



Les journées d'échanges techniques

#connaître #partager #accompagner

«Mouvements de terrain en milieu karstique : processus, méthodes et études de cas »

08 juin 2021

Partenaires techniques et financiers du Pôle Karst :





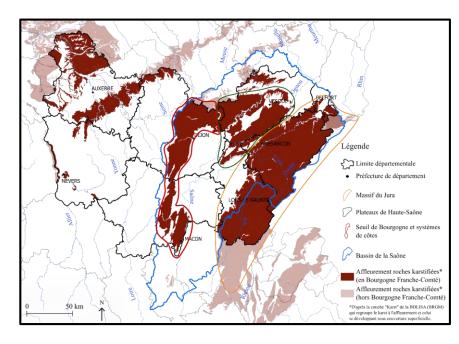






Un mot d'introduction sur le Pôle Karst de l'EPTB Saône et Doubs

Le Pôle Karst de l'EPTB Saône et Doubs poursuit, depuis 2017, des actions qui favorisent échanges et partage sur les problématiques associées aux milieux et rivières karstiques de Bourgogne Franche-Comté et plus spécifiquement du massif du Jura.



Trois axes de travail







Un mot d'introduction sur le BRGM

27 implantations en France métropolitaine et en Outre-mer

Le BRGM, service géologique national, est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) créé en 1959.

6 grands enjeux sociétaux structurent l'activité du BRGM.

Son action est orientée vers la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques et la coopération internationale.

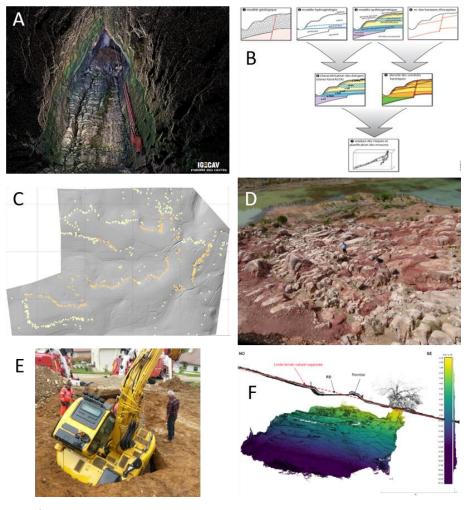
1077

personnes travaillent au BRGM dont plus de 700 ingénieurs et chercheurs

www.brgm.fr



Objectifs de la journée



 Processus et méthodes des risques mouvement de terrain d'origine karstique

 Illustration avec un certain nombre d'exemples régionaux et (inter)nationaux

LÉGENDE : QUELQUES FACETTES DES MOUVEMENTS DE TERRAIN EN CONTEXTE KARSTIQUE A. Modèle numérique 3D d'une cavité – IGECAV

B. Méthode multicritères KarstALEA – ISSKA

C. Dolines relevées sur le terrain (orange) et détectées grâce à l'imagerie LiDAR (jaune) – LOTERR D. Karstogénèse : exemple de crypto-altération - BRGM

E. Effondrement d'une cavité par soutirage sur un chantier de construction de maison individuelle – BRGM F. Présence d'une cavité à l'aplomb d'une route départementale – CD25

Programme de la journée

10h00-10h15 Pause
10h15-11h00 Nouvelle méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain d'origine

9h15-10h00 Le karst : processus de formation et formes associées (Églantine Husson, BRGM) pp 6-24

9h00-9h15 Accueil des participants sur la plateforme/présentation de la journée pp 1-5

karstique (*Sylvain Haussard, CEREMA*; *Gildas Noury, BRGM*) **pp 25-56**11h00-11h45 Diagnostic et cartographie de réseaux karstiques dans le contexte de la LGV Rhin-Rhône (*Thomas Richard et Gaël Gouillon, IGECAV*) **pp 57-84**

12h00-14h00 Pause de midi 14h00-14h45 Dimensions réglementaires associées aux risques naturels d'origine karstique et

aménagement du territoire / exemples en BFC (*Fabienne Perrigouard, DDT25 ; Nejema Zergaoui, CEREMA*) **pp 85-114**14h45-15h30 Méthode KarstALEA : prévision des dangers liés au karst lors de travaux

<u>15h30 – 15h45</u> Pause

15h45-16h30 Apport du LIDAR dans la compréhension des désordres karstiques (cas du Barrois, Meuse) (*Kamila Bensaadi, LOTERR/Université de Lorraine*) **pp 154-181**

16h30-17h15 Phénomènes karstiques, quelques exemples impactant les infrastructures routières du Département du Doubs (*Mathieu Liniger, Conseil Départemental du Doubs*) **pp 182- 243**

souterrains (Arnauld Malard, ISSKA) pp 115-153



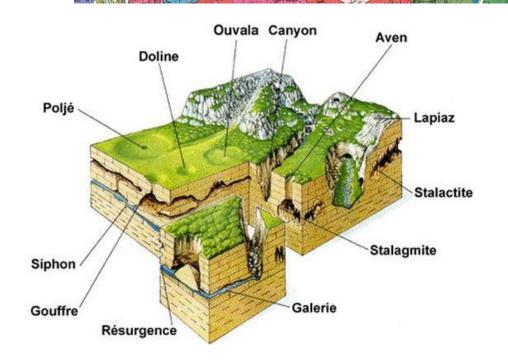
KARST = mot allemand dérivé du mot « Kras » (slovène) -> région des Alpes dinariques



« Karst » : termes & définitions

KARST = vision géographique et hydrogéologique

⇒ « paysage comprenant des formes situées à la surface (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et d'autres souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associées à un régime hydrologique spécifique, résultant de la dissolution des roches »

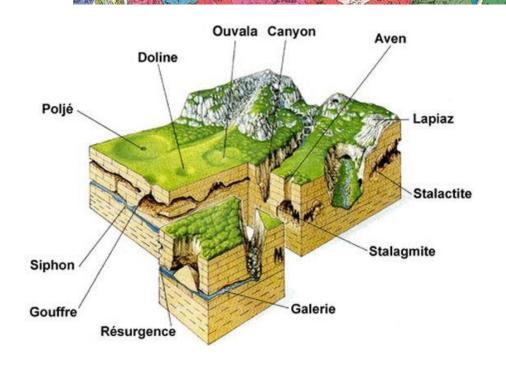




« Karst »: termes & définitions

KARST = vision géographique et hydrogéologique

⇒ « paysage comprenant des formes situées à la surface (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et d'autres souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associées à un régime hydrologique spécifique, résultant de la dissolution des roches »





- Karst « vrai » -> roches carbonatées (calcaire, dolomie, craie...)
- « Parakarst » -> les évaporites, grès, quartzites, conglomérats... gabbros, granites, gneiss...
- « Pseudokarst » -> volcanique (tunnel de lave), glacier, cryokarst (fonte)...



« Karst »: termes & définitions

KARST = vision géographique et hydrogéologique

 \Rightarrow « paysage comprenant des formes situées à la surface (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et d'autres souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associées à un régime hydrologique spécifique, résultant de la dissolution des roches »

Exokarst Epikarst Zone Endokarst ⊢d'infiltration Zone Épi-noyée Zone noyée Camus, 2003

Points d'infiltration

Conduit karstique

Bassin versant «Matrice»

Zone de concentration des eaux

Zone vadose (non saturée)

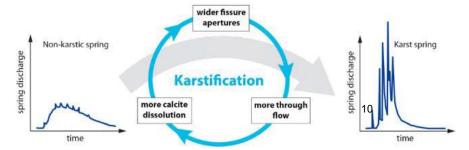
Zone phréatique (zone saturée)

Jouves, 2018

Systèmes karstiques : aquifères organisés

- verticalement -> zonation verticale
- latéralement -> réseau drainage
- réponse hydro fonction du degré d'évolution de ces systèmes

Hartmann et al. (2014).



Mouvements de terrain en milieu karstique : vides souterrains.

Problématique : comment localiser les vides vs la surface? Leur taille? Leur forme? Leur évolution?...

Objectifs Risque: prévoir/anticiper

-> COMPRENDRE

Approche karstologique : utilisée de plus en plus dans la prévision/gestion des risques

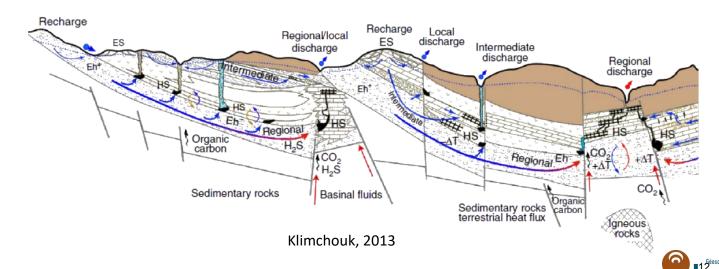
- ⇒ **Karstologie :** science pluridisciplinaire qui étudie la **karstogenèse** (genèse des karsts dans leur ensemble et leur évolution dans le temps)
- ⇒ La spéléogenèse applique les concepts de karstologie -> Discipline qui étudie la genèse des drains karstiques

⇒ Qu'est-ce qui contrôle le développement des drains karstiques?



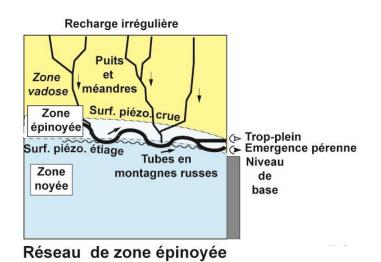
Comment se développe les drains karstiques ? Quels sont les facteurs?

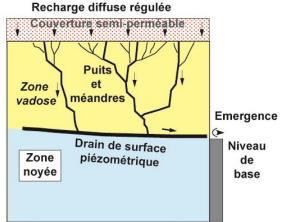
- Conditions préalables ->
 composition initiale de la roche (minéralogie, pureté, perméabilité...)
 discontinuités -> fracturation, architecture sédimentologique (joint stratigraphique, discordance...)
- Paramètres fluctuants
 L'origine de l'eau : épigène vs hypogène



Comment se développe les drains karstiques ? Quels sont les facteurs?

- Conditions préalables ->
 composition initiale de la roche (minéralogie, pureté, perméabilité...)
 discontinuités -> fracturation, architecture sédimentologique (joint stratigraphique, discordance...)
- Paramètres fluctuants
 L'origine de l'eau : épigène vs hypogène
 L'hydrodynamisme (type de recharge)



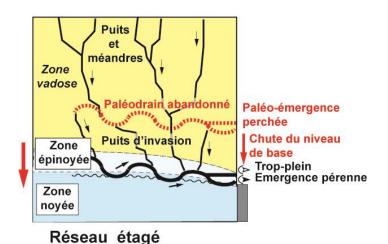


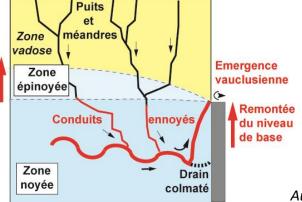
Audra et Palmer, 2013



Comment se développe les drains karstiques ? Quels sont les facteurs?

- Conditions préalables ->
 composition initiale de la roche (minéralogie, pureté, perméabilité...)
 discontinuités -> fracturation, architecture sédimentologique (joint stratigraphique, discordance...)
- Paramètres fluctuants
 L'origine de l'eau : épigène vs hypogène
 L'hydrodynamisme (type de recharge)
 Le niveau de base





Réseau ennoyé

Comment se développe les drains karstiques ? Quels sont les facteurs?

Conditions préalables ->
 composition initiale de la roche (minéralogie, pureté, perméabilité...)
 discontinuités -> fracturation, architecture sédimentologique (joint stratigraphique, discordance...)

- L'origine de l'eau : épigène vs hypogène L'hydrodynamisme (type de recharge)
 - Le niveau de base

Paramètres fluctuants

 \circ

Le temps -> polyphasage/héritage karstique



Comment se développe les drains karstiques ? Quels sont les facteurs?

- Conditions préalables ->
 composition initiale de la roche (minéralogie, pureté, perméabilité...)
 discontinuités -> fracturation, architecture sédimentologique (joint stratigraphique, discordance...)
- Paramètres fluctuants
 L'origine de l'eau : épigène vs hypogène
 L'hydrodynamisme (type de recharge)
 Le niveau de base
 Le temps -> polyphasage/héritage karstique

Le processus de karstogenèse/spéléogenèse
 La corrosion sur roche nue
 La cryptokarstification
 La fantômisation

Le contexte géologique Le climat La géodynamique



« Le triptyque de la karstification » (Quinif, 1999)

La corrosion sur roche nue

Définition : processus de dissolution + érosion mécanique avec évacuation directe du matériel dissous et des résidus et qui permet d'aboutir aux formes sur roches nues, en surface ou dans l'endokarst.

Formes de corrosion : lapiaz, canyon, grottes...

Karstification *per descendum*: karst gravitaire.

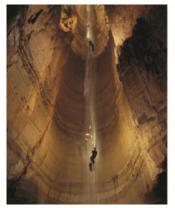
Karstification per ascensum : puit-cheminée

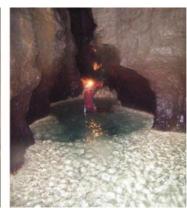
Contextes épigène ou hypogène (CO₂ ou H₂S).



Il s'agit de formes se développant à l'échelle de **plusieurs** dizaines de milliers d'années (*Palmer*, 1991 ; *Dreybrodt* et Siemers, 2000).









« Le triptyque de la karstification » (Quinif, 1999)

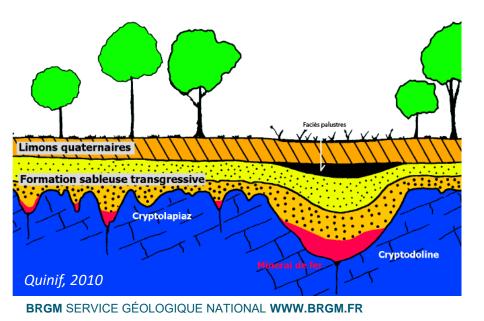
La cryptokarstification

Définition: Processus d'altération sous couvertures. Ces couvertures sont perméables (à semi-perméables), non karstifiable

-> d'origine pédologique, détritique ou alluviale (*Nicod,* 1975) riche en minéraux siliceux, sulfureux ou sulfatés. Formes sous couverture : pinacle (ruiniforme), doline, crypto-lapiaz, karst d'interface...









« Le triptyque de la karstification » (Quinif, 1999)

La cryptokarstification

Définition : Processus d'altération sous couvertures. Ces couvertures sont perméables (à semi-perméables), non karstifiable

-> d'origine pédologique, détritique ou alluviale (*Nicod*, 1975) riche en minéraux siliceux, sulfureux ou sulfatés.

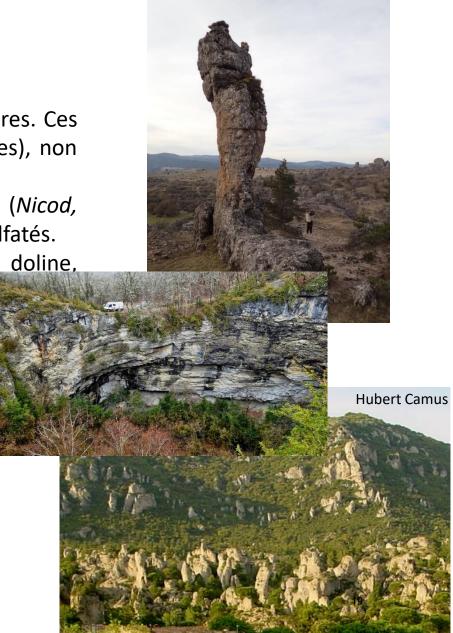
Formes sous couverture : pinacle (ruiniforme), doline,

crypto-lapiaz, karst d'interface...



L'échelle de temps pour former un karst sous couverture évolue d'une centaine de milliers d'années à plusieurs millions d'années.

(*Quinif, 1999*) brom service géologique national **www.brom.fr**



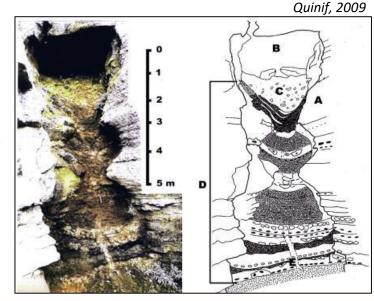
« Le triptyque de la karstification » (Quinif, 1999)

La fantômisation

Définition: Processus d'altération profonde. Les produits de l'altération (solubles) sont évacués en solution, par circulation lente des eaux ou diffusion ionique. Les résidus (insolubles) restés sur place constitue des altérites conservant la structure et la texture initiale de la roche.

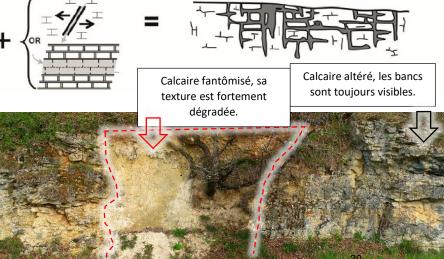
-> Processus associé aux crypto-altérations en surface ou des remontées de fluides hypogènes. Energie chimique Conditions initiales

Dubois et al., 2014



Karstification par fantômisation





BRGM SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL WWW.BRGM.FR

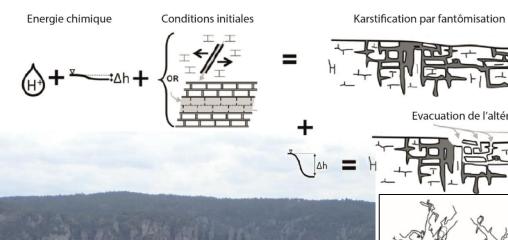
« Le triptyque de la karstification » (Quinif, 1999)

La fantômisation

Lors de la chute du niveau de base : exondation du massif. Tassement altérite : formation d'un pseudokarst -> gradient hydraulique évacue l'altérite par érosion régressive.

Formes: pseudo-endokarsts, réseaux labyrinthiques et en baïonnette.

L'établissement de tels systèmes nécessite de longues périodes de temps de l'ordre de plusieurs millions d'années et des conditions géodynamiques stables (Dubois et al., 2014).



Dubois et al., 2014

Evacuation de l'altérite

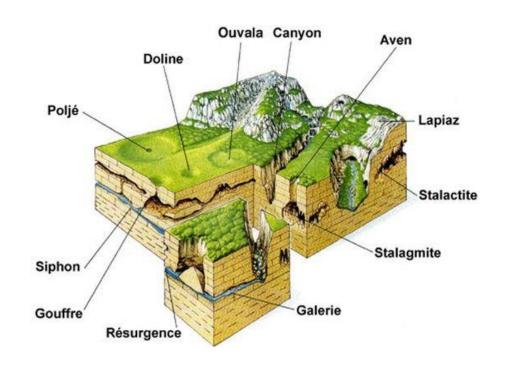
Topo de la grotte de Bramabiau

And so what?

KARST = vision géographique et hydrogéologique

 ⇒ « paysage comprenant des formes situées à la surface (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et d'autres souterraines (grotte,

galeries, réseaux...) associées à un régime hydrologique spécifique, résultant de la dissolution des roches »



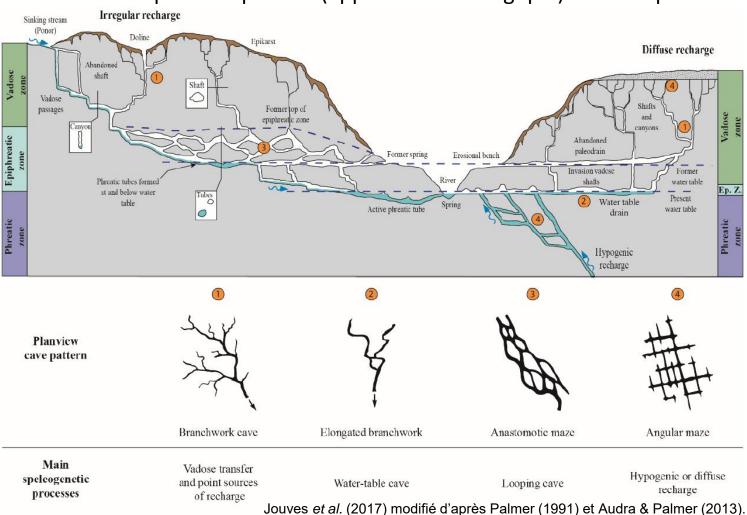
Issus de différents processus de karstification => conditions géologiques et paléogéographiques, hydrologiques, paléohydrologiques

Conceptualiser le karst = prendre en compte l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques, morpho-karstiques, ect...



And so what?

KARST = vision pluridisciplinaire (approche karstologique) -> Conceptualiser & Spatialiser













Cadre général

L'aléa mouvements de terrain liés aux cavités

Documents techniques pour la gestion (ex. PPR, Gypse, etc.). Jusque-là, pas de guide concernant le karst.

Le karst en France

40 % du territoire concerné par des roches carbonatées.

Cadre du guide

Direction Générale de la Prévention des Risques (Ministère en charge de l'Environnement) / BRGM – CEREMA.

À destination des donneurs d'ordres et des bureaux d'études.

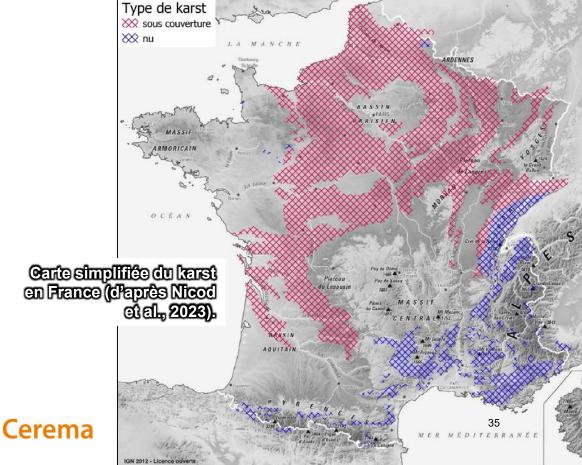
Carte d'aléa de type porté à connaissance, voire PPR.

Pour des études, (infra-) communales à pluricommunales, avec une échelle de rendu: 1/23 000 à 1/5 000... voire 1/50 000.













Définition des systèmes karstiques

Généralités

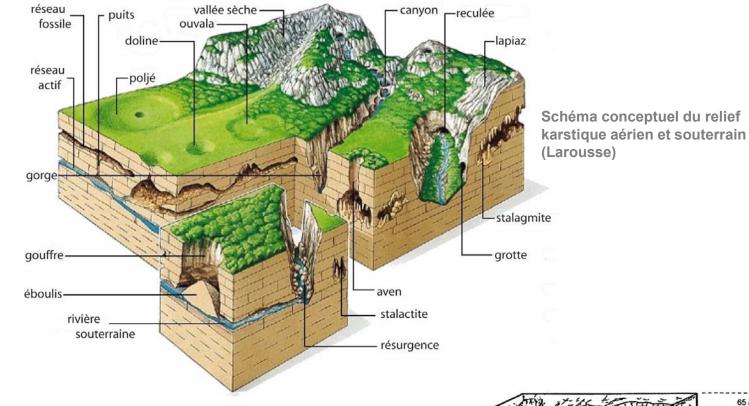
Un paysage avec des formes souterraines et des formes en surface.

issu de la dissolution de roches karstifiables et associé à un régime hydrologique spécifique.

Facteurs contrôlant la karstification

Des paramètres passifs (chimie, texture et structure) et des paramètres fluctuants (eau, climat, etc.)

