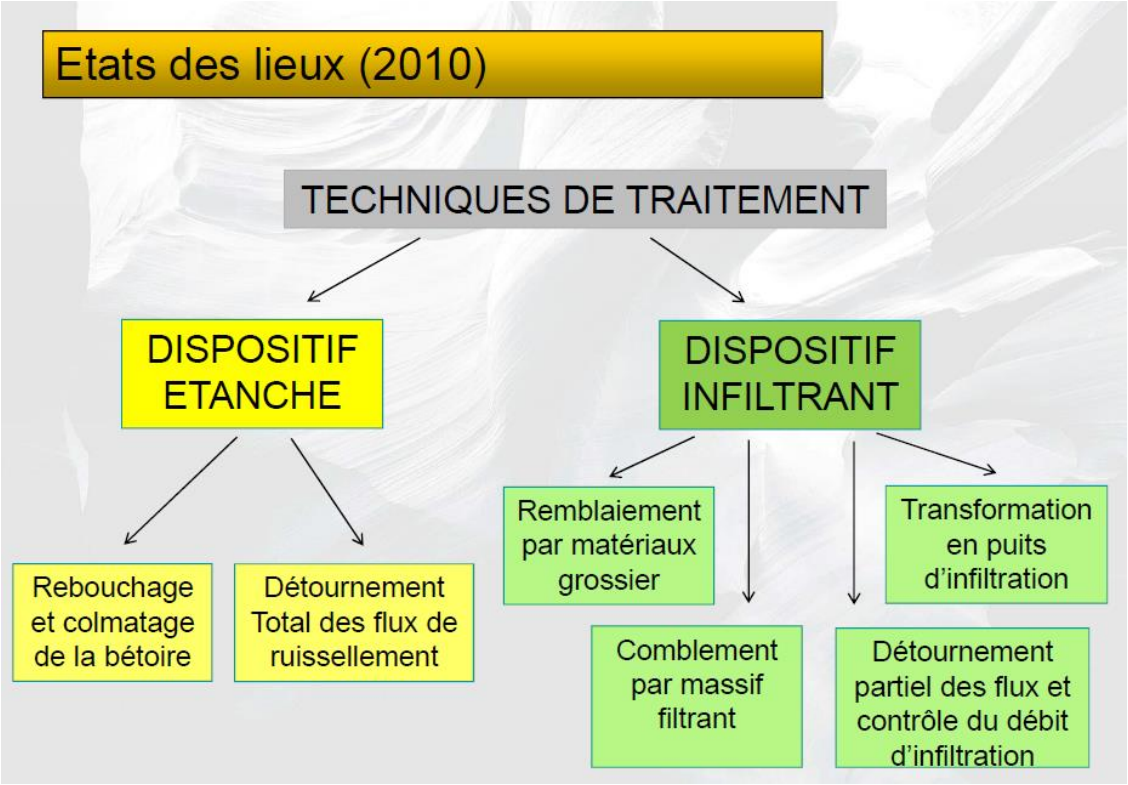
L'ouverture d'une bétoire directement sous une infrastructure existante exige une étude géotechnique approfondie de l'ensemble de la structure (notamment si elles concernent un bâtiment ou un barrage). L'aménagement de la bétoire n'est plus à l'ordre du jour. S'il s'agit d'un nouveau projet, l'idéal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


Etats des lieux (2010)
TECHNIQUES DE TRAITEMENT
DISPOSITIF ETANCHE
DISPOSITIF INFILTRANT
Rebouchage et colmatage de la bétoire
Détournement Total des flux de ruissellement
Remblaiement par matériaux grossier
Comblement par massif filtrant
Détournement partiel des flux et contrôle du débit d'infiltration
Transformation en puits d'infiltration

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