→ Voir présentation précédente de E. Husson

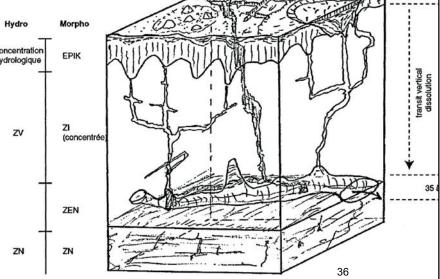


- Distribution spatiale des processus et des morphologies endokarstiques
- définitions hydrodynamiques : ZV = zone vadose ; ZN = zone noyée (saturée)
- définitions morphologiques : EPIK = épikarst ; ZI : zone d'écoulements libres ;
 ZEN = zone épinoyée ; ZN = zone noyée en permanence.

(Camus, 2003)



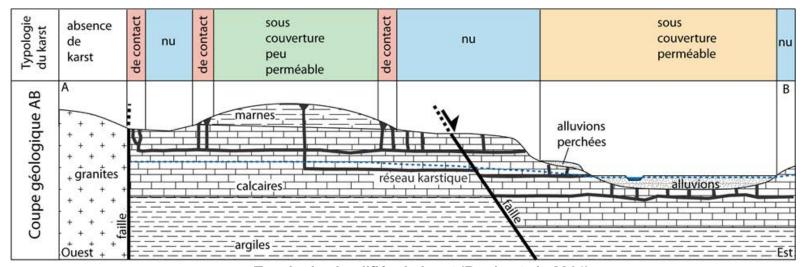




Définition des systèmes karstiques

Typologie des karsts

Pour ce guide : une classification morphologique simple



Typologie simplifiée du karst (Perrin et al., 2014)





Karst nu au Parmelan (74) et sous couverture à Orléans (45) - clichés BRGM





Typologie des mouvements

Affaissement

Effondrement Coulée de boue - Glissement - Chute de blocs

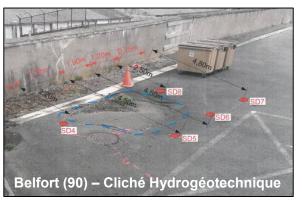
Un affaissement conduit à une dépression aux pentes peu marquées, sans rupture des terrains. Les affaissements sont considérés comme des mouvements lents, pouvant évoluer pendant plusieurs années, voire dizaines d'années, ce qui limite souvent l'observation de leur apparition et de leur évolution.

Conséquences (biens et personnes) :

- Dépendent notamment de la mise en pente
- Exemples: Bâti : risque faible à court terme

Route : risque moyen Voie ferrée : risque fort

Etc.







Orléans (45)





Travail

BRGM

Typologie des mouvements

Affaissement

Effondrement

Coulée de boue – Glissement – Chute de blocs

Un effondrement aboutit à une dépression marquée aux bords francs (cratère, fontis, perte), avec une rupture des terrains. Alors que leur maturation peut être longue, leur apparition en surface est souvent soudaine (quelques secondes à quelques heures).



Dimensions











Typologie des mouvements

Affaissement

Effondrement

Coulée de boue - Glissement - Chute de blocs

Conséquences (biens et personnes) :

- Dépendent notamment du diamètre et de la profondeur.
- Exemples : Chute

Mise hors d'usage

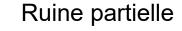
Ruine partielle

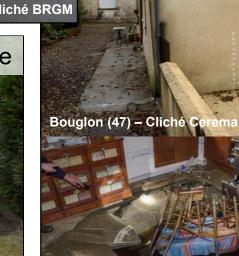
Ruine totale











Gidy (45) - Cliché BRGM





Typologie des mouvements

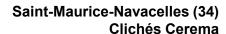
Affaissements **Effondrements**

Coulée de boue – Glissement – Chute de blocs

Dans certains cas : désordres au niveau des versants, sous la forme de glissements et/ou de coulée de boue.









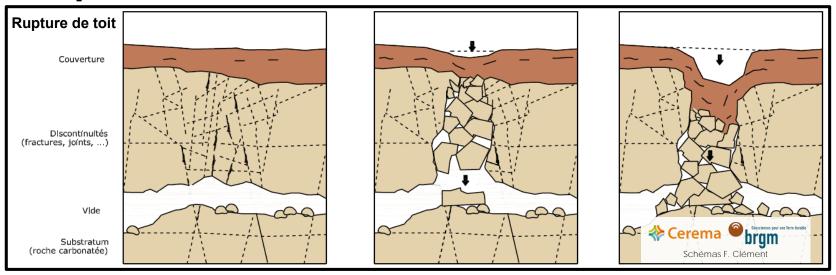


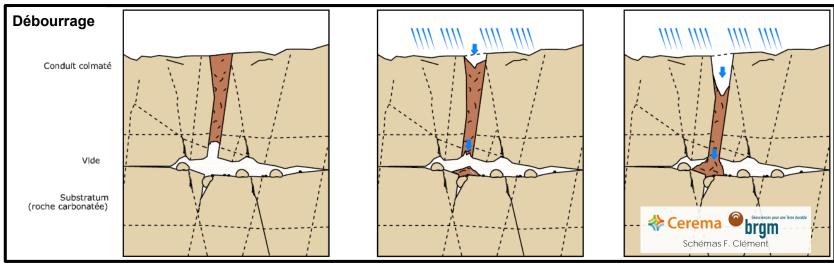


Quatre processus

Rupture de toit Débourrage

Suffosion/Soutirage de la couverture Extrusion







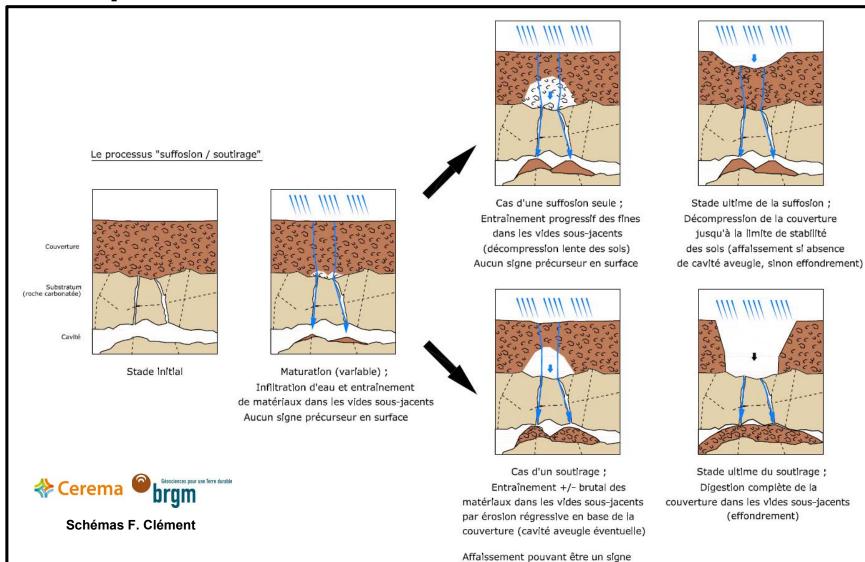


Quatre processus

Rupture de toit Débourrage

Suffosion/Soutirage de la couverture

Extrusion





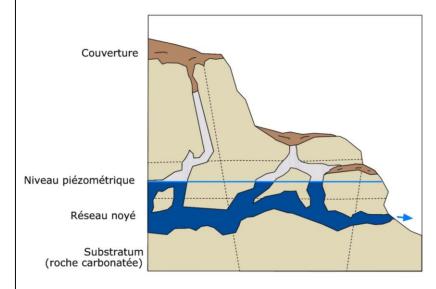


précurseur avant l'effondrement

Quatre processus

Extrusion

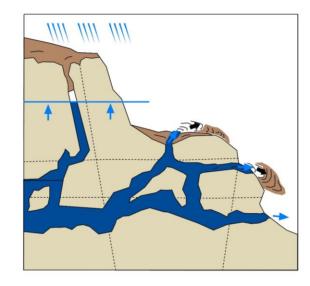
Rupture de toit Débourrage Suffosion/Soutirage de la couverture





Stade initial (exemple d'un karst couvert)

Fonctionnement courant d'une zone épinoyée avec source de décharge



Mise en charge exceptionnelle du réseau karstique (Q décharge < Q recharge)

Remaniement et évacuation vers l'extérieur des matériaux de colmatage par des sous-pressions





Exemple d'études réalisées précédemment

→ Présentation Cerema – S. Haussard







Démarche CETE / CEREMA Autun de 2001 à hier.



Initialement sous la forme de recensements

→ approche géomorphologique et systémique





#connaître #partager #accompagner

De 2001 à 2010 – Doubs, PPR MVT et Atlas MVT.

Recensement des indices et des périmètres pour les PPR Des cartes de densités d'indices pour l'Atlas MVT.

2012 – Nièvre, PPR MVT karst et suffosion

Recensement des dolines

Approche géomorphologique pour la suffosion

2012 - Doubs, PPR MVT

Recensement des indices karstiques.

2014 – Haute-Saône, carte d'aléa karstique pour un porter-à-connaissance sur 2 communes

Approche géomorphologique.

2016 – Doubs, carte d'aléa karstique

Approche géomorphologique et systémique

2018 – Saône-et-Loire, carte d'aléa karstique pour aménagement/lotissement Approche géomorphologique et systémique





#connaître #partager #accompagner

Approche géomorphologique : croisement prédisposition géologique (lithologie) et prédisposition karstique (indices karstiques).

Approche systémique : fonctionnement du karst

- → zones de karst de contact mieux prises en compte ;
- → distinction entre zones de karst actif et zones de karst fossile.





#connaître #partager #accompagner

Données utilisées :

- Bibliographie (cartes, archives, rapports d'études, ...);
- Photographies aériennes multi-dates ;
- Recueil de témoignages (réunion en Mairie);
- Terrain (avec discussions avec les habitants).

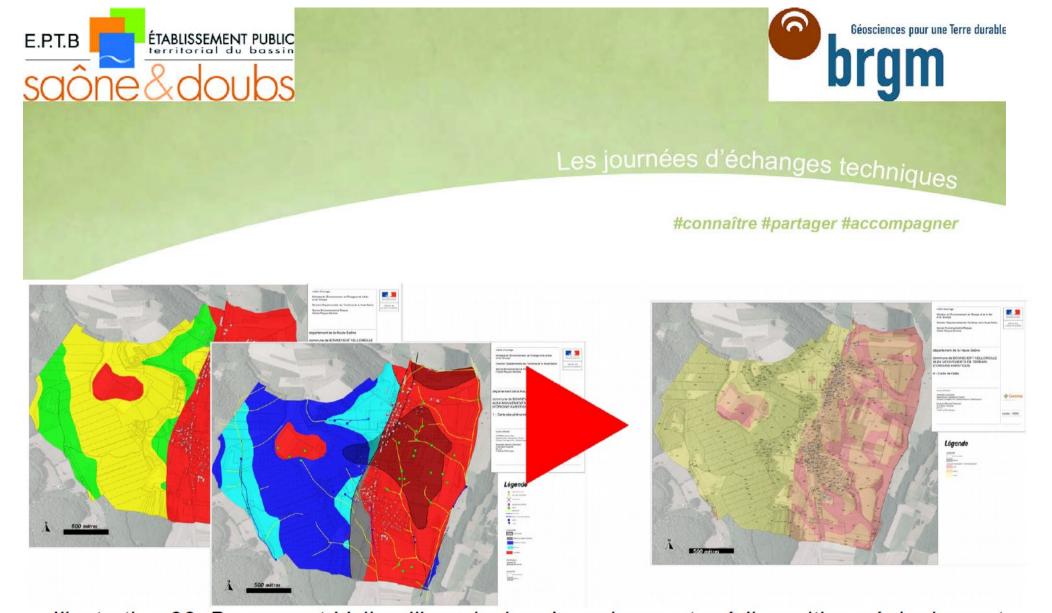


Illustration 32: Bonnevent-Velloreille, principe du croisement prédisposition géologique et prédisposition karstique.

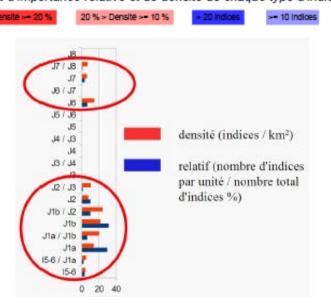
| 99 | | | gouffree | 1 | | sources | 1 | | pertes | |
|----|------------------|--------|----------------|-------------------|--------|----------------|-------------------|--------|----------------|------------------|
| ř | Denséé (Jkm²) | Absolu | Relatif (%) | Densité (/km²) | Absolu | Relatif (%) | Densité (Asm*) | Absolu | Relatif (%) | Densité (/km² |
| | - | - | | - | - | | - | - | - | - |
| | - | - | | - | - | - | - | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | | - | - | - | |



#connaître #partager #accompagner

lithologique (km²) J_{μ}/J_{μ} 0,15 0,88 $J_{\bullet}IJ_{\bullet}$ 0.15 0,78 8 0,26 0,43 J_a/J_a 0,21 J. J_{μ}/J_{μ} $J_{\underline{a}} / J_{\underline{a}}$ 0,2 2,41 J_{m}/J_{s} 0.76 50 J_{α}/J_{α} 100 1,8 50 1,4 18

Tableau 1: étude statistique non exhaustive des indices karstiques par étarl'intensité de la coloration des cases permet de visualiser l'importance de la par niveau stratigraphique. L'intensité de la couleur attribuée aux case con niveau d'importance relative et de densité de chaque type d'indice ; à savo



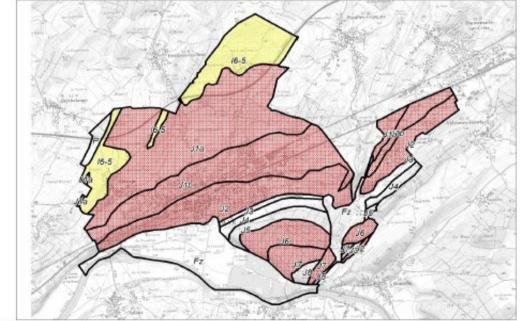


Illustration 25: Carte de prédisposition géologique (rouge : fort ; jaune : moyen ; blanc : faible et nulle)

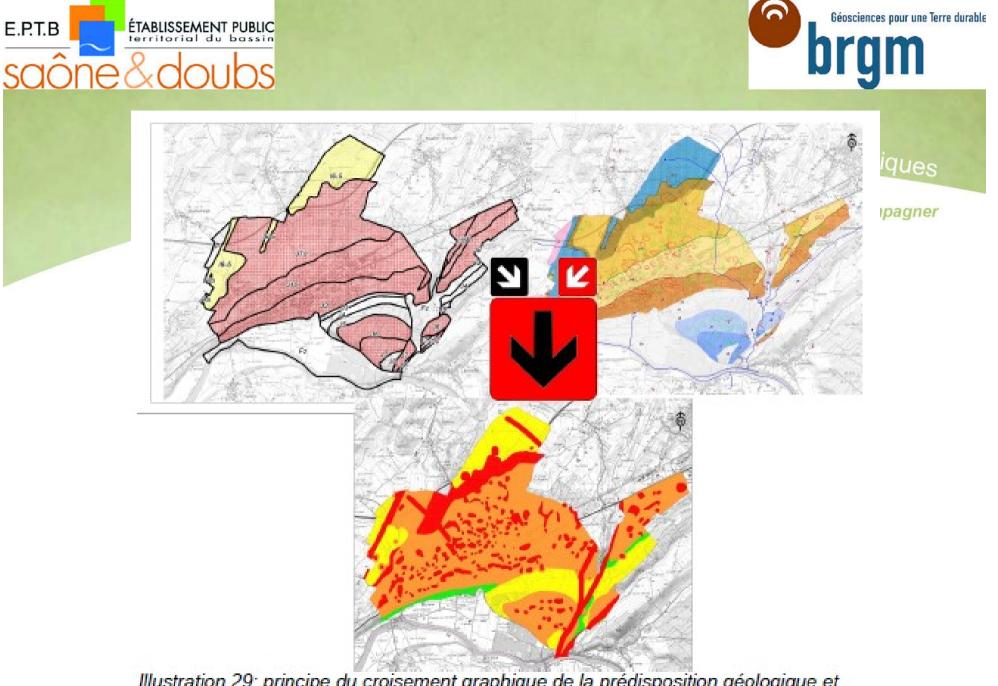


Illustration 29: principe du croisement graphique de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique





#connaître #partager #accompagner

Avantage:

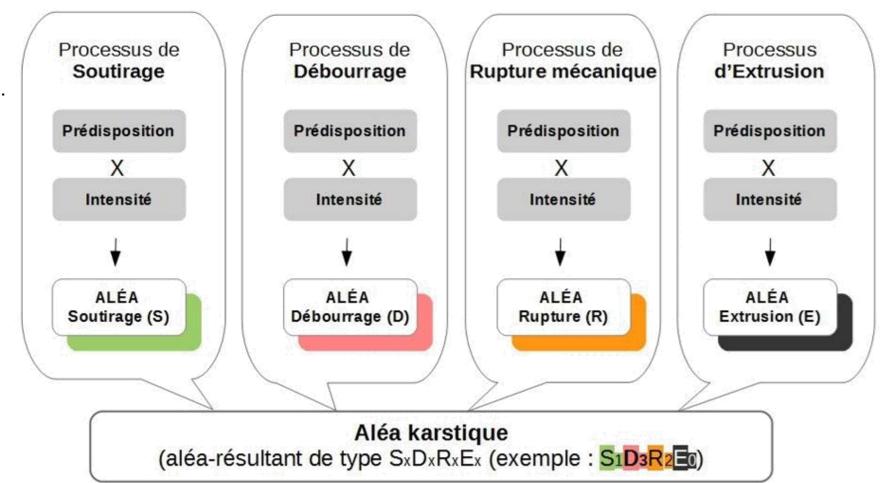
- beaucoup de terrain, exhaustivité et précision ;
- cartes fournies avec un « règlement ».

Limites:

• la méthodologie a évoluée pour être améliorée, les cartes sont donc partiellement comparables.

Principes

- 1) Caractérisation du site
- 2) Aléa = Probabilité x Intensité.
- → Pour chaque processus possible.
- → Méthode multicritères.







1a) Caractérisation – données à utiliser

Données en ligne: géo/topographie (MNT),

géologie, cavités,

mouvements de terrain,

traçages,

etc.

Documentation publique:

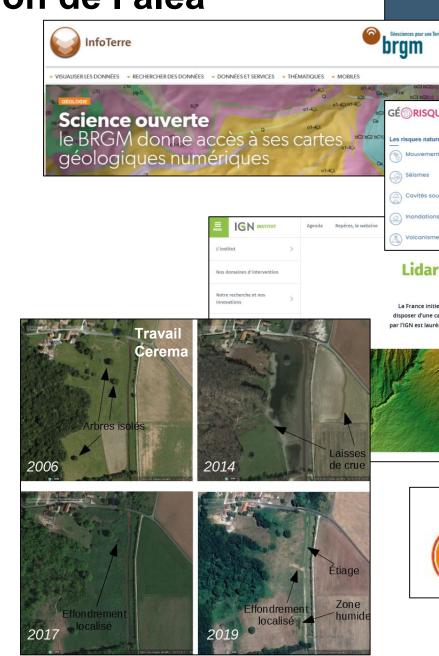
articles scientifiques, archives communales, départementales, etc.

Spécialistes : spéléologie (CDS),

karstologie (AFK), bureaux d'études.

Investigations complémentaires :

<u>Terrain</u> (surface, affl^{ts}, désordres) Si besoin : mesures spécifiques





Lidar HD : une couverture nationale d'ici à 2025

géoporta

La France initie pour la première fois un projet national de couverture Lidar naute densite (10 points /m2) ann de disposer d'une cartographie 3D très précise de la quasi-totalité de son territoire* d'ici à 2025. Le programme proposé ar l'IGN est lauréat d'un appel à projets du Fonds de transformation pour l'action publique. Il s'intègre également dans le plan de relance présenté par le Gouvernement en septembre 2020.







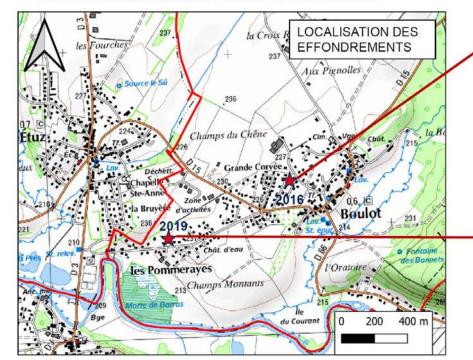
1b) Caractérisation du site d'étude

Sinistralité
Quel(s) processus en œuvre ?

Deux expertises sur Boulot en 3 ans

2016 : Effondrement au 10 rue de la Ceriseraie

2019 : Effondrement au 46 rue de la Sablière

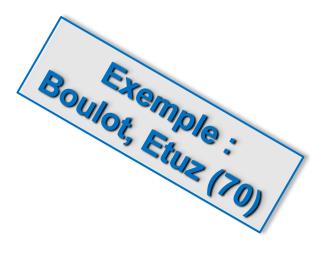


Cratère de forme rectangulaire de près de 5.80 r par 5.20 m d'une profondeur de 5 à 20 cm





Orifice circulaire de 0.7 m et 0.8 m de qui s'élargit à 2 m en profondeur pour une profondeur d'environ 2 m



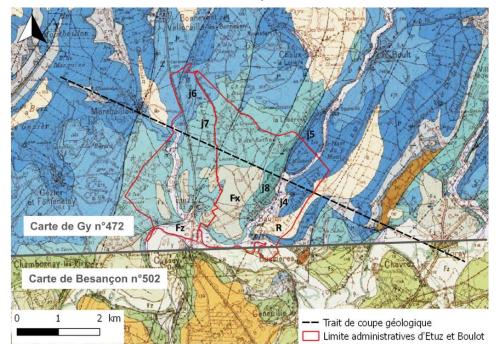
Et autres évènements :

- sur communes (archives)
- sur communes limitrophes



1b) Caractérisation du site d'étude

Cartes informatives – Coupes



Fz. Alluvions modernes. Assez bien développées dans la vallée de l'Ognon

(graviers siliceux d'origine vosgienne)

Fx. Hautes terrasses. Sables et graviers siliceux d'origine vosgienne à 20-35 m au-dessus de la plaine actuelle.

R. Argiles à chailles. La plupart des sommets dont le substratum est argovien sont recouverts par des argiles à chailles provenant d'une altération sur place (R). Ces argiles se sont bien souvent étalées par solifluxion sur les pentes voisines.

j8. Kimméridgien (70 m environ)

Kimméridgien supérieur : marnes et de marno-calcaires. Kimméridgien inférieur comprend des calcaires glauconieux et des niveaux marneux et marno-calcaires j7. Séquanien (75 à 80 m). Calcaires fins de teinte grise. Cependant, dans la partie inférieure de l'étage, on note la présence classique de marnes dans lesquelles s'intercalent des plaquettes calcaires à Astartes et de petits bancs gréseux. On note également à la base de l'étage, de rares niveaux à oolithes disséminées dans du calcaire fin.

6. Rauracien (60 m). Faciès coralligène

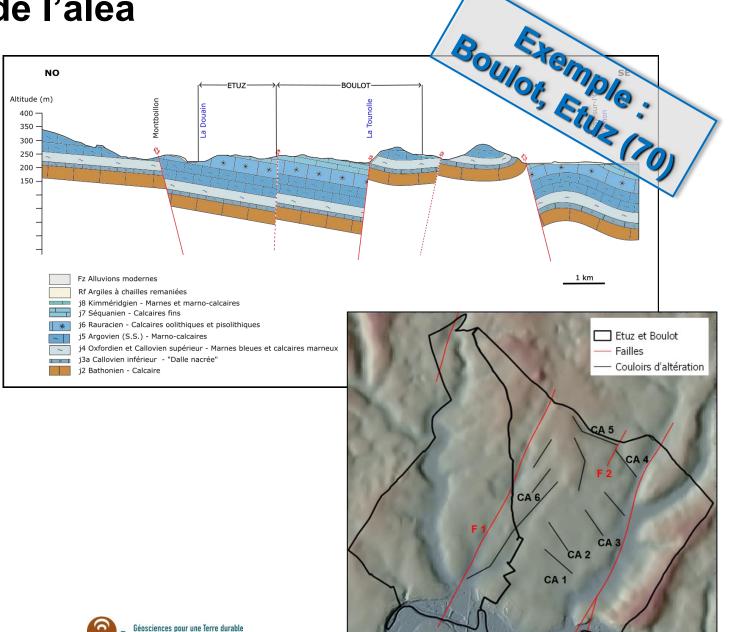
Dominance des calcaires oolithiques et pisolithiques à fragments d'organismes.

j5. Argovien s. str. (40 - 45 m)

Ensemble marno-calcaire dont les bancs les plus élevés sont à la fois les plus épais et les moins argileux. Les niveaux inférieurs, plus marneux, sont souvent soulignés par des lignes de sources.

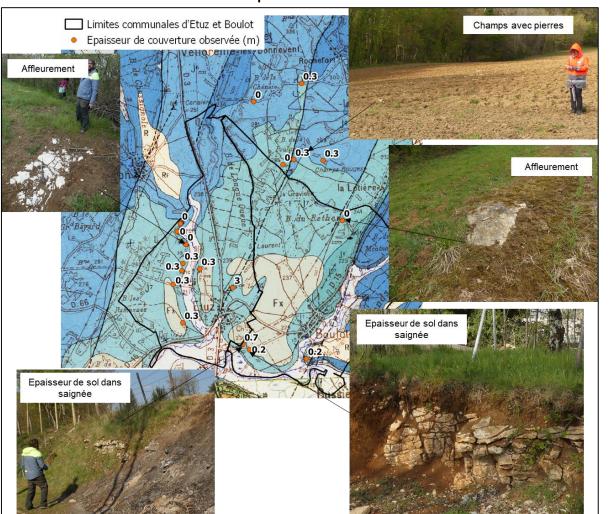
i4. Oxfordien et Callovien supérieur.

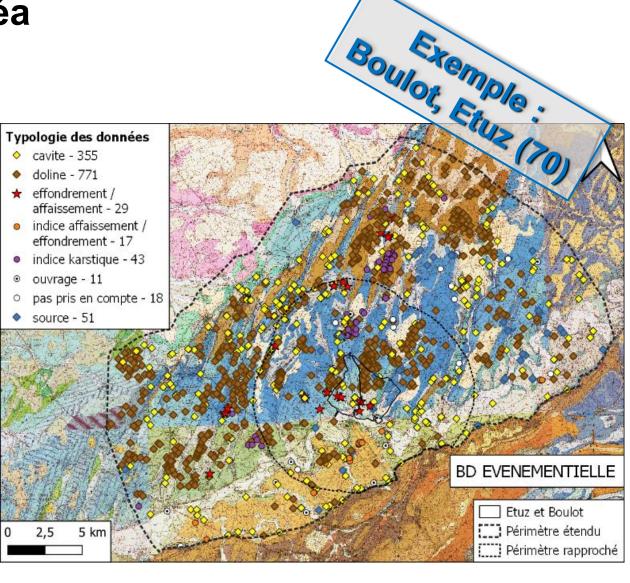
Marnes bleues oxfordiennes à fossiles pyriteux, puissantes d'environ 35 m et quelques mètres de calcaires marneux jaunes ou bruns très fossilifères, parfois à oolithes ferrugineuses, représentant le Callovien supérieur.



1b) Caractérisation du site d'étude

Cartes informatives – Coupes







2a) Aléa – Evaluation de la probabilité d'occurrence

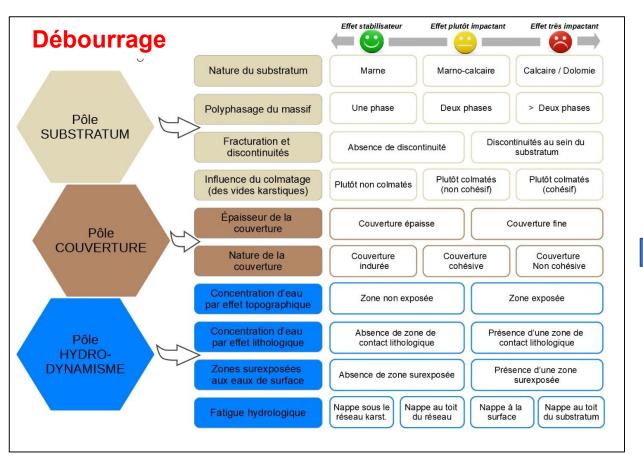
23 critères regroupés en 3 pôles



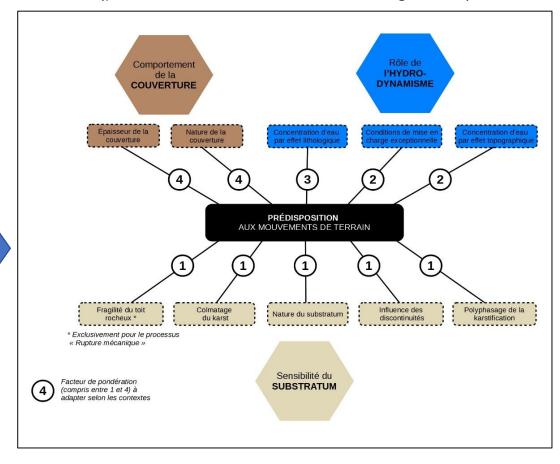


2a) Aléa – Evaluation de la probabilité d'occurrence

Notation des critères



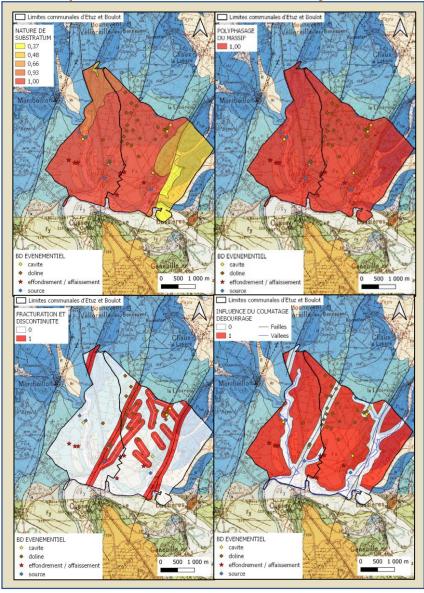
Combinaison = Prédisposition (par croisements successifs ou globale)

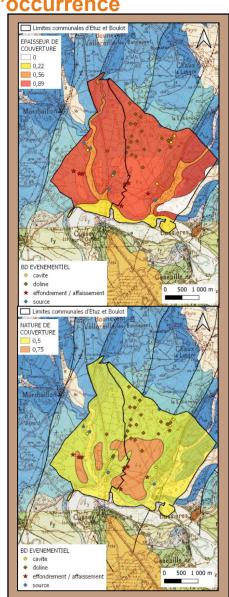


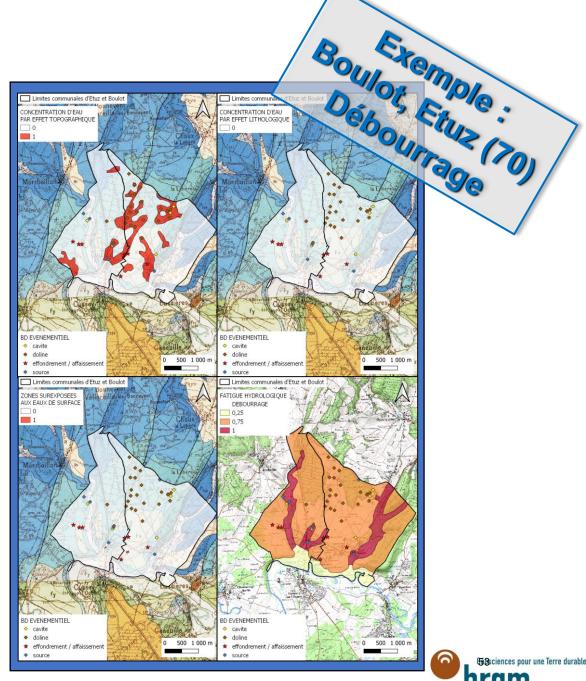




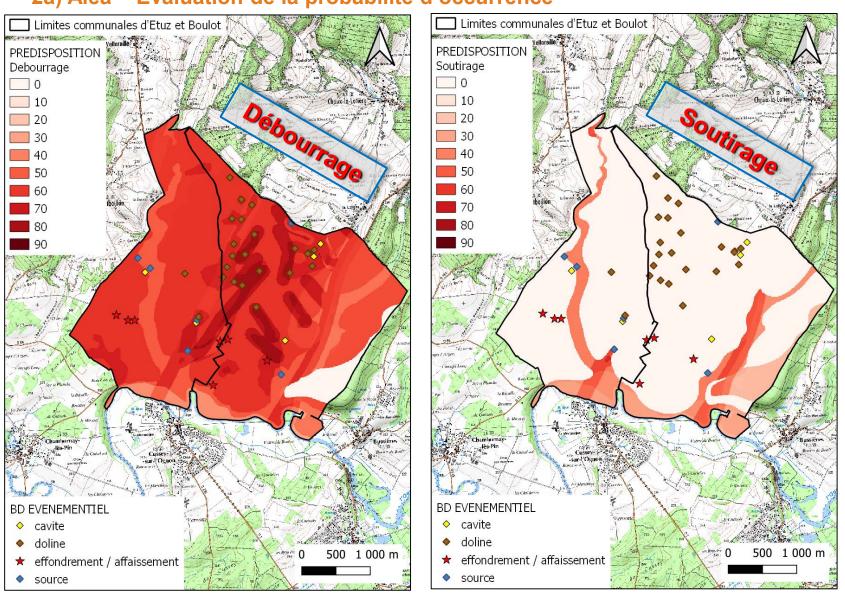
2a) Aléa - Evaluation de la probabilité d'occurrence

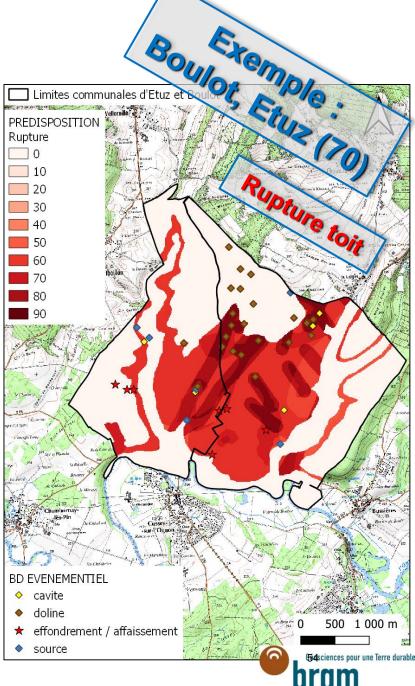






2a) Aléa - Evaluation de la probabilité d'occurrence



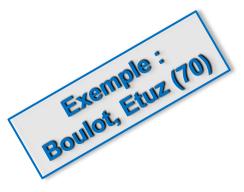


2b) Aléa - Evaluation de l'intensité •

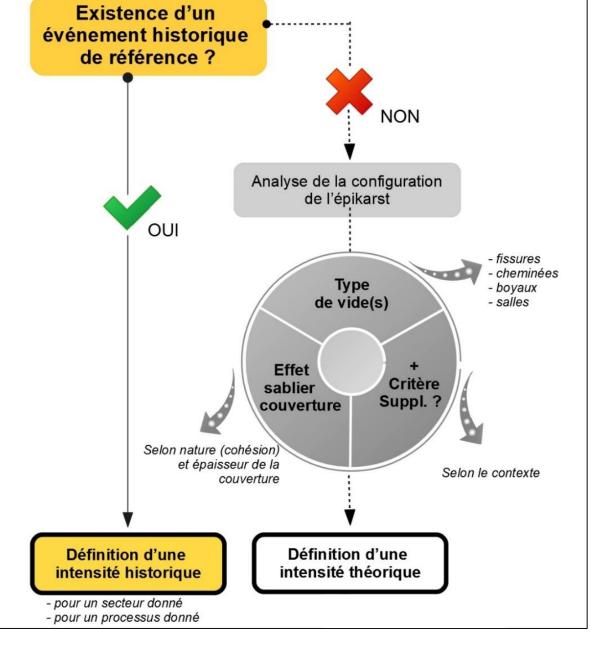
Approche historique conseillée

2c) Evaluation finale de l'aléa

| | | PRÉDISPOSITION | | | | | | |
|-----------|---------|-------------------------|--------------|------------------|------------------|--|--|--|
| ALEA | | Très faible à Faible | Moyenne | Forte | Très forte | | | |
| | Limitée | Faible | Moyen | Moyen à Fort | Fort | | | |
| INTENSITÉ | Modérée | Moyen | Moyen à Fort | Fort | Fort à très fort | | | |
| | Élevée | Moyen à Fort | Fort | Fort à très fort | Très fort | | | |



En cours de finalisation Intensité modérée a priori retenue Carte d'aléa devrait être similaire aux cartes de prédisposition







55







DIAGNOSTIC ET CARTOGRAPHIE DE RÉSEAUX KARSTIQUES DANS LE CONTEXTE DE LA LGV RHIN-RHÔNE



LE BUREAU D'ÉTUDE IGECAV



IGECAV est un bureau d'étude spécialisé dans la cartographie et les diagnostics des cavités souterraines.

Gaël GOUILLON

l'expertise de cavités

Qui sommes-nous?

Thomas RICHARD

Géotechnicien spécialiste en lasergrammétrie 3D



Sullyvan MARQUIS

Topographe



Julie BARRAS

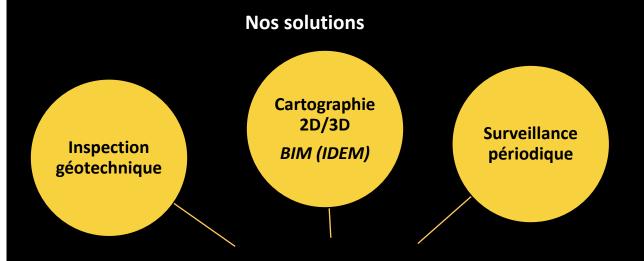
Géologue

Nos clients

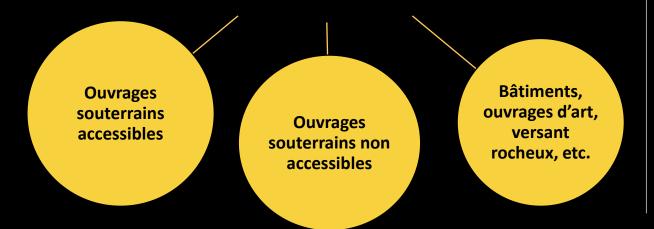
- **Collectivités / Mairies**
- Bureau d'études techniques
- **Organismes publics / Instituts**
- **Industriels**
- **Particuliers / Associations**

LE BUREAU D'ÉTUDE





Diagnostic stabilité & Relevé 3D de l'existant



Nos moyens spécifiques

- Scanners laser 3D

 Cartographie en surface / souterrain
- Scanner 3D de forage
 Cartographie 3D des cavités non accessibles (hors d'eau)
- Sonar de forage

 Cartographie 3D des cavités non accessibles (sous eau)
- Caméra d'inspection étanche
 Visualisation des cavités non accessibles
- Récepteur GNSS centimétrique

 Antenne GPS pour géoréférencement des données
- Système GEOMON
 Suivi en surface des mouvements de terrains



CAS DE RÉSEAUX KARSTIQUES ACCESSIBLES

SURVEILLANCE DE RÉSEAUX KARSTIQUES À PROXIMITÉ DES VOIES DE LA LGV RHIN-RHÔNE



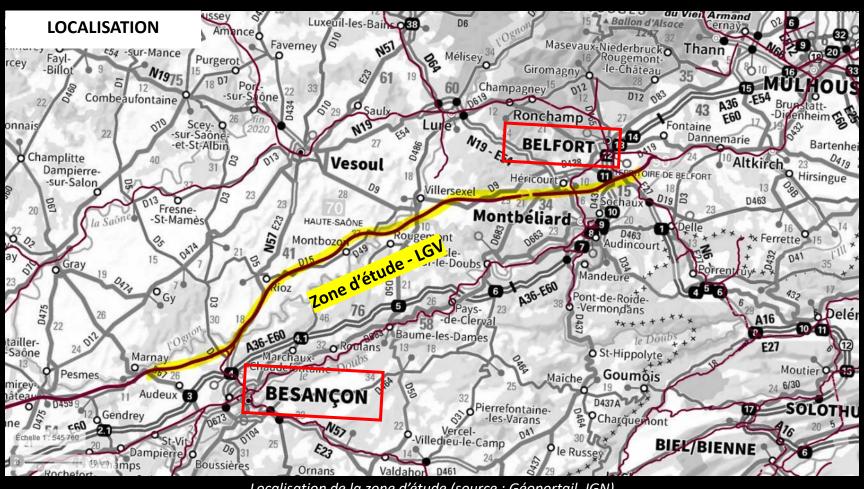
Scanner laser 3D et antenne GNSS positionnés devant la LGV RR

CONTEXTE ET OBJECTIFS



Localisation:

La zone d'étude se situe le long des voies de la LGV Rhin-Rhône entre Besançon et Belfort



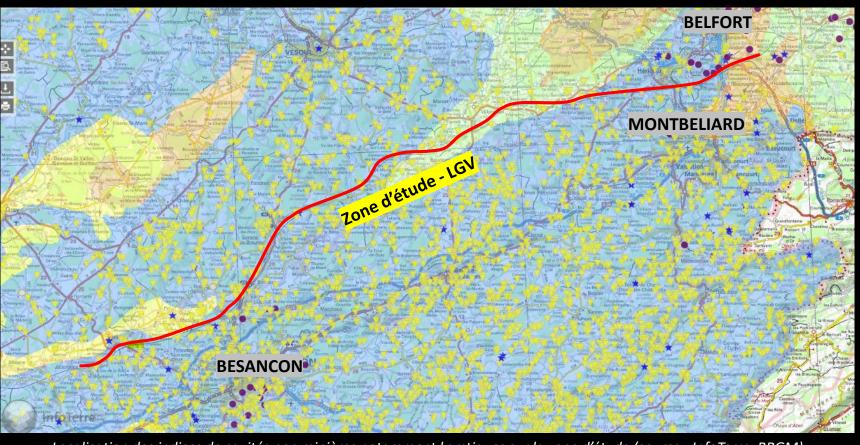
Localisation de la zone d'étude (source : Géoportail, IGN)

CONTEXTE ET OBJECTIFS



Contexte géologique :

- Terrains marno-calcaires fortement karstifiés
- Karsts développés dans les calcaires du Jurassique



Cavités souterraines non minières (gouffres, sources, pertes, ...)

Terrains marno-calcaires

Localisation des indices de cavités non minières notamment karstiques sur la zone d'étude (source : InfoTerre, BRGM)

CONTEXTE ET OBJECTIFS



Historique:

- Découverte de trois réseaux karstiques lors des travaux de terrassement de la ligne LGV en 2009 (nommées 1 à 3)
- Ces trois réseaux sont situés à proximité immédiate des voies → aménagement et sécurisation
- O Depuis 2009, SNCF-Réseau a la charge de surveiller régulièrement de ces réseaux

Objectifs de la mission :

- 1. Diagnostic géotechnique des 3 réseaux karstiques
- 2. Cartographie 3D des parties accessibles
- Comparaison numérique 3D avec un relevé de 2017 (pour le réseaux N°3)



Réseau karstique recoupé lors de travaux de terrassement de la LGV – réseau N°3 (source : JNGG 2008)

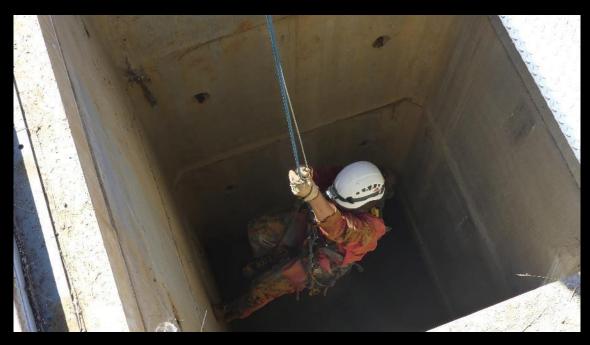




Descente sur cordes dans un réseau karstique à proximité de la LGV RR pour inspection (source : IGECAV)



- O 3 opérateurs d'IGECAV accompagnés d'un agent SNCF-Réseau : 2 opérateurs au fond en liaison radio avec l'opérateur en surface
- Accès par puits en cordes pour les trois réseaux
- O Au préalable : vérification des conditions d'aérage
- O Au préalable : vérification des conditions météorologique



Remontée sur corde du puits d'accès du réseau N°2 (source : IGECAV)



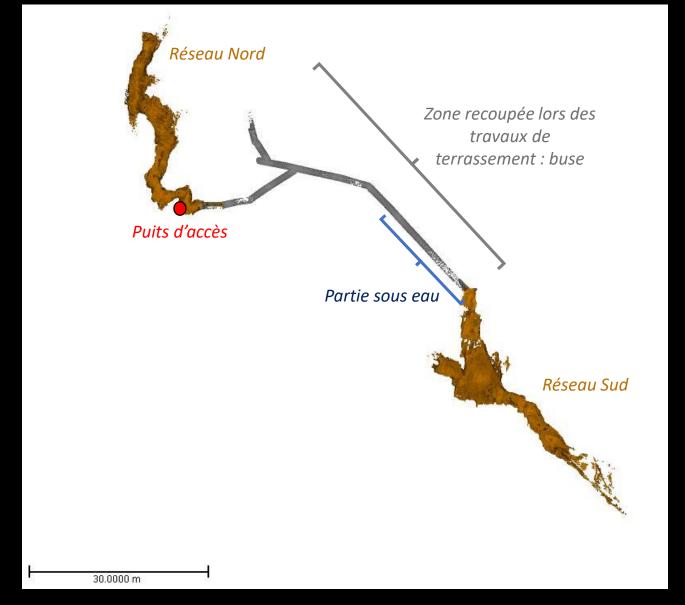
Installation en tête du puits du réseau N°2 : trépied + cordes + antichute de secours + ventilation forcée (source : IGECAV)



<u>Principales contraintes rencontrées :</u>

- Présence de CO2 en concentration importante > 3% pour un des sites : utilisation d'une ventilation forcée
- Nécessité de pomper l'eau de la partie basse d'un des réseaux pour pouvoir accéder à une seconde partie





IGECAV stabilité des cavités

- Numérisation en 3D de la surface
- O Géoréférencement centimétrique avec plusieurs positions GNSS statiques
- O Numérisation en 3D de la partie accessible des réseaux karstiques







Photographies des inspections et des relevés 3D prises à l'intérieur des réseaux karstiques N°1 et 2 (source : IGECAV)



CARTOGRAPHIE 3D

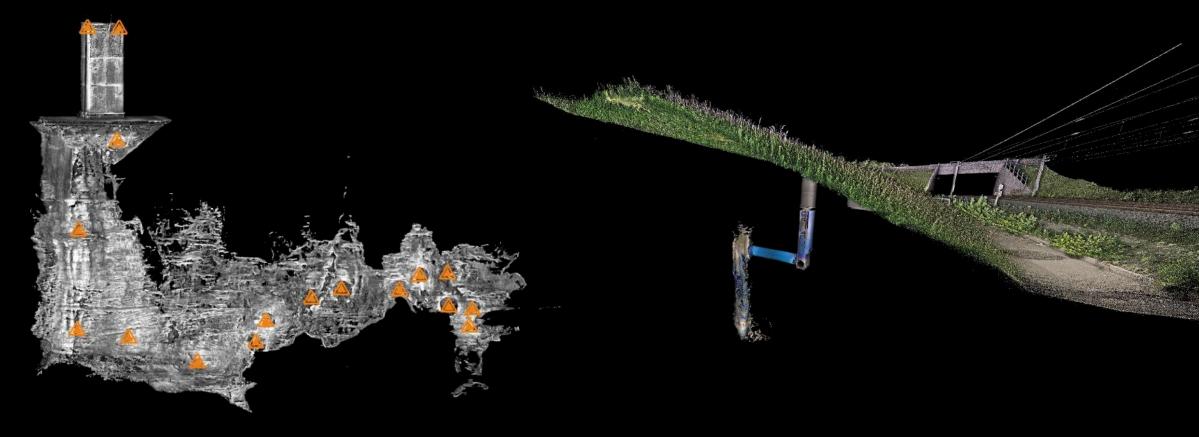


Nuage de points 3D colorisé - vue vers le haut – du réseau karstique N°2 (source : IGECAV)

CARTOGRAPHIE 3D



- O Numérisation en 3D des secteurs accessibles par scanner laser 3D
- Numérisation en 3D en surface à l'aplomb des cavités
- O Géoréférencement centimétrique des relevés avec une antenne GNSS pour intégration dans les bases de données cartographiques

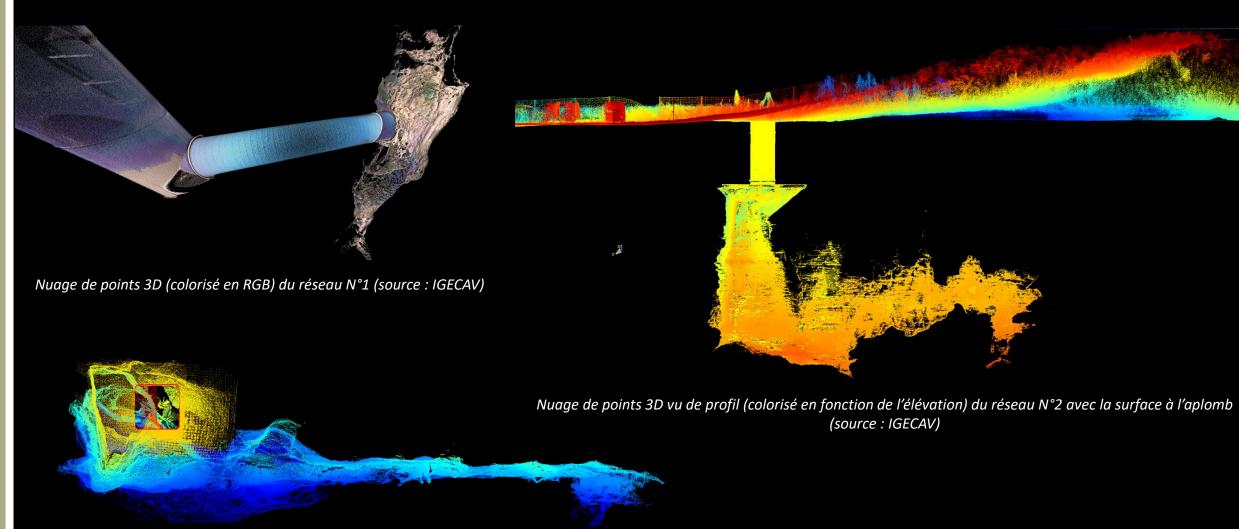


Nuage de points 3D (par retour d'intensité NB) avec position des stations (triangles orange) du réseau N°2 (source : IGECAV)

Nuage de points 3D (colorisé RGB) du réseau N°1 avec la surface à l'aplomb (source : IGECAV)

CARTOGRAPHIE 3D





Nuage de points 3D vu du dessus (colorisé en fonction de l'élévation) du réseau N°2 (source : IGECAV)

CARTOGRAPHIE



O Plan précis (centimétrique) géoréférencé

Coupes

SNCF

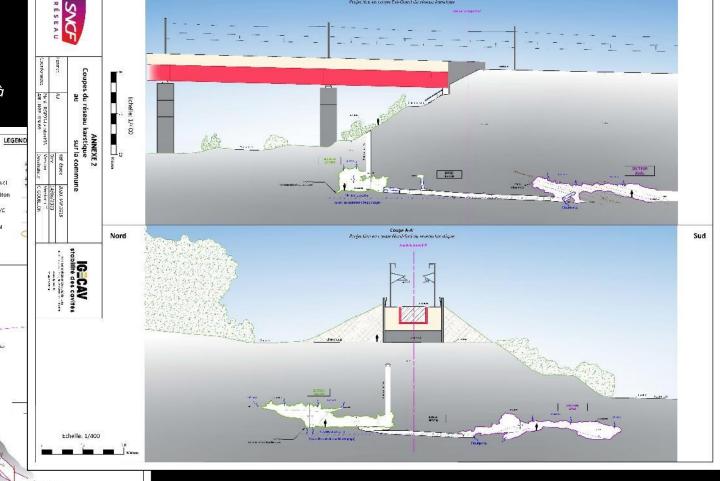
O Détermination de la profondeur des réseaux

Plan topographique et géotechnique du réseau karstique N°3 réalisée à partir du nuage de points 3D (source : IGECAV)

IG_CAV

el. et .ire 2020.845.0010

Coupes annotées (informations géotechniques, hydrogéologiques et topographiques) du réseau karstique N°3 - réalisée à partir du nuage de points 3D (source : IGECAV)





DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE



Inspection géotechnique dans le réseau karstique N°3 (source : IGECAV)

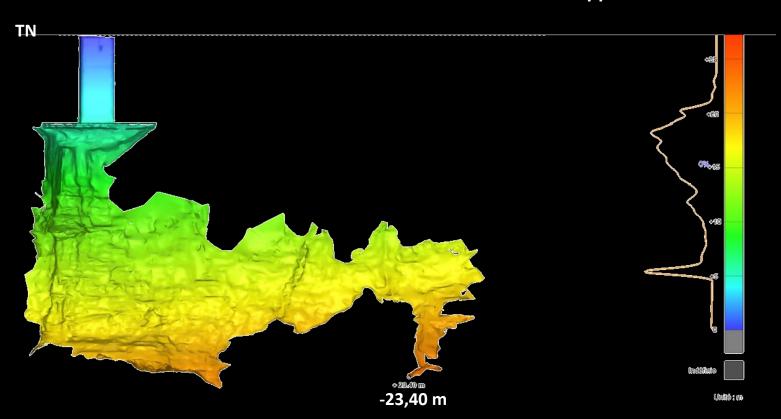
DIAGNOSTIC DE STABILITÉ

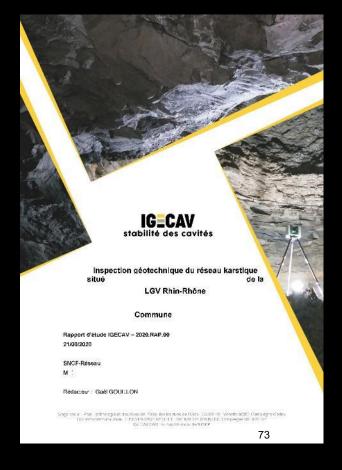


Basé sur une méthode observationnelle : fractures naturelles, mécaniques, strates géologiques, zones d'infiltrations d'eau, traces d'écoulements présentes ou passées, chutes de blocs, extensions possibles etc.)

Observations couplées avec les relevés 3D : analyses de la profondeur du réseau, configuration et volume des vides, mesures de pendages, analyse fracturation, etc.

Rédaction du rapport d'étude

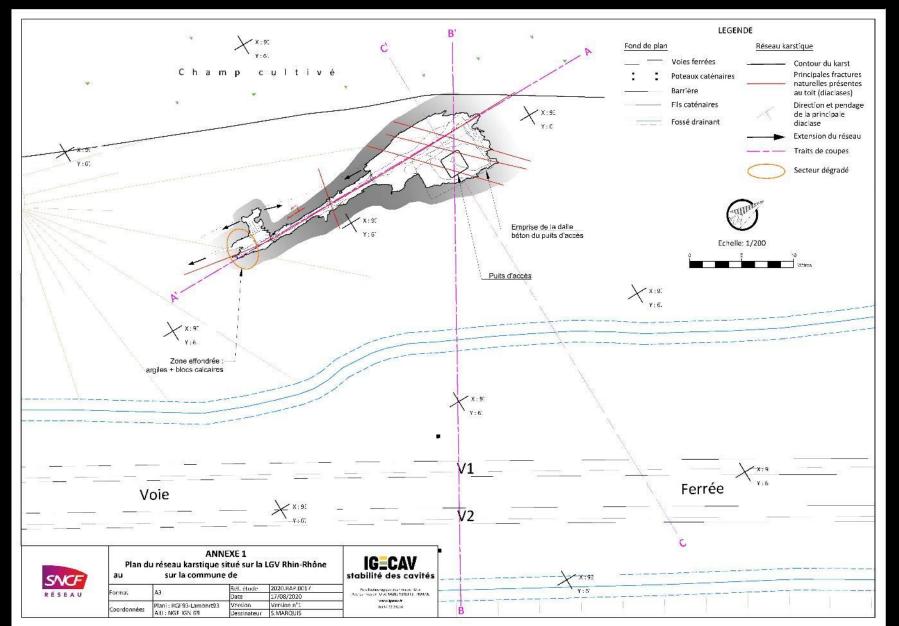




DIAGNOSTIC DE STABILITÉ

IGECAV stabilité des cavités

Annotation des observations géotechniques sur les plans et les coupes :

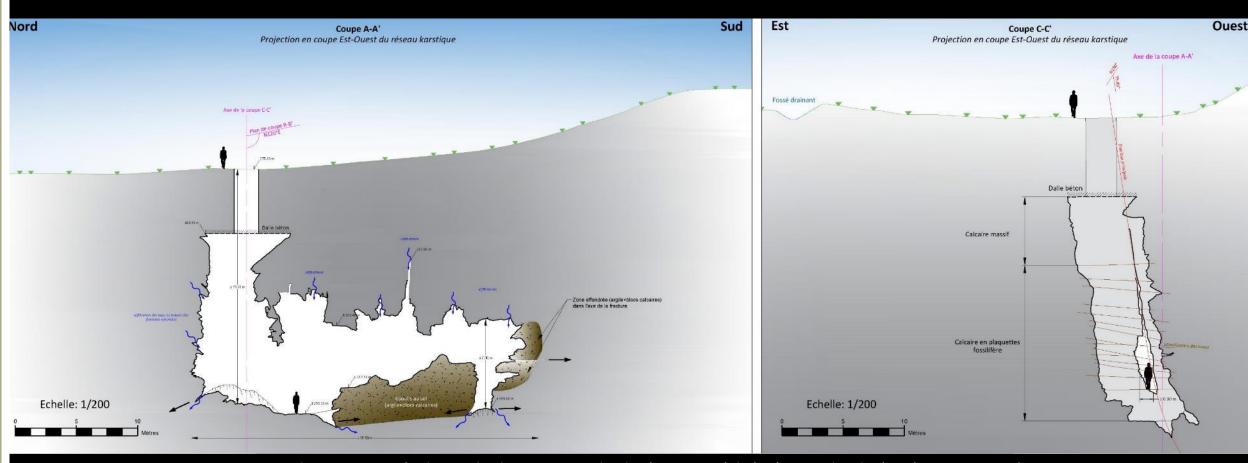


Extrait d'un plan topographique et géotechnique du réseau N°2 réalisées à partir du relevé 3D (source : IGECAV)

DIAGNOSTIC DE STABILITÉ



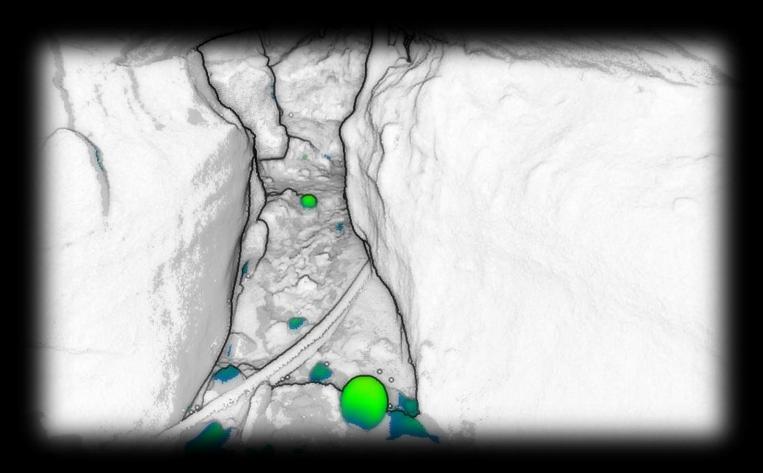
Annotation des observations géotechniques sur les plans et les coupes :



Extrait de coupes annotées longitudinale et transversales du réseau N°2 réalisées à partir du relevé 3D (source : IGECAV)



SURVEILLANCE 3D ET ANALYSE DES DÉFORMATIONS



Comparaison 3D de nuages de points entre 2017 et 2020 du réseau N°3 (source : IGECAV)

SURVEILLANCE 3D ET ANALYSE DE DÉFORMATIONS



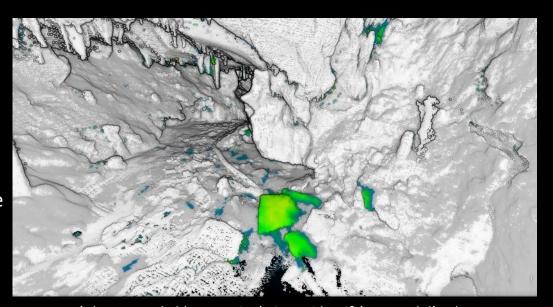
Principe :

Comparer deux nuages de points 3D d'un même ouvrage relevés à deux périodes différentes.

O Intérêt :

Déceler les déplacements d'ordres centimétriques sur une large superficie Analyser les déformations

Complémentaire à l'inspection visuelle et à d'autres moyens de surveillance plus précis mais plus localisés (ex : mesures de convergence, inclinomètres, etc.).



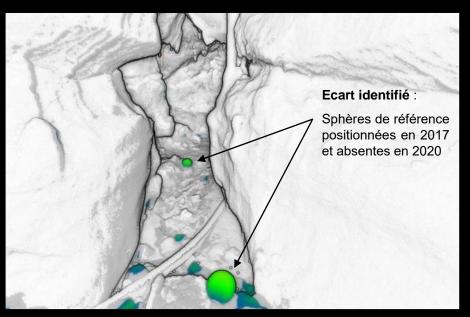
Déplacement de blocs centimétriques identifiées au sol d'un karst

Précision :

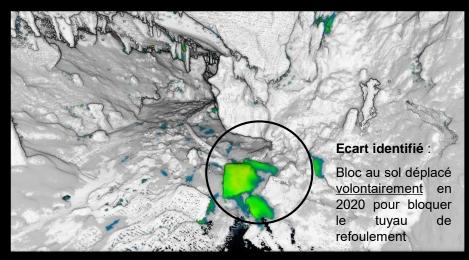
- < 1 cm : difficile de conclure à un véritable déplacement</p>
- Entre 1 et 5 cm : déplacement relevé avec quelques doutes possibles (selon le site, la distance et la mise en œuvre de la mesure)
- > 5 cm : déplacement relevé avec certitude

SURVEILLANCE 3D ET ANALYSE DE DÉFORMATIONS

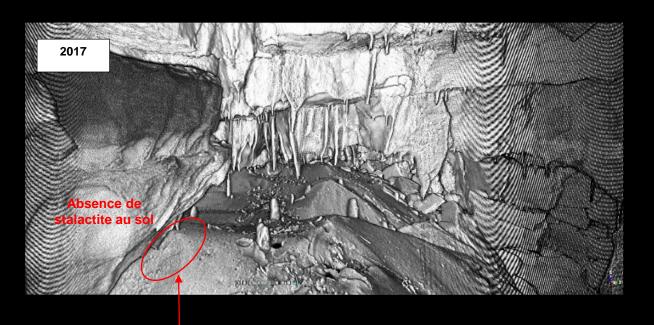




Exemple sur un karst situé sous les voies de la LGV RR



Exemple sur un karst situé sous les voies de la LGV RR





Exemple sur un karst situé sous les voies de la LGV RR



CAS DES CAVITÉS NON ACCESSIBLES (HORS LGV RR)



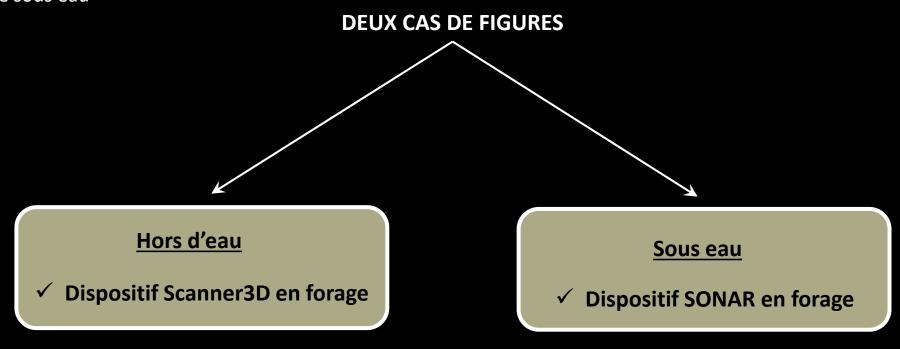
Cartographie d'un réseau sous eau par un forage de 80 m de profondeur (source : IGECAV)

RELEVÉS 3D DE RÉSEAUX NON ACCESSIBLES À L'HOMME



Dans quels cas:

- Cavité découverte par forage(s)
- Cavité en atmosphère dangereuse
- Cavité trop dégradée
- Effondrement en surface
- Cavité sous eau

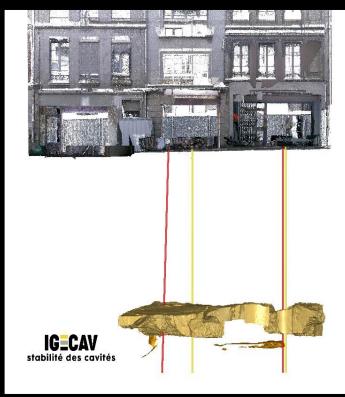


HORS D'EAU - DISPOSITIF DE SCANNER 3D EN FORAGE

IGECAV stabilité des cavités

Cartographier et inspecter :

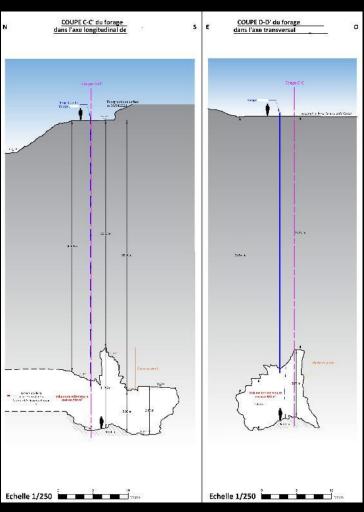
- Dimensionnement des vides souterrains (60 m de portée)
- Surveillance 3D possible (relevé dans le même forage)
- Emprise et profondeur par rapport à la surface
- Orientation et géoréférencement
- Examen visuel possible en VR





Deux niveaux de cavités superposés

Relevé 3D dans un forage à 35 m de profondeur (source : IGECAV)



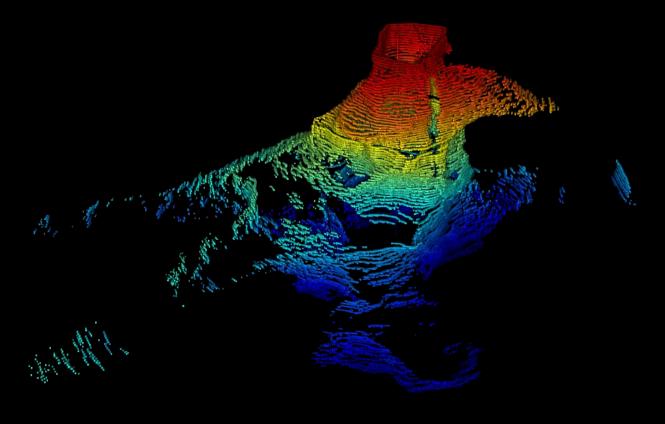
Coupes d'une cavité relevée avec le scanner 3D en forage (source : IGECAV)

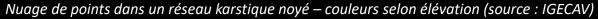
SOUS EAU - DISPOSITIF DE SONAR EN FORAGE

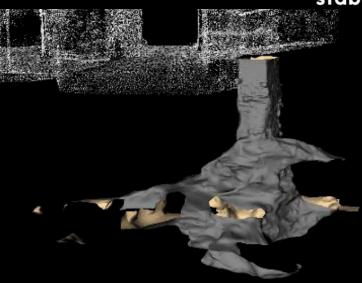
IGECAV stabilité des cavités

Cartographier:

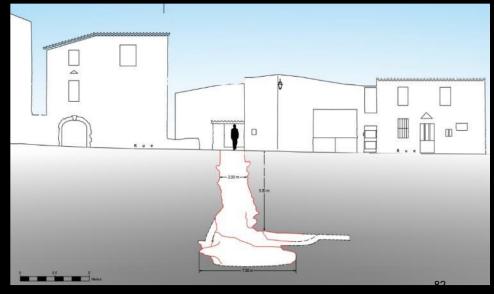
- Dimensionnement des vides souterrains
- Emprise et profondeur par rapport à la surface
- Orientation et géoréférencement
- Précision cm à m







Maillage surfacique de la cavité relevée par Sonar (source : IGECAV)



Coupe d'une cavité relevée avec le Sonar en forage (source : IGECAV)

CONCLUSIONS



Diagnostic et cartographie de réseaux karstiques dans le contexte de la LGV Rhin-Rhône - SNCF-Réseau

- O Interventions spécifiques (sur cordes avec contrôle de l'atmosphère, ventilation et pompage)
- Combinaison d'un relevé 3D et d'un diagnostic de stabilité
- Réalisation de plans et de coupes géoréférencés (intégrable ensuite dans un SIG)
- Compte-rendu avec diagnostic géotechnique et recommandations éventuelles
- Surveillance précise en réalisant des comparaisons de relevés 3D



MERCI DE VOTRE ATTENTION!

contact@igecav.fr

www.igecav.fr





DIMENSIONS RÉGLEMENTAIRES ASSOCIÉES AUX RISQUES NATURELS D'ORIGINE KARSTIQUE ET AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE : EXEMPLES EN BFC

PLU?







PPRN?

Journée technique du Pôle Karst - 8 juin 2021

Fabienne PERRIGOUARD – DDT du Doubs Nejema ZERGAOUI – Cerema – Agence d'Autun

- R111-2?



Autre?



INTRODUCTION:

La politique française en matière de prévention des risques majeurs

08/07/2021

Connaître les risques Assurer le retour détermination des aléas d'expérience analyse des enjeux évaluation des risques Préparer et gérer la crise Surveiller et alerter composantes Plans de secours (Préfet)PCS (Maire) de la exercices et entraînements prévention S'informer pour développer des risques la culture du risque DDRM (Préfet) DICRIM (Mairé) Réaliser des travaux information du citoyen réduction de l'aléa Prendre en compte protection réduction de la vulnérabilité les risques dans l'aménagement PPR (Préfet)

DDRM: Dossier Départemental des Risques Majeurs

DICRIM: Dossier d'Information Communale sur les Risques Majeurs

PPR: Plan de Prévention des Risques

PLU (Maire)

◆ Source : CETE du Sud-Ouest, 2008.







POINTS ABORDÉS:

1. Aperçu de la réglementation vis-à-vis des cavités karstique

2. Les possibilités de prise en compte de l'aléa karstique dans l'aménagement du territoire







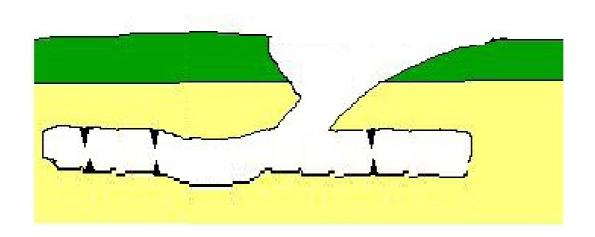


A) La notion de propriété d'une cavité

Code civil, art. 552 : « la propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous »

- → le propriétaire du terrain à l'aplomb de la cavité est (généralement) le propriétaire de la cavité
 - \rightarrow sauf si preuve du contraire

exemple si division en volume car cela permet un découpage en 3D de l'assiette foncière.





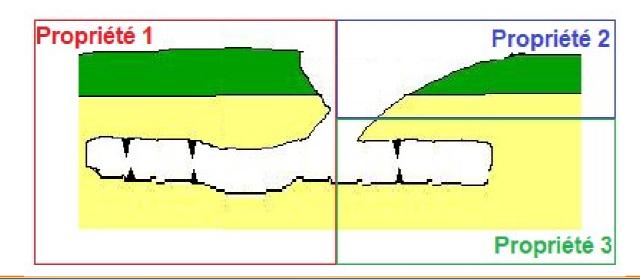


A) La notion de propriété d'une cavité

Code civil, art. 552 : « la propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous »

- → le propriétaire du terrain à l'aplomb de la cavité est (généralement) le propriétaire de la cavité
 - → sauf si preuve du contraire

exemple si division en volume car cela permet un découpage en 3D de l'assiette foncière.







B) Quelques extraits de textes réglementaire

- CGCT, art. L.2212-2 5°: « La police ... prévenir [...] et faire cesser [...] les accidents et les fléaux calamiteux [...] »
 - → Peut être exercé par le maire avec ses pouvoir de police.
- CGCT, art. L.2212-4 : le maire doit *prescrire* « [...] l'exécution des *mesures de sûreté* exigées par les circonstances »
- CCH, art. L.511-1 à L.511-4 : «Le maire peut [...] prescrire la réparation ou la démolition des [...] édifices quelconques lorsqu'ils menacent ruine [...] »
 - → procédures de péril (ordinaire / imminent)





B) Quelques extraits de textes réglementaire

- C.Civ, art. 1383 « Chacun est responsable du dommage qu'il a causé [...] par son fait, [...] par sa négligence ou par son imprudence. »
- CE, art. L563-6-II « Toute personne qui a connaissance de l'existence d'une cavité souterraine [...] dont l'effondrement est susceptible de porter atteinte aux personnes ou aux biens, ou d'un indice susceptible de révéler cette existence, en informe le maire, qui communique, [...] au représentant de l'État [...] et au président du conseil départemental [...]. »
- C.Civ art. 641 « Tout propriétaire a le droit d'user et [...] de disposer des **eaux pluviales** qui tombent sur son fonds. Si l'usage de ces eaux [...] **aggrave la servitude** naturelle d'écoulement [...], une **indemnité** est due au propriétaire du fonds inférieur. »





C) Les missions du Maire (EPCI si compétence transmise) et ses devoirs

La connaissance des cavités et l'analyse du risque

Recenser et localiser les cavités souterraines sur le territoire communal



- ✓ Collecter les données relatives aux cavités souterraines présentes sur le territoire communal et les cartographier
- ✓ Réaliser l'inventaire communal des cavités et indices de cavités (si élaboration ou révision d'un document d'urbanisme)

La gestion du territoire

Prendre en compte le risque lié aux cavités souterraines pour l'aménagement du territoire et l'urbanisme



- ✓ Intégrer la cartographie des cavités (ou les cartes d'aléa) dans les documents d'urbanisme (SCoT, PLU, POS, CC)
- ✓ Délivrer les certificats d'urbanisme et les permis en tenant compte de l'aléa cavité
- ✓ Appliquer un PPRN Cavités souterraines
- ✓ Procède préférentiellement à l'acquisition amiable ou à l'expropriation des biens particulièrement exposés et des biens sinistrés par une catastrophe naturelle





C) Les missions du Maire (EPCI si compétence transmise) et ses devoirs

L'information des citoyens

Conduire l'Information préventive des habitants de la commune et mettre en œuvre l'Information acquéreurs / locataires (IAL)



- ✓ Réaliser le Document d'information communal sur les risques majeurs (Dicrim) si la commune est concernée
- ✓ Afficher les consignes de sécurité
- ✓ Mettre en œuvre une information périodique (si PPR)
- ✓ Signaliser les risques menaçant la sécurité publique
- ✓ Mettre à disposition du public les informations nécessaires à l'IAL, si ces informations existent
- ✓ Prescrire les consignes à mettre en œuvre par l'exploitant d'un camping situé en zone à risque

La planification et la gestion d'un événement

Préparer, organiser, diriger la mise en œuvre des mesures de sauvegarde sur la commune et gérer l'après-crise



- ✓ Avant : surveiller l'évolution d'une cavité menaçant la sécurité publique, élaborer un Plan communal de sauvegarde si PPR
- ✔ Pendant : exercer ses pouvoirs de police et réquisition, pourvoir aux besoins immédiats de la population, informer l'État des mesures d'urgence prescrites
- ✓ Après : soutenir la population, évaluer et déclarer les dommages, administrer la reconstruction, faire des travaux de mise en sécurité adaptés si urgence, participer au retour d'expérience national





D) Le rôle et les actions de l'État

La connaissance des cavités et l'analyse du risque



 Élabore le Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM), le dossier de Transmission de l'information au maire (TIM) et le Porter à connaissance (PAC)

Art. L. 132-2 et R. 132-1 du Code de l'urbanisme et R. 125-11 du Code de l'environnement

- Réalise des cartes d'aléas et définit le risque (Plans de Prévention des Risques, PPR)
- Remplit ses obligations de propriétaire

La gestion du territoire



- Élabore la Directive territoriale d'aménagement (DTA)
- Délimite les zones à risque et définit les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde incombant aux collectivités et aux particuliers (PPR)

Art. L. 562-1 à 9 du Code de l'environnement

- Élabore le zonage réglementaire du PPR
- Impose les servitudes d'utilité publique
- Procède de manière exceptionnelle à l'acquisition amiable ou à l'expropriation des biens particulièrement exposés et des biens sinistrés par une catastrophe naturelle





D) Le rôle et les actions de l'État

L'information des citoyens



- Informe les collectivités des risques majeurs présents sur le territoire, via la transmission du DDRM, du TIM et du PAC Art. L. 132-2 et R. 132-1 du Code de l'urbanisme et R. 125-11 du Code de l'environnement
- Arrête la liste des communes soumises à l'obligation d'Information des Acquéreurs et Locataires (IAL) Art. L. 125-5 du Code de l'environnement

08/07/2021

La planification et la gestion d'un événement



- Dirige les opérations de secours, en exerçant son pouvoir de substitution et/ou de réquisition :
- > si le maire fait appel au préfet
- > si le maire n'a pas pris les mesures nécessaires et après mise en demeure
- > si l'événement concerne plusieurs communes
- > si l'événement entraîne le déclenchement d'un plan Orsec

Art. L. 2215-1 du Code général des collectivités territoriales

- Prépare et organise la mise en œuvre des mesures de sauvegarde au niveau départemental Décret n° 2005-1157 pris pour application de l'art. 14 de la loi du 13/08/2004 de modernisation de la sécurité civile

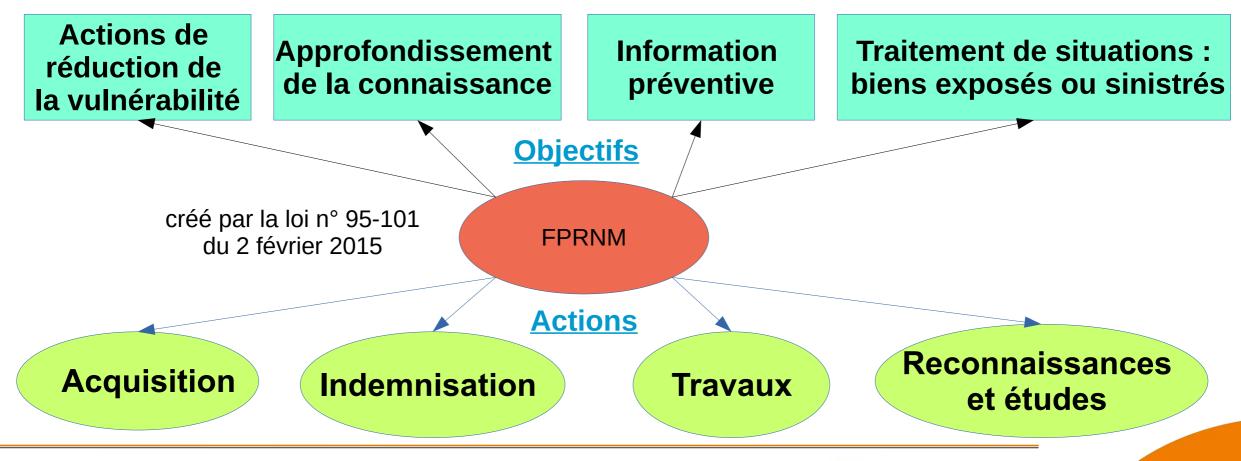
- · Élabore le Plan Orsec et le Plan Rouge
- Peut commander et mener un retour d'expérience
- Instruit les dossiers de demande de reconnaissance d'état de Catastrophe Naturelle







D) Le Fond de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) - Fond Barnier





08/07/2021



D) Le Fond de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) - Fond Barnier → Programmes d'Actions de Prévention des RIsques CAvités (PAPRICA)

Appel à projet national

08/07/2021

PAPRICA (équivalent des PAPI) Élaboration d'une stratégie de prévention des risques portée par les communes

Financement:

- Le programme « Prévention des risques » (BOP 181) soutient l'animation du projet via une subvention d'un taux maximum de 40 % pour un coût plafonné à 60 000 € (soit 24 k€/an)
- le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM) selon les règles d'éligibilité en vigueur à hauteur de 50% maximum du coût des opérations portées par les collectivités.

Lien : Cahier des charges 2020 - Programme d'actions pour la prévention des risques liés aux cavités (PAPRICA)







Outils d'urbanisme

Les autres outils de protection patrimoniale ou environnementale





A): Les outils d'urbanisme

Au stade de la planification des documents d'urbanisme

Les documents d'urbanisme doivent intégrer la prévention des risques (L. 101-2, code de l'urbanisme).

2 outils pour la prise en compte de l'aléa karstique dans l'aménagement du territoire :

- Le **PPRN**, SUP annexée aux documents d'urbanisme -SCoT et PLU(i)-, est un outil central de l'État pour la prise en compte des risques naturels dans les politiques d'aménagement ;
- Les « porter à connaissance » (L. 121-2 et R. 121-1, code de l'urbanisme) en direction des maires de communes et présidents d'EPCI en vue de la prise en compte des risques naturels dans les documents d'urbanisme sont également des outils pertinents. Dans le Doubs, ces PAC s'appuient sur les données de l'atlas départemental associée à la doctrine départementale en matière de prévention des risques de mouvements de terrain.

Au stade de l'application de droit des sols en complément des outils précités (PPRN, PLU(i)) :

- L'article R. 111-2 du code de l'urbanisme :
 - s'il y a un problème de sécurité uniquement ;
 - Pour édicter une interdiction ou des prescriptions spéciales d'urbanisme sur un projet donné.

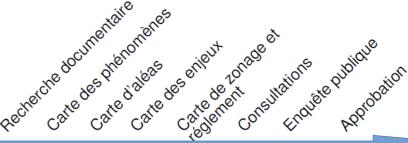




A): Les outils d'urbanisme - PPR

Le plan de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPRN MVT) :

- outil réglementaire instauré par la loi Barnier de 1995, SUP annexé aux documents d'urbanisme
- Élaboré à l'initiative de l'État, ce document réglementaire délimite les zones exposées aux risques, définit la constructibilité des zones réglementées, précise les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre par les collectivités publiques et les particuliers ;
- Contenu d'un PPRN (en gras : pièces réglementaires):
 - une note de présentation ;
 - Des cartographies : carte informative des phénomènes passés et actifs, cartographie des aléas, cartographie des enjeux, **zonage réglementaire**
 - Un règlement.
- Déroulement de la réalisation d'un PPRN :





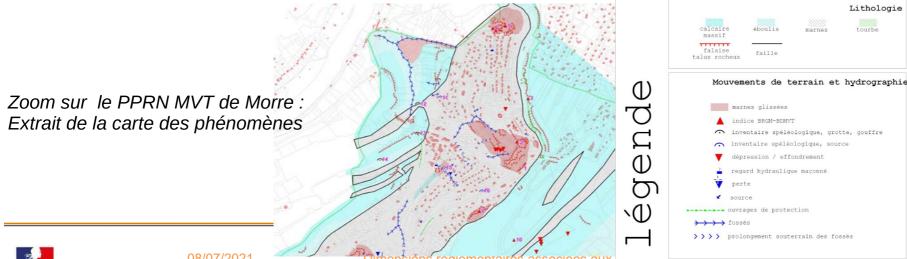


A): Les outils d'urbanisme - PPR

Les plans de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPRN MVT) :

- La cartographie des phénomènes :
 - Elle représente l'ensemble des phénomènes recensés sur la zone de prescription du PPRN.
 - Le recueil des informations mobilise : bibliographie exhaustive, consultation des acteurs susceptibles de détenir des informations, une étude de photo-interprétation, des visites de terrain (validation des données récoltées).

 Se fonde sur les éléments disponibles (en théorie, pas d'investigation supplémentaire – sondages...- requise pour la réalisation d'un PPRN mouvements de terrain.



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité

karstique et aménagement du territoire / exemples en BFC

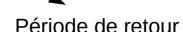
A): Les outils d'urbanisme - PPR

Les plans de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPR MVT) :

- La cartographie des aléas :
 - La méthode classique est le croisement entre la probabilité d'intensité et la probabilité d'occurrence.



Intensité du phénomène souvent estimée sur la base de données historiques/terrain ou éventuellement par modélisation



Exemples des PPRN MVT de Morre et Saint-Hippolyte

deux niveaux d'aléas retenus :

- fort au droit des cavités reconnues et des dolines identifiées
- moven au droit des zones susceptibles de voir se développer des phénomènes karstiques

08/07/2021

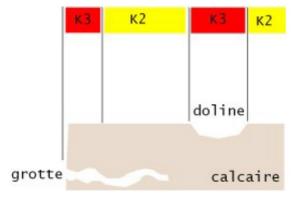


figure n°15 : détermination du niveau d'aléa cavité souterraine







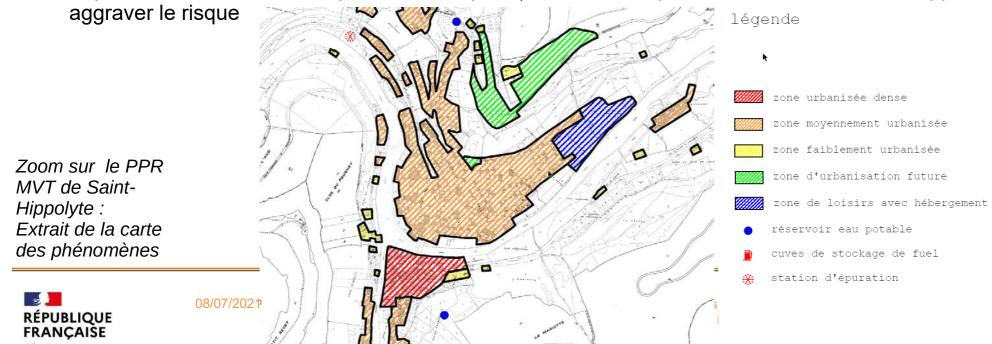
19

A): Les outils d'urbanisme - PPR

Les plans de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPR MVT) :

- La cartographie des enjeux (humain, socio-économique et environnemental):
 - classer les différentes parties du territoire au regard de l'intensité de l'urbanisation ;
 - Identifier les installations, équipements et services (routes, ERP, équipements sensibles);

• Espaces non directement exposés aux risques (notamment espaces urbains dont le développement pourrait



A): Les outils d'urbanisme - PPR

Les plans de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPR MVT) :

- La cartographie réglementaire
 - la délimitation du zonage réglementaire est basée sur des critères de constructibilité et de sécurité à partir du croisement des aléas et des enjeux
 - Distinction entre les zones exposées, les zones non directement exposées et les zones protégées ou stabilisées.
 - <u>Le règlement</u> indique, pour chaque niveau d'aléa :
 - les mesures d'interdiction,
 - les prescriptions,
 - les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde,
 - les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l'approbation du plan.





aux risques n

toire / exemp

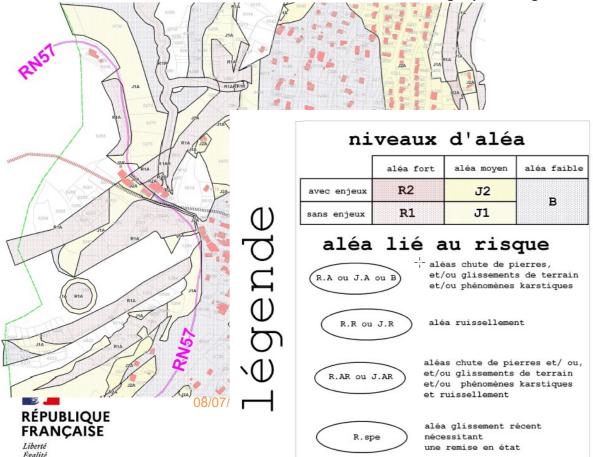
A): Les outils d'urbanisme - PPR

Les plans de prévention des risques naturels de mouvements de terrain (PPR MVT) :

limite communale

• La cartographie réglementaire et le règlement

Zoom sur le PPR MVT de Morre : Extraits de la cartographie réglementaire et du règlement



Fraternité

TITRE 2 - DISPOSITIONS APPLICABLES EN MATIERE D'UTILISATION DES SOLS

CHAPITRE 1 : DISPOSITIONS APPLICABLES EN ZONE ROUGE

Article 1 - Dispositions relatives aux projets nouveaux

| Type d'aléa | Sont interdits | Sont autorisés à condition de ne pas aggraver les risques ou de ne pas en provoquer de nouveaux et sous réserve de ne pas augmenter la population exposée |
|--|--|--|
| A glissements de terrain, chutes de pierres, phênomênes karsti ques | A l'exception de ce qui est autorisé sous conditions, tout est interdit. En particulier: — toute création de logement supplémentaire ou d'établissement recevant du public (ERP), — les défrichements dans une bande de 20 m sous les barres rocheuses et falaises. — les dépôts de toute nature. | fonctionnement des services publics (transformateur électrique, relais téléphoniques, pylónes) qui ne pourraient être implantés en d'autres lieux, l'installation de clôtures et de barrières, les trayaux nécessaires aux captages |
| R ruissellement | A l'exception de ce qui est autorisé sous conditions, tout est interdit. En particulier: — ce qui est interdit pour les aléas A, les défichements | interdictions dues aux aléas A et R, à condition d'être obligatoirement suivis d'un reboisement, les plantations, cultures, bois, pacages |

A): Les outils d'urbanisme - le PAC

<u>Le **porter à connaissance** des données de l'atlas départemental et de la doctrine départementale « mesures de prévention mises en place par les services de l'État dans le Doubs »</u>

• A l'appui de la connaissance disponible au travers de l'atlas départemental, la doctrine départementale définit des **principes**

techniques généraux pour l'aménagement et la constructibilité des zones exposées à des aléas mouvements de

terrain

• Le PLU(i):

Prend en compte la prévention des risques majeurs ;

- Édicte des règles d'urbanisme.
- Atlas départemental et doctrine peuvent être consultés sur le site Internet des services de l'État dans le Doubs :

https://www.doubs.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-populatio n/Risques-majeurs/Cartographie-des-risques-naturels-et-technologiques-dans-le-dep artement-du-Doubs/Les-risques-de-mouvements-de-terrain







A): Les outils d'urbanisme – le PAC

Zoom sur le contenu de la doctrine départementale :

- Principes techniques généraux concernant les projets de construction : Les 4 niveaux d'aléas MVT de l'atlas départemental (faible, moyen, fort et très fort) sont associés aux principes de constructibilité suivants :
 - aléa faible : pas d'interdictions de principe, information des propriétaires et pétitionnaires de projets, recommandations techniques.
 - aléa moyen : information des propriétaires et pétitionnaires de projets, tous projets réalisables <u>sous conditions</u> de précautions techniques (respect de mesures spécifiques ou réalisation d'une étude géotechnique).
 - aléa fort : application d'un <u>principe d'inconstructibilité</u> ; des projets peuvent dans certains cas être admis, sous conditions strictes.

Dimensions réglementaires associées aux risques naturels d'origine

karstique et aménagement du territoire / exemples en BFC

- aléa très fort : application d'un <u>principe d'inconstructibilité strict.</u>



Pour l'aléa karstique à ce jour dans le Doubs au sein de l'atlas : 2 niveaux d'aléas (faible, fort)





A): Les outils d'urbanisme – le PAC

Zoom sur le contenu de la doctrine départementale :

Tableau synoptique de constructibilité :

Tableau synoptique de la constructibilité :

| Aléa Projet | Faible | Moyen | Fort | Très fort |
|--|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
| Constructions neuves (ou extensions importantes / extensions non contiguës) | OUI recommandations (¹) | OUI sous conditions (²) | NON sauf exception (³) | NON |
| Petits projets * | OUI recommandations (¹) | OUI recommandations (¹) | OUI sous conditions (²) | NON |

Dimensions réglementaires associées aux risques naturels d'origine

karstique et aménagement du territoire / exemples en BFC

- (1) Recommandations : réalisation d'une étude géotechnique avant travaux ou respect des mesures de réduction de la vulnérabilité préconisées par la DDT pour le risque considéré (voir paragraphe 3).
- (2) Conditions : le projet DOIT présenter des garanties techniques (des vérifications sont nécessaires) : réalisation préalable et respect d'une étuée géotechnique ou respect des mesures de réduction de la vulnérabilité préconisées par la DDT pour le risque considéré (voir paragraphe 3).
- (3) Exceptions: des projets pourront être autorisés dans certains cas, sous conditions strictes
- projets non situés dans les secteurs a priori les plus exposés : dolines, pied de falaise, zones de glissement avéré.
- préalablement à la définition du projet, réalisation d'une étude géologique, hydrogéologique et géotechnique (voir ci-après) délimitant de manière précise les zones à risques et fixant les conditions de réalisation de constructions neuves dans les zones les moins exposées ;
- examen conjoint du projet et de l'étude par la DDT.
- réalisation du projet conforme aux préconisations de l'étude géologique, hydrogéologique et géotechnique







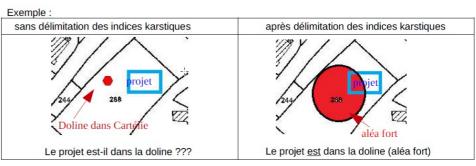
^{*} petits projets : petites extensions contiquës, reconstruction à l'identique (hors destruction causée par un mouvement de terrain), auvents...

A): Les outils d'urbanisme - le PAC

Zoom sur le contenu de la doctrine départementale :

- Autres principes généraux de prévention définis dont :
 - l'interdiction de combler les indices karstiques ;
 - En matière de gestion des eaux pluviales dans les zones à risque karstique, éviter ou réguler l'infiltration
- Modalités de délimitation des dolines :
 - Étendue spatiale des dolines (même si représentée de manière ponctuelle dans l'atlas);
 - Importance d'une délimitation précise de l'aléa au droit des dolines ;
 - l'aléa fort porte sur la totalité de la doline.

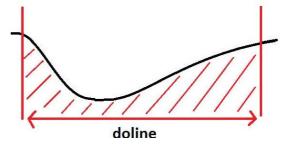
08/07/2021



Il est rappelé que <u>l'aléa fort doit comprendre la totalité de la doline</u> (le fond PLUS les flancs) :



Dimensions réglementaires associées karstique et aménagement du tel



A): Les outils d'urbanisme – le PAC

Application de la doctrine au stade de la planification des documents d'urbanisme

- Données de l'atlas départemental portées à la connaissance des collectivités compétentes en matière de planification des documents d'urbanisme (PAC Etat) :
 - Connaissance disponible mais pas nécessairement exhaustive ;
 - Investigations plus fines recommandées :
 - Recommandation : faire un inventaire des indices karstiques, surfaces et caractéristiques (en particulier das les zones à enjeux);
 - Possibilité de surclassement d'aléa (indices karstiques très développés par exemple)
 - Possibilité de retravailler les contours des zones à moyenne ou forte densité de dolines au regard de la connaissance complémentaire.
- Les documents d'urbanisme doivent afficher clairement la constructibilité des différents secteurs. En particulier (se reporter à la doctrine complète pour plus de détail) :
 - les portions de territoire en aléas faible et moyen pourront être déclarés constructibles ;
 - les portions de territoire en aléa fort seront inconstructibles (sauf petits projets) ;
 - les portions de territoire en aléa très fort seront frappés d'inconstructibilité stricte.
- Les informations sur la prise en compte du risque doivent figurer dans les différentes pièces du PLUi et en particulier dans les pièces réglementaires (règlements écrit et graphique, OAP).





A): Les outils d'urbanisme - R. 111-2 du code de l'urbanisme

Mise en œuvre du R. 111-2 du CU au stade de l'application du droit des sols (hors PPR et PLU intégrant des interdictions/prescriptions spécifiques) :

« Le projet peut être refusé ou n'être accepté que sous réserve de l'observation de prescriptions spéciales s'il est de nature à porter atteinte à la salubrité ou à la sécurité publique du fait de sa situation, de ses caractéristiques, de son importance ou de son implantation à proximité d'autres installations. »





B) Les autres outils de protection patrimoniale ou environnementale

Le milieu karstique est riche en intérêts : écologique, touristique, géologique, paysagé, ...

- → D'autres outils en dehors du domaine de gestion du risque
 - → mais avec le même objectif de préservation

Arrêté de protection de biotope APB

Classement en monument historique MH

Espace naturels sensibles ENS

Le périmètre de protection et de mise en valeur des espaces agricoles et naturels périurbains PAEN

Zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager ZPPAUP

Zone agricole protégée ZAP



08/07/2021









MERCI DE VOTRE ATTENTION

Fabienne.Perrigouard@doubs.gouv.fr Nejema.Zergaoui@cerema.fr



INSTITUT SUISSE DE SPÉLÉOLOGIE ET DE KARSTOLOGIE SCHWEIZERISCHES INSTITUT FÜR SPELÄOLOGIE UND KARSTFORSCHUNG INSTITUTO SVIZZERO DI SPLEOLOGIA E CARSOLOGIA SWISS INTITUTE FOR SPELEOLOGY AND KARST STUDIES

KarstALEA Prévision des dangers liés au karst lors de travaux souterrains

« Mouvements de terrain en milieu karstique : processus, méthodes et études de cas »

8 juin 2021

Arnauld Malard, ISSKA

Contenu

- _ ISSKA
- Contexte / challenges
- Concepts
- Principes de la méthode
- Applications et extensions
- KarstALEA vers Karst toolbox



ISSKA / SISKA



- Fondation d'utilité publique à but non lucratif
- Implanté à La Chaux-de-Fonds, CH, depuis 2000
- 15 collaborateurs: hydrogéologues, géologues, géographes, archéozoologue, techniciens et secrétaire
- Domaines d'activité:
 - Recherche scientifique
 - Développements (méthodes, outils)
 - Expertises
 - Protection de l'Environnement / patrimoine
 - Enseignement
- Zones d'activité:
 - Suisse 80%
 - International 20%



Contexte / challenges

- Constructions souterraines en milieux karstiques soumises à:
 - Vides
 - Venues d'eau
 - Instabilité remplissages karstiques
- Problématiques pour l'ouvrage



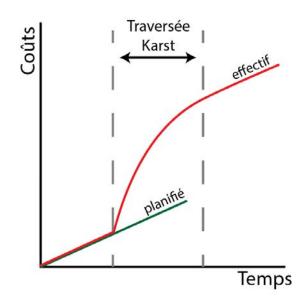






Contexte / challenges

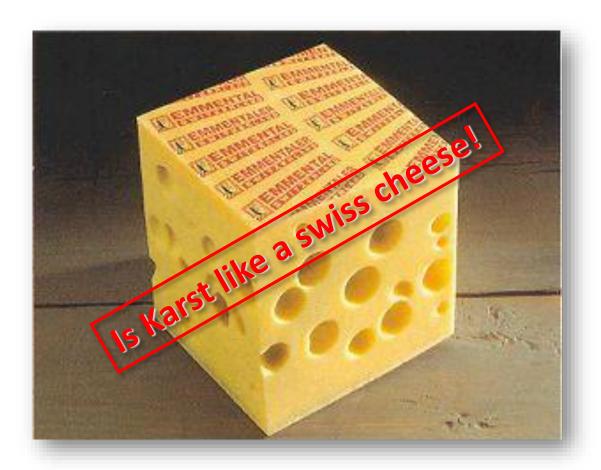
- Problématiques pour l'environnement:
 - Effondrements
 - Drainages









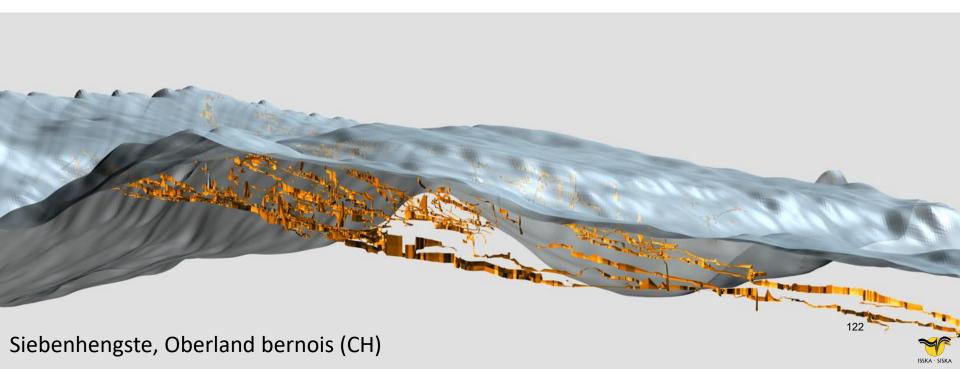


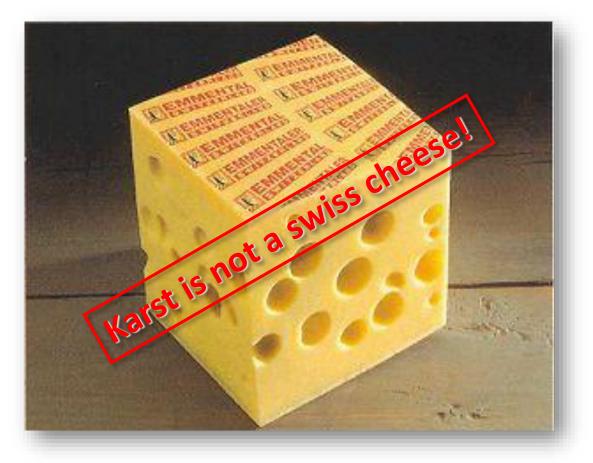
La karstification serait elle un processus «aléatoire»?





- Réseaux karstiques → structuration non aléatoire
- Organisation paramètres de contrôle (géologie, hydrologie, paléoenvironnement, etc.)





... des méthodes sont possibles



KarstALEA

- Méthode de prévision/caractérisation des dangers liés au karst pour constructions souterraines:
 - Tunnels, galeries
 - Sites d'enfouissement
 - Barrages, etc.
- Disponible en allemand pour l'instant



https://www.isska.ch/pdf/De/Rd/KarstALEA.pdf



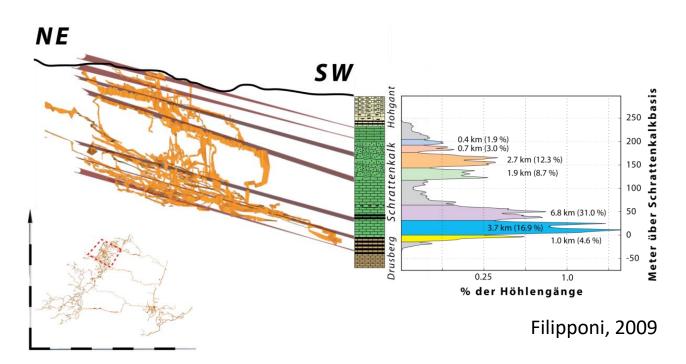
KarstALEA

- Step-by-step méthode
- _ 3D
- Deux principes de base:
 - Horizons d'inception
 - Domaines spéléogénétiques
- Compatible projets ingénieurs



Concepts

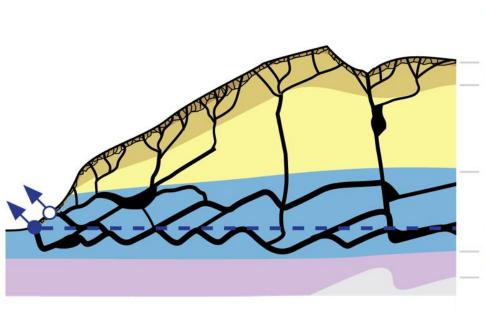
- − Horizons d'inception → karstification préférentielle
- > 70% des conduits sur horizons d'inception:
 - Stratigraphique / lithologique
 - tectonique





Concepts

- Domaines spéléogénétiques → formes/organisation des vides karstiques
- 5 domaines distincts













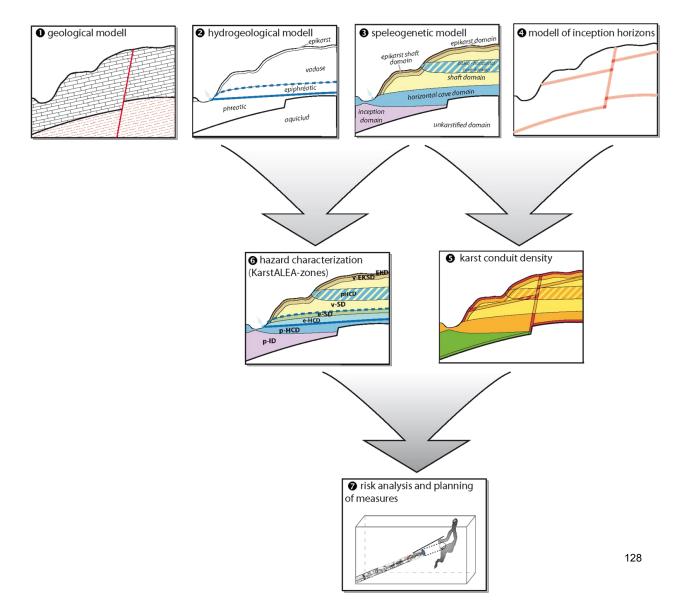
Epikarst Puits de l'epikarst

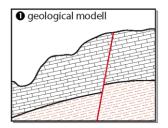
Puits de la zone vadose

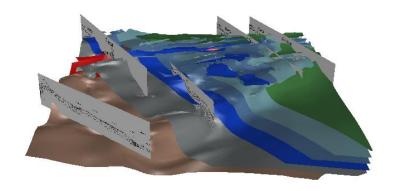
Conduits phréatiques

Domaine d'inception Non karstique

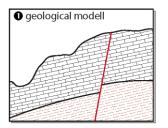


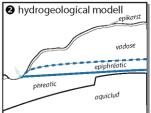


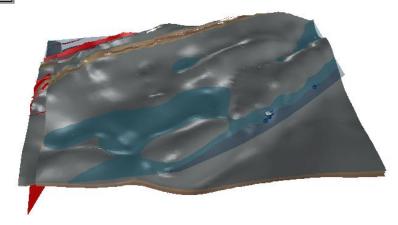




- Modèle géologique 3D
- Discrétisation unités + discontinuités tectoniques

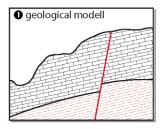


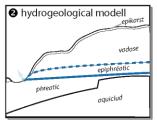


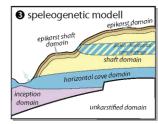


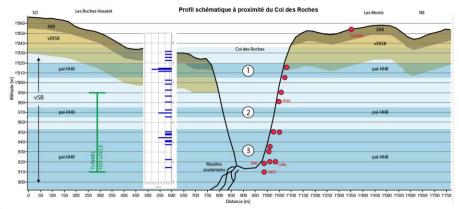
- Modèle hydrologique 3D:
 - Unités aquifères vs. non-aquifères
 - Position / extension des zones noyées de l'aquifère





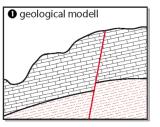


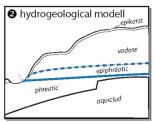


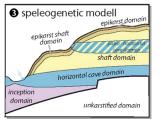


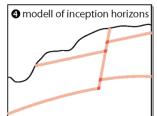
- Modèle spéléogénétique
 - Etude des grottes existantes, indices karst en forage, etc.
 - Comparaison altitudinale

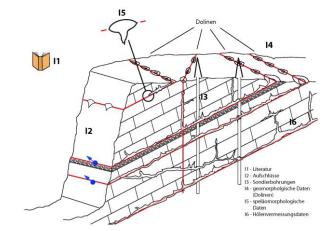






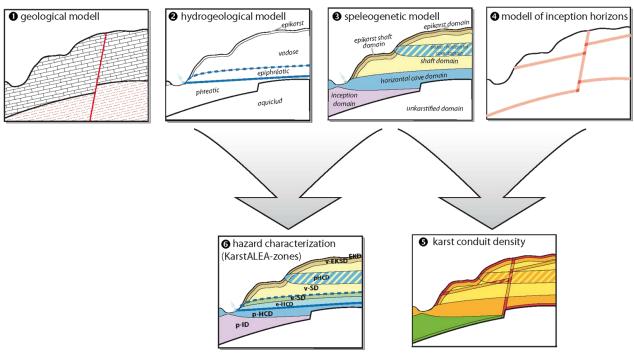






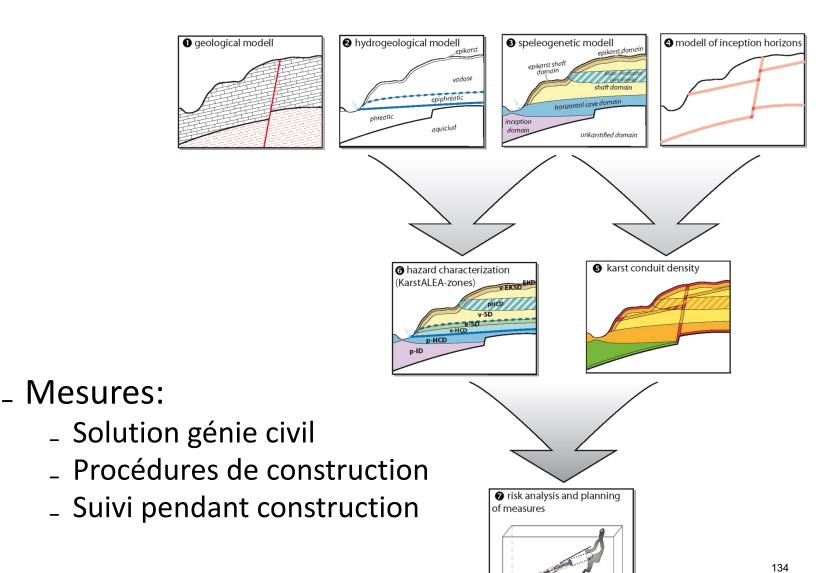
- Modèle horizons d'inception
 - Observations sur site, relations karst/strati et karst/tecto
 - Indices géomorphologiques, spéléologiques, etc.



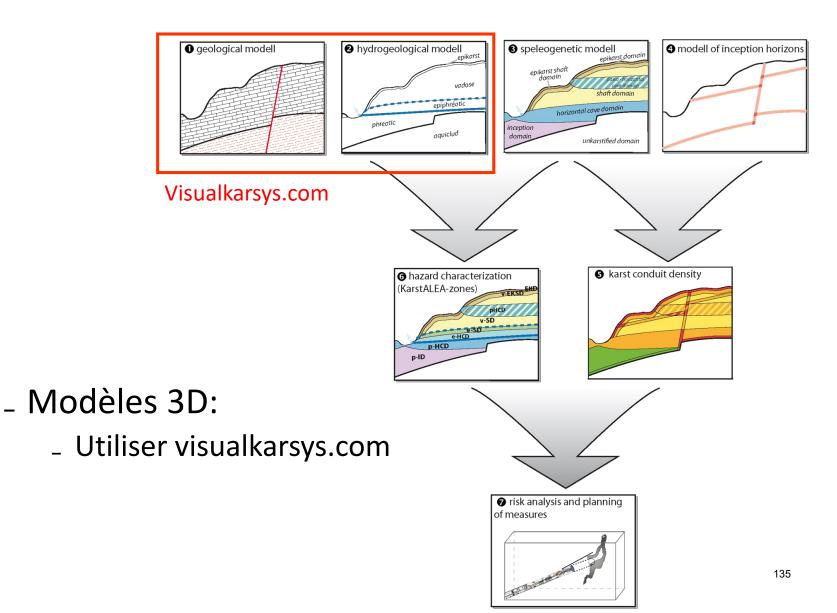


- Modèles zones & densité
 - _ KarstALEA Zones → type de karstification
 - Conduit density → probabilité relative d'occurence



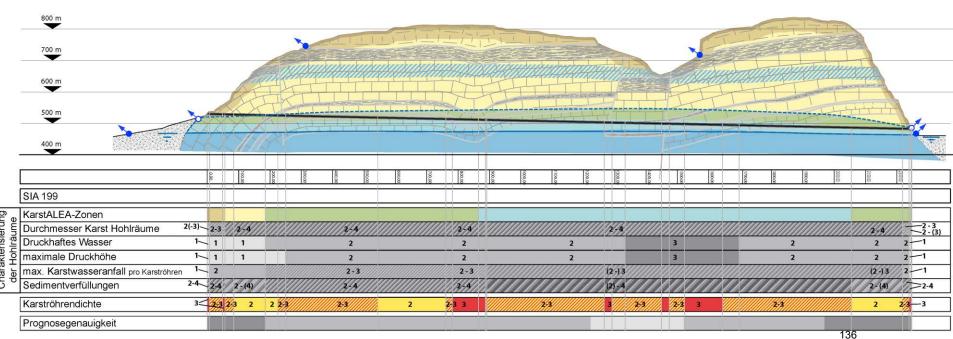






KarstALEA: résultats

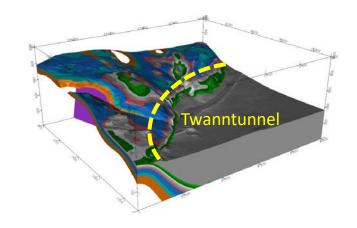
- Caractérisques des zones de karst (taille, type, etc.)
- Aléas associés (eau, sédiments, etc.)
- Densité relative et pobabilité d'occurence

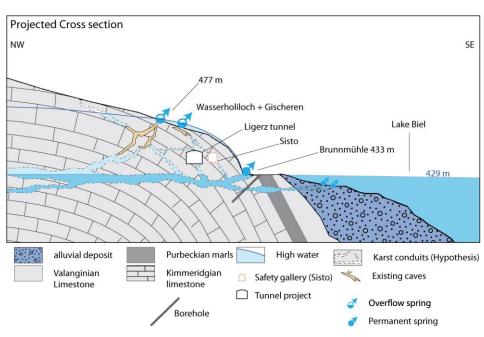




KarstALEA: application tunnel

- Tunnel routier
- Présence de sources permanentes, sources de trop plein, gouffres, etc.
- Bassin d'alimentation supérieur à 50 km²
- Tunnel en zone de battement (épiphréatique)







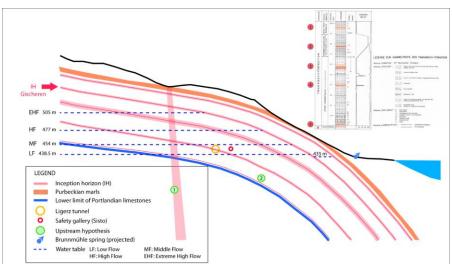
KarstALEA: application tunnel

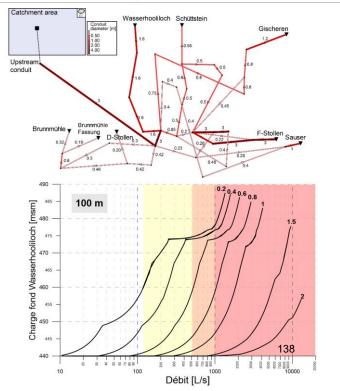
Etapes

- Modèle géol. 3D
- Modèle des aquifères + nappes karstiques
- Identification des horizons d'inception
- Domaines spéléogénétiques

Modèle hydraulique

- Monitoring + investigations
- Organisation conduits
- Scénarios hydrauliques



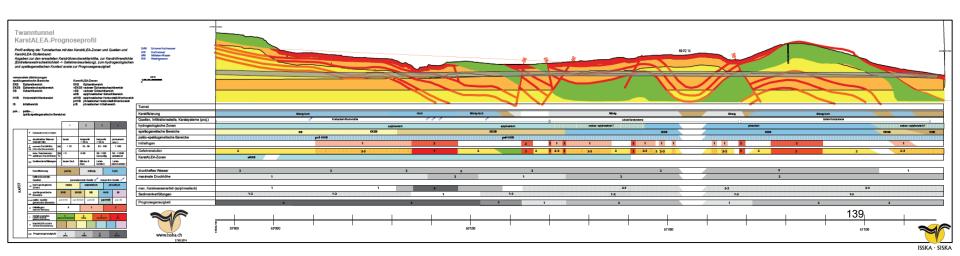




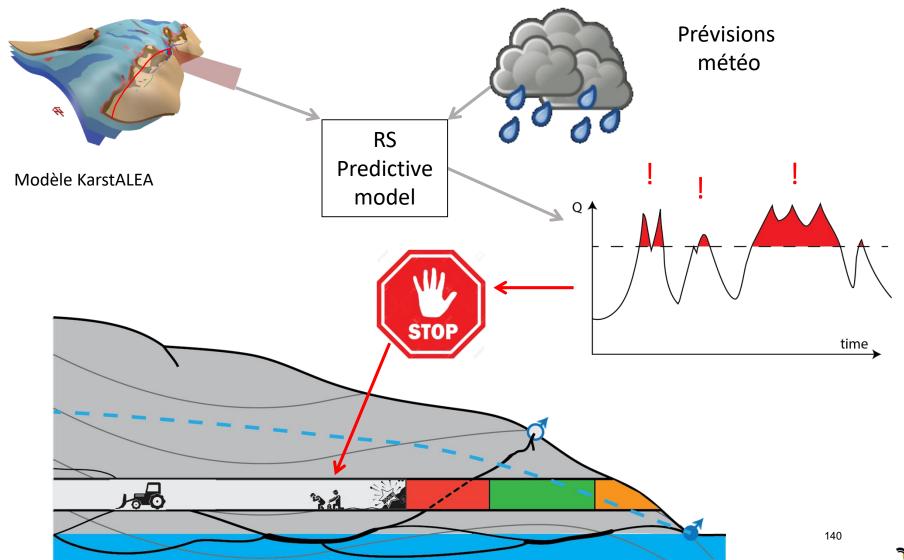
KarstALEA: application tunnel

- Risques:

- Vides karstiques > 1 m
- Venues d'eau >10 m³/s
- Investigations complémentaires
- Mesures d'accompagnement chantier
- Suivi (monitoring, realtime modelling, etc.)



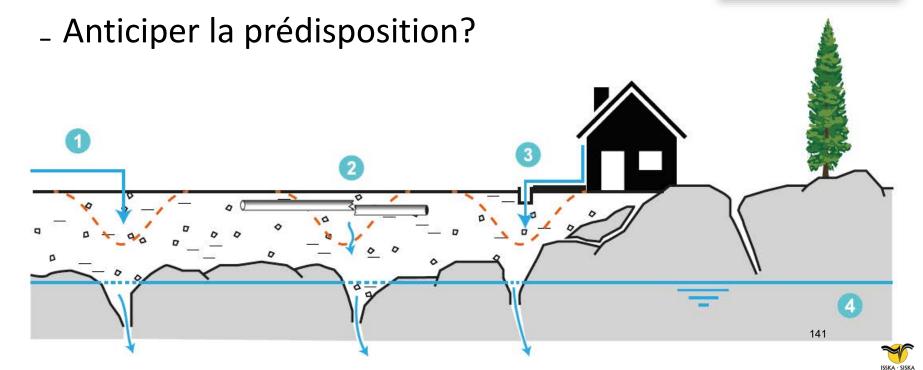
KarstALEA: extensions prévisions / alarmes





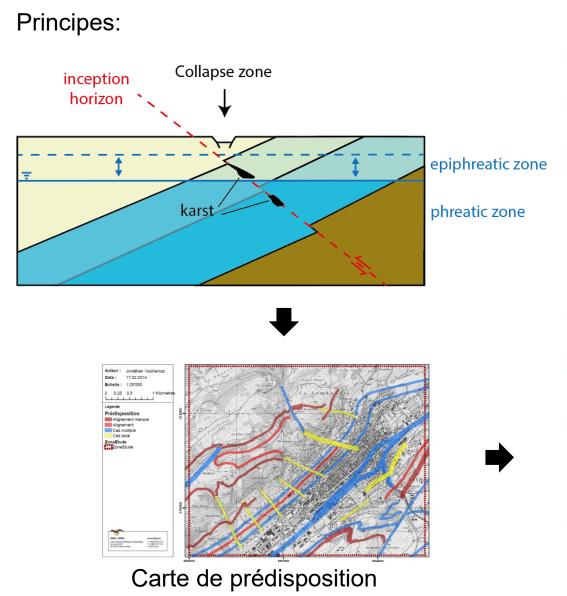
KarstALEA: extensions effondrements

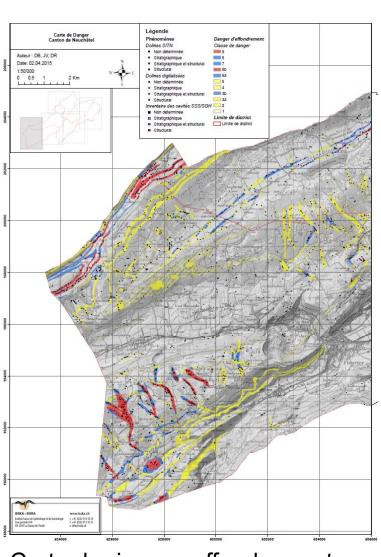
- Effondrements en milieux karstiques:
 - Plusieurs causes (conjonction facteurs)
 - Phénomènes lents vs. rapides
 - Rôle de la couverture





KarstALEA: extensions effondrements





Carte de risques effondrements



KarstALEA: conclusions

- Méthode spécifique pour:
 - Ouvrages souterrains
 - Autres aménagements de (sub)surface
 - Risques d'effondrements
- Orientée génie civil / ingénierie
- Étapes explicites et applications itératives
- Documentation disponible
- Modèles géologiques et hydrologiques réalisables avec visualkarsys.com



KarstALEA vers «karst toolbox»

- Idée: gérer les différents usages du karst de manière explicite et intégrée
 - Ressources en eau,
 - Risques naturels,
 - Aménagements
 - etc.
- Capitaliser les données et informations liées au karst pour mieux documenter les aspects géologiques, hydrogéologiques, spéléogénétiques, etc.
- Produire et fournir des modèles conceptuels explicites sur des principes validés scientifiquement
- Etablir des consensus de compréhension entre les acteurs du projet



KarstALEA vers «karst toolbox»



Global Local Région Aquifère **Projet KarstALEA** Carte Karst **KARSYS** KarstFLOWSIM Ouvrages souterrains Gestion des épandages Evaluation ressources en eau Aménagements Gestion environnement • Faisabilité géothermie Evaluation ressources • Risques effondrement Géotopes Evaluation projet • Risques crues Evaluation projet Zones de protection des eaux Hydroélectricité Infiltration Geothermics GW-Vulnérabilité

protection



Focus: carte du karst

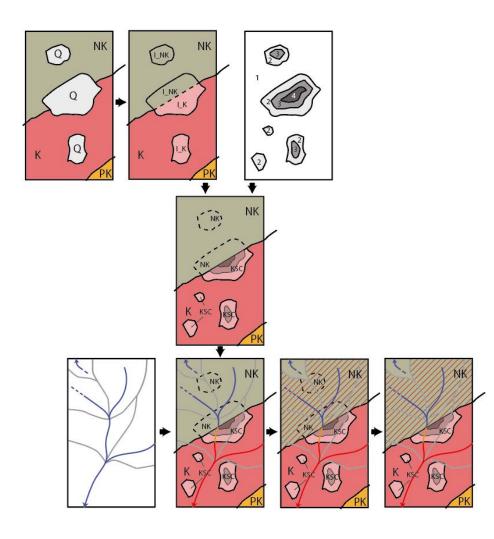


Carte **d'infiltrabilité** en milieu karstique:

- Formations à l'affleurement
- Formations sous couverture (épaisseur des formations de couverture)
- Cours d'eau et plans d'eau
- Surfaces d'alimentation autogéniques vs. allogéniques
- Éléments de géomorphologie karstique (dolines, cavités, etc.)

Carte **d'épaisseur** des formations de couverture:

- Traitement croisé d'informations
- Classes d'épaisseur

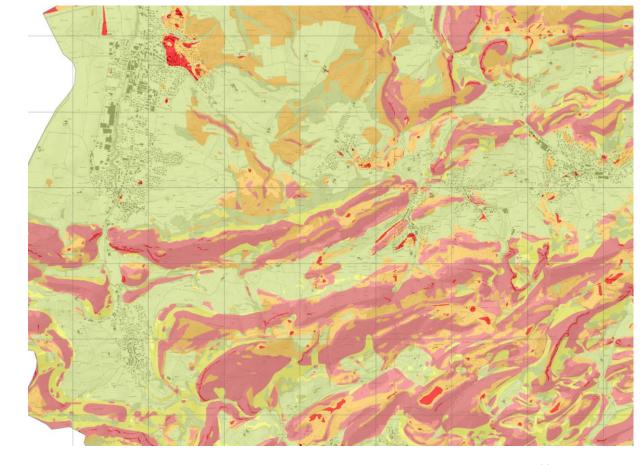


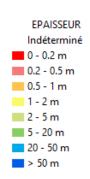


Focus: carte du karst



Epaisseur des formations de couverture





Focus: carte du karst



Carte Karst

LEGENDE

Infiltration karst GWN 25

Infiltration probable ou démontrée

Infiltration supposée

Infiltration négligeabe

Infiltrabilité

Indéterminé

Karst à l'affleurement

Karst sous couverture (> 2 m)

Semi-karstique à l'affleurement

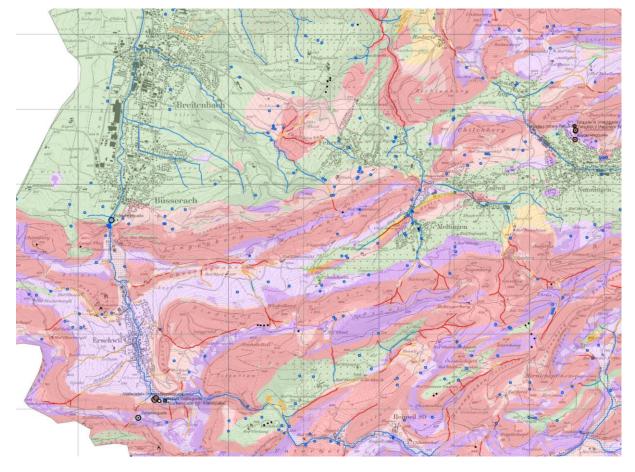
Semi-karstique sous couverture (> 2 m)

Karst évaporitique à l'affleurement

Karst évaporitique sous couverture (> 2 m)

Non-Karst

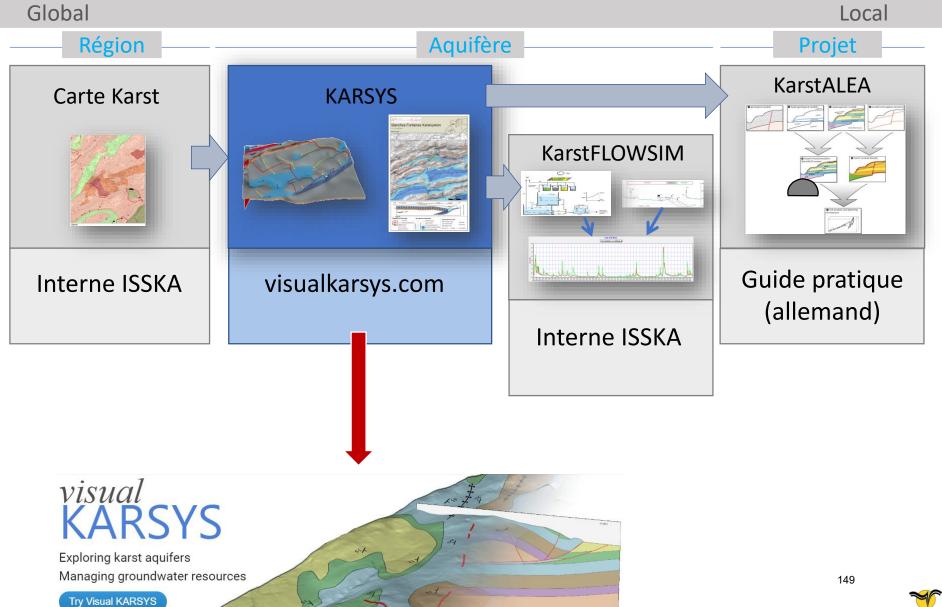
Non-Karst - alimente le karst en aval





«Karst Toolbox»





Visualkarsys.com

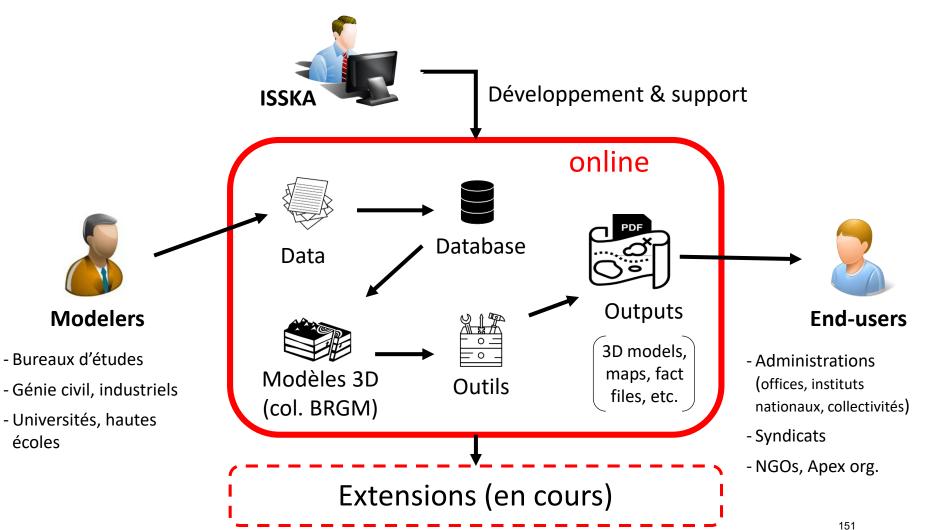


- Service web pour modélisation 3D des aquifères karstiques
- Service «free of use», même pour utilisation commerciale
- Bases de données / documentation pour KarstALEA
- 450 utilisateurs + cours online (4-5 cours/an, 20-25 participants)



Visualkarsys.com







Conclusions

- KarstALEA = une méthode appliquée pour la prévision des aléas liés au karst
- KarstALEA = 1 brique de la «karst toolbox»
- Karst toolbox en cours d'implémentation avec:
 - Carte du Karst
 - visualkarsys.com
 - D'autres outils à venir (recharge, flow simulation, etc.)



Références

Filipponi M (2009) Spatial Analysis of Karst Conduit Networks and Determination of Parameters Controlling the Speleogenesis along Preferential Lithostratigraphic Horizons. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, PhD dissertation. 305 p.

Filipponi M, Jeannin PY (2008) Prediction of karst occurrences by interpreting borehole data within the Inceptions Horizon Hypothesis. Proceedings of the 11th Sinkhole Conference. .

Filipponi M, Schmassmann S, Jeannin PY, Parriaux A (2012) Karstalea: wegleitung zur prognose von karstspezifischen gefahren im untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA.

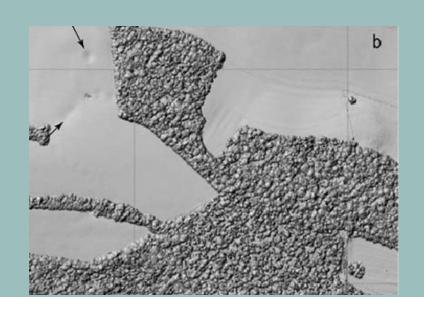
Jeannin PY, Malard A, Rickerl D, Weber E (2015) Assessing karst-hydraulic hazards in tunneling - the Brunnmühle spring system - Bernese Jura, Switzerland. Environmental Earth Sciences, 74(12): 7655-7670 p.

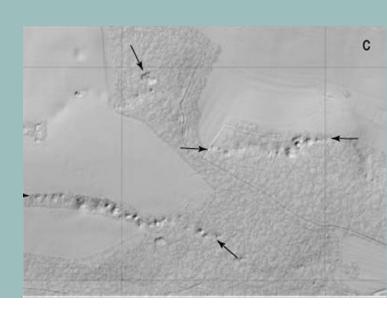
Malard A, Randles S, Hausmann P, Bucev M, Lopez S et al. (2018) Visual KARSYS, a web-platform for the documentation of karst aquifers including online geological modelling. Delivering Subsurface Models For Societal Challenges - 4th meeting of the European 3D Geomodelling community, 21st to 23rd February 2018, Orléans, France. 39.

Neukomm M, Mercier M, Jeannin PY, Malard A, Rickerl D et al. (2019) Adapting tunnel construction to hydrogeological conditions in a karst region. Proceedings of the World Tunnel Congress, May 3rd to 9th 2019, Naples, Italy.

APPORT DU LIDAR DANS L'ÉTUDE DES DÉSORDRES KARSTIQUES (CAS DU BARROIS, MEUSE)







Journées d'échanges techniques Mouvements de terrain en milieu karstique : processus, méthodes et études de cas.

Kamila Bensaadi Géographe-Géomorphologue Univ. de Lorraine - LOTERR





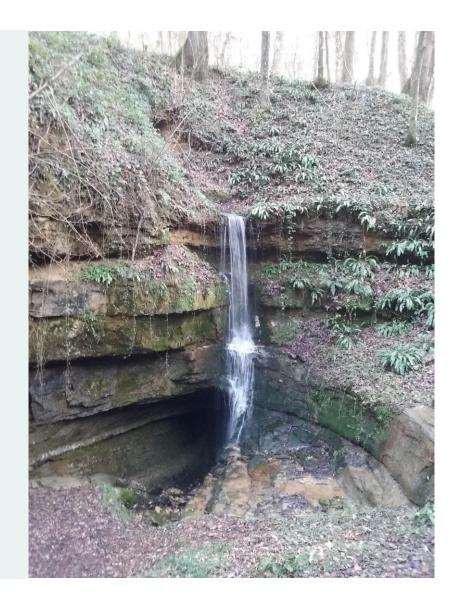


PLAN DE L INTERVENTION

I. Le karst du Barrois, contexte

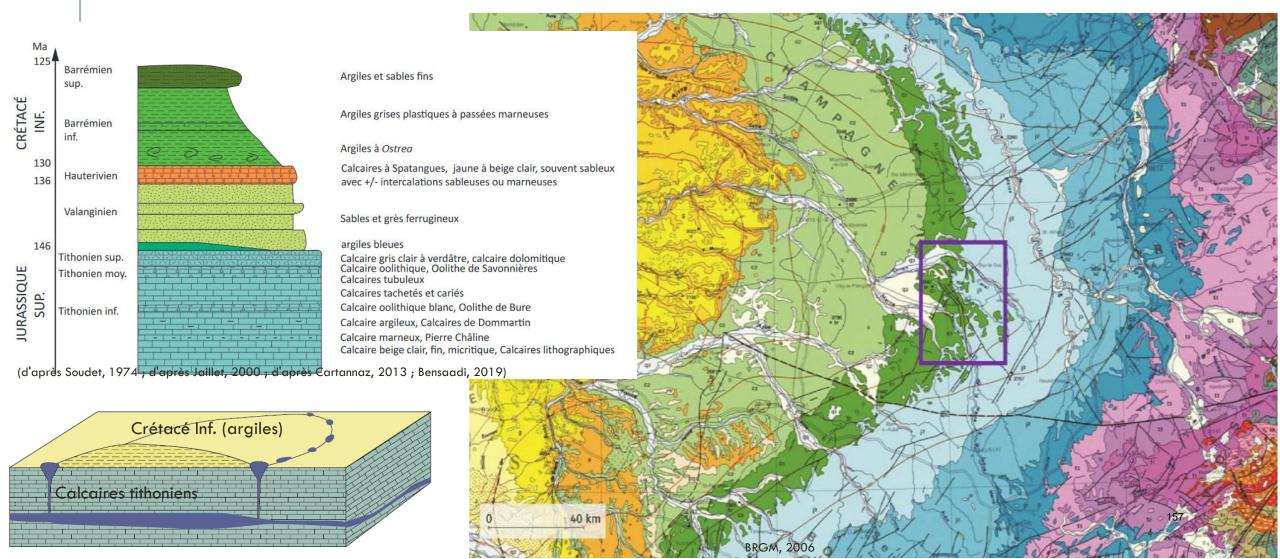
II. Le LiDAR aéroporté

III. Apports du LiDAR dans l'étude du Karst du Barrois



LE KARST DU BARROIS

UN KARST AU CONTACT DU JURASSIQUE ET DU CRÉTACÉ



DES FORMES ET PHÉNOMÈNES MULTIPLES



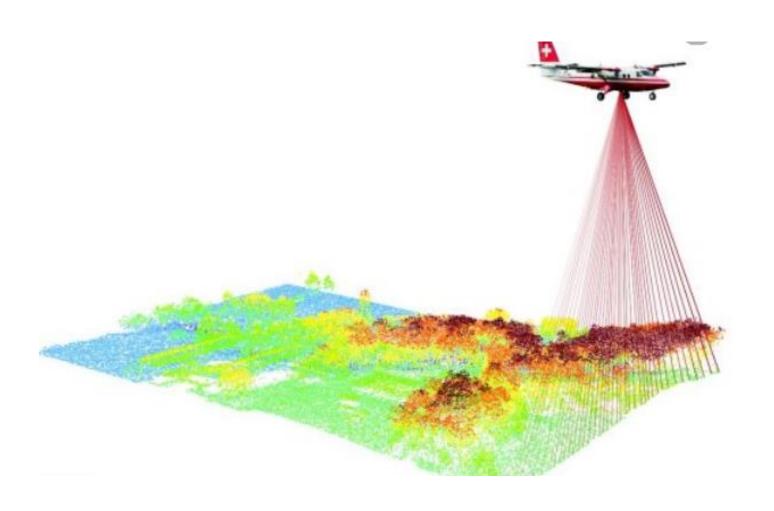
Aven de la Taille-Clergé, Lisle-en-Rigault (diam. 6m)

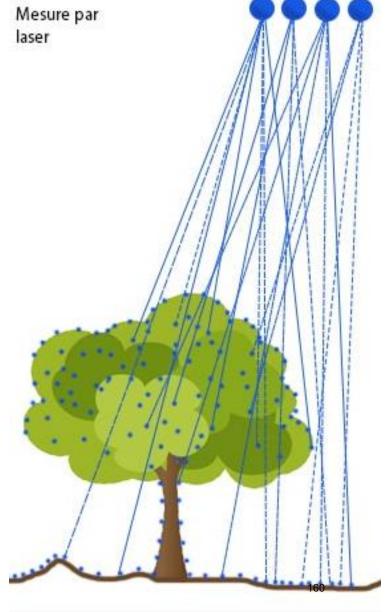


LIDAR

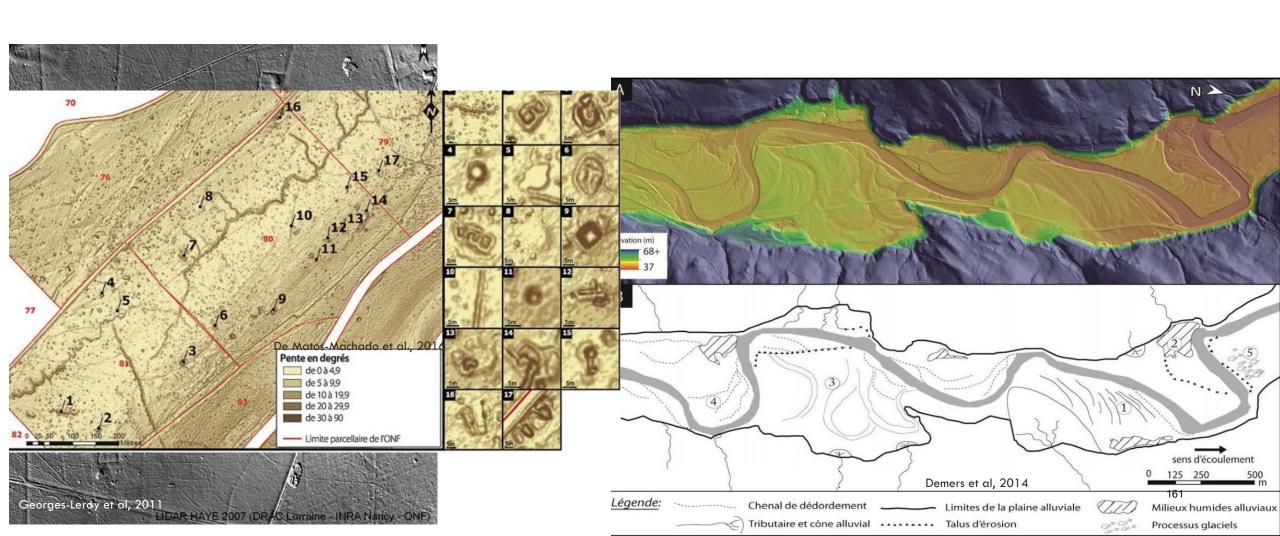
LIGHT DETECTION AND RANGING



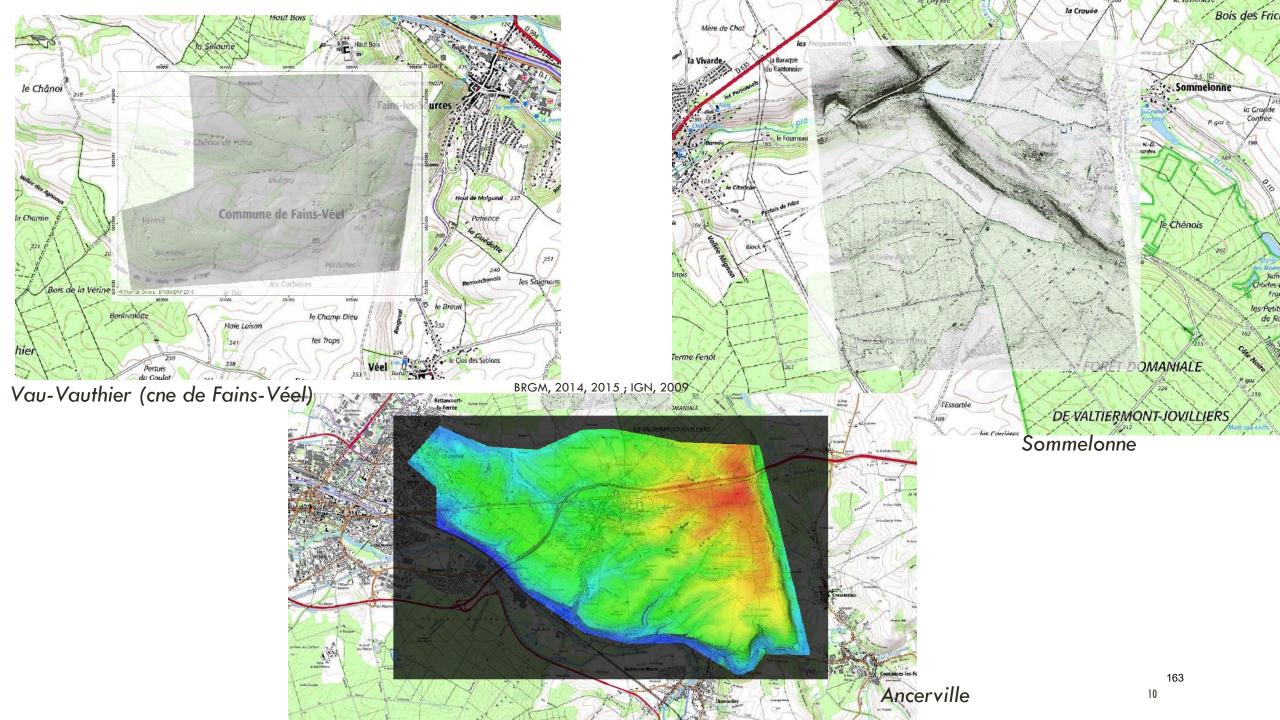




LIDAR : DES MNT HR AU SERVICE DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE



LIDAR - BARROIS 219 to Chaudiere Rois des Saignaure DDT 55,2015; IGN, Bon St-Pierre M Pani de Per BOIS BROLE 162 DDT 55, 2015; IGN, 2009

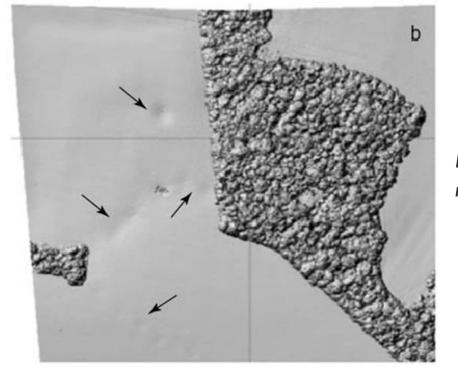


APPORTS DU LIDAR POUR LE KARST DU BARROIS

OPTIMISATION POUR LA DÉTECTION

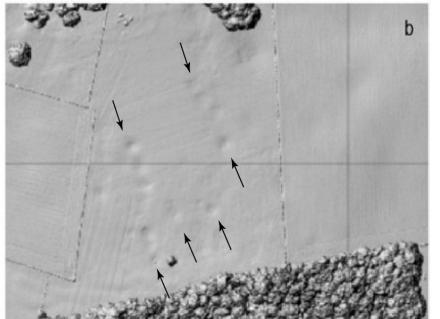






Des désordres aisés à repérer





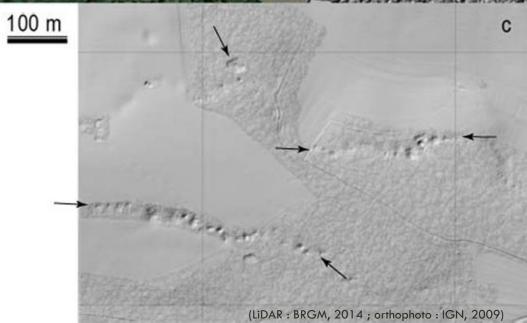
Des désordres moins visibles.

166

(LiDAR: BRGM, 2014; orthophoto: IGN, 2009)

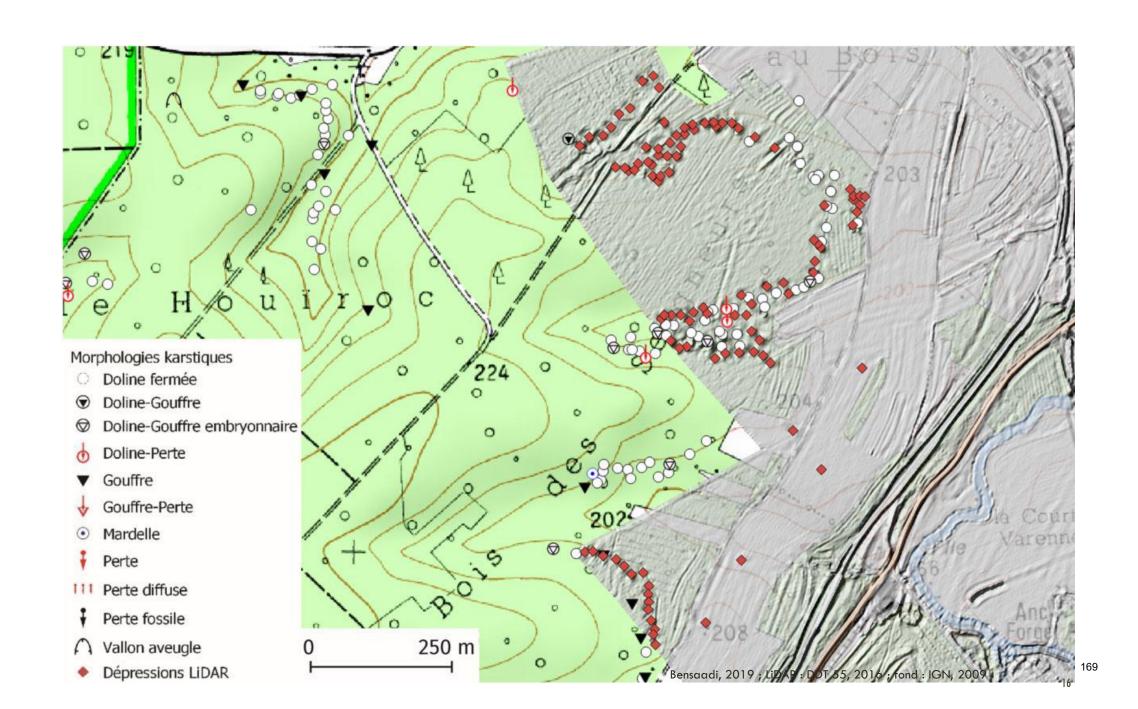


Des désordres impossibles à repérer sur les seules photographies aériennes.



GAIN PRÉCIEUX : LA PRÉCISION



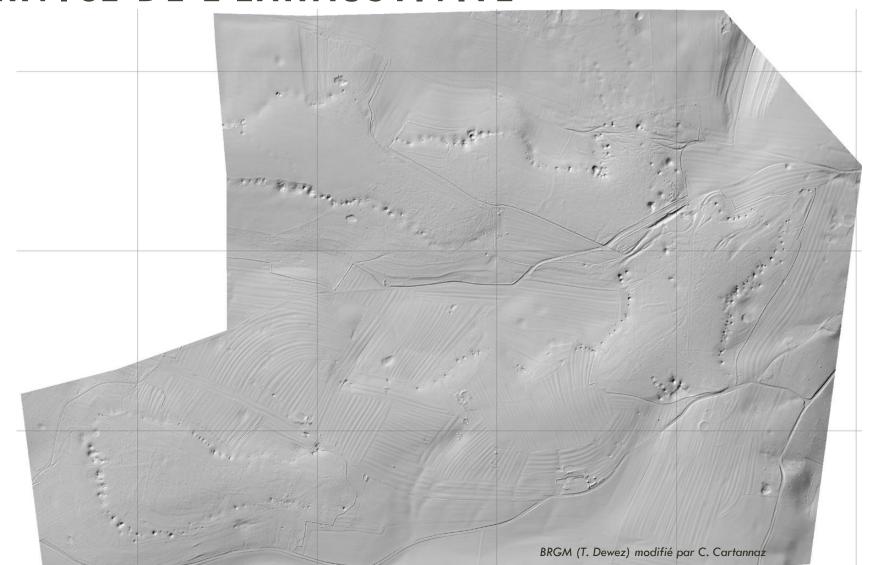


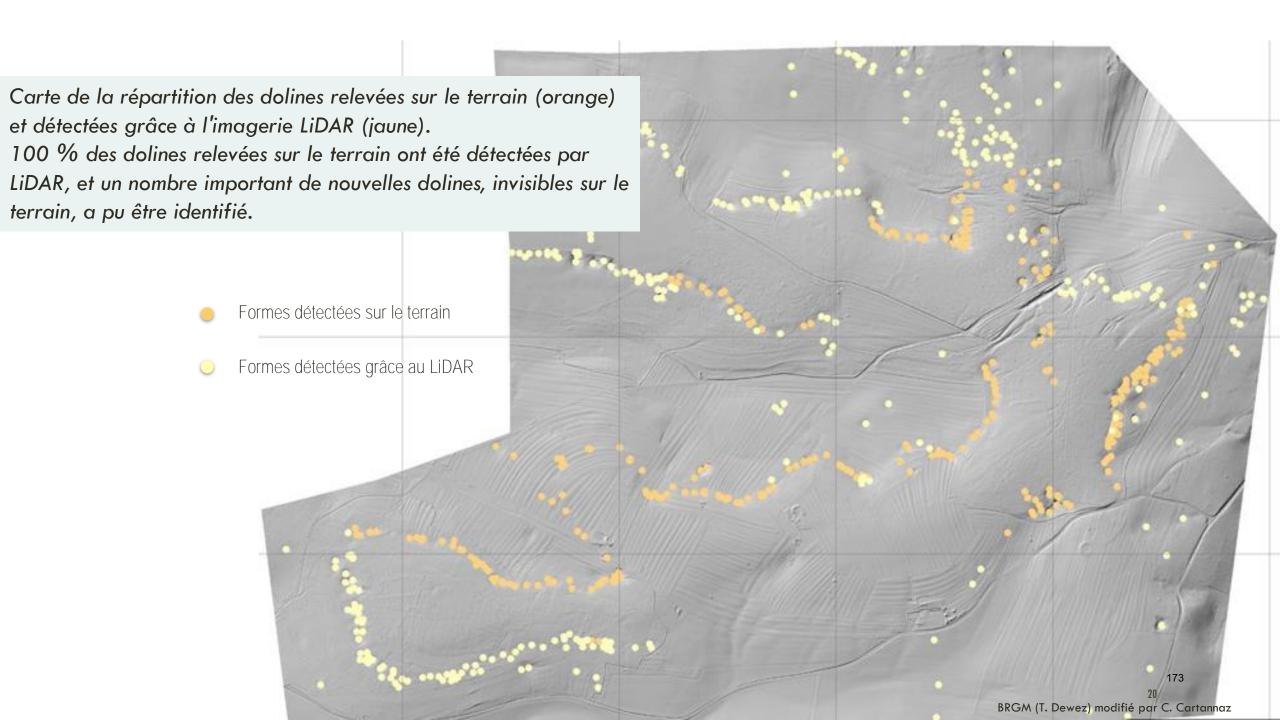


LIDAR, GAIN D'EXHAUSTIVITÉ



AU SERVICE DE L'EXHAUSTIVITÉ

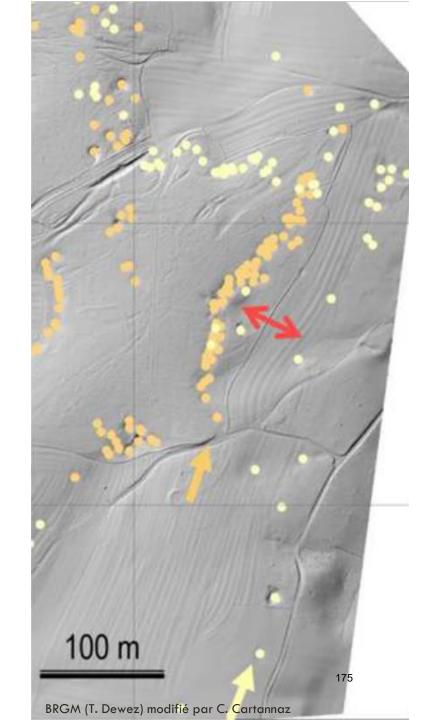




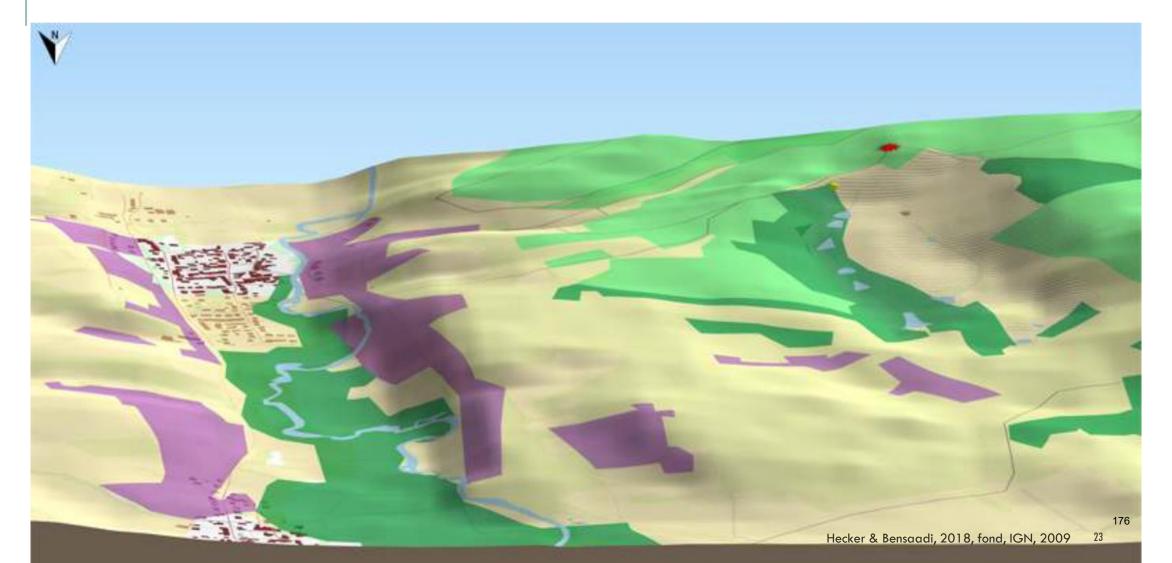
APPUI POUR TRACER LA CARTE STRUCTURALE

MESURE DE L'ÉROSION?

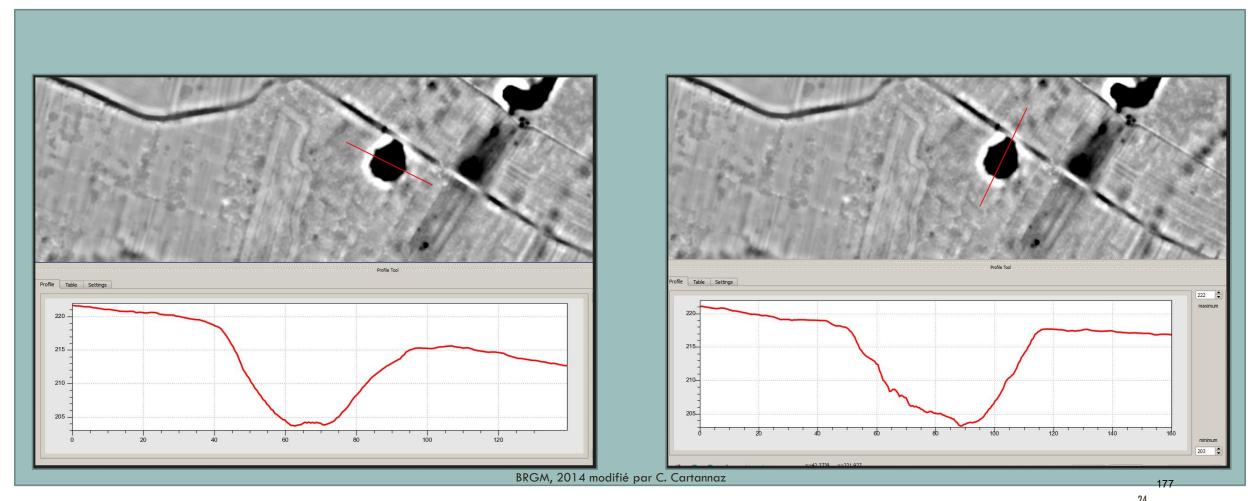
- Formes détectées sur le terrain
- Formes détectées grâce au LiDAR
- Liseré actif actuel
- Liseré inactif
- Potentiel recul de couverture ?



RECONSTITUTIONS DES PAYSAGES ?



DES DONNÉES TRÈS PRÉCISES



CONCLUSION

L'imagerie LiDAR ne remplacera jamais le travail de terrain

Mais s'est révélé être un outil très puissant, en particulier dans l'étude des karsts de contact lithostratigraphique

Et permettrait d'envisager des études de surveillance au long cours de quantification de l'évolution du karst à l'échelle d'un massif karstique



APPORT DU LIDAR DANS LA COMPRÉHENSION DES DÉSORDRES KARSTIQUES (CAS DU BARROIS, MEUSE)

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Journées d'échanges techniques Mouvements de terrain en milieu karstique : processus, méthodes et études de cas.

Kamila Bensaadi Géographe-Géomorphologue Univ. de Lorraine - LOTERR







BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

Bensaadi K. (2020) Caractérisation et susceptibilité aux effondrements dans un karst de contact lithostratigraphique : l'exemple du Barrois. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, 407p.

Bensaadi K., Hecker A. (2019) Le LiDAR: vers une meilleure connaissance des paysages du karst. Projets de paysage: revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace, Ecole nationale supérieure du paysage de Versailles

Cartannaz C., Dewez T. (2015) – Outils de traitement des Modèles Numériques de Terrain (MNT) pour la détection de cuvette. Rapport final. BRGM/RP-65463-FR, 57 p., 44 fig., 2 ann., 1 CD.

Demers S., Olsen T., Buffin-Bélanger T., Marchand J.-P., Biron P., Morneau F., (2014) « L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec) », Physio-Géo [En ligne], Volume 8 | 2014, mis en ligne le 10 février 2014, URL : http://journals.openedition.org/physio-geo/3813; DOI : https://doi.org/10.4000/physio-geo.3813

Georges-Leroy M, Bock J., Dambrine E., Dupouey J.-L. (2013) « Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye », ArcheoSciences [En ligne], 35 | 2011, mis en ligne le 30 avril 2013. URL: http://journals.openedition.org/archeosciences/3015; DOI: https://doi.org/10.4000/archeosciences.3015

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

de Matos Machado R., Arnaud-Fassetta G., Bétard F. (2016) « Potentialités de l'outil LiDAR pour cartographier les vestiges de la Grande Guerre en milieu intra-forestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse) », EchoGéo [En ligne], 38 | 2016, mis en ligne le 13 décembre 2016, URL : http://journals.openedition.org/echogeo/14791 ; DOI : https://doi.org/10.4000/echogeo.14791

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

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





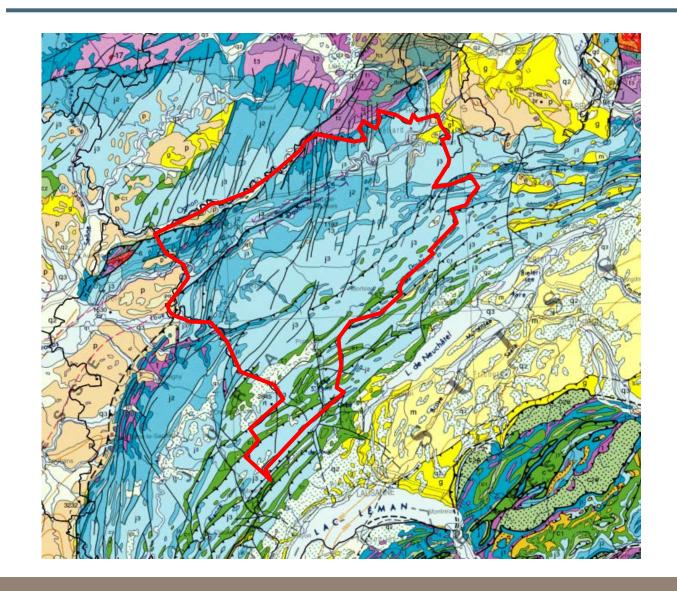
Phénomènes karstiques, quelques exemples impactant les infrastructures routières du Département du Doubs

Mouvements de terrain en milieu karstique : processus, méthodes et études de cas - 8 juin 2021

LOCALISATION



GEOLOGIE



CONSTAT

- Les cavités représentent 8 % des risques naturels géologiques traités à la direction des routes du Département du Doubs.
- 46 % de ces risques concernent les chutes de pierres et blocs.

- 39 % des glissements de terrains.
- Les 7 % restant, des coulées boueuses, inondations et autre.





- O Cavité de 2,5 m de profondeur x 3 m de longueur x 2,5 m de largeur
- Nombreux réseaux



- Fond de la cavité au même niveau que la canalisation d'eaux usées
- Odeur nauséabonde dans la cavité



- Réseau d'eaux usées probablement détérioré par d'autres travaux
- Soutirage des matériaux constitutifs des remblais par les circulations d'eau dans le réseau



Apparition d'une cavité et remontée du fontis en surface





 Cavité de 0,5 m de profondeur x 0,5 m de longueur plongeant sous la chaussée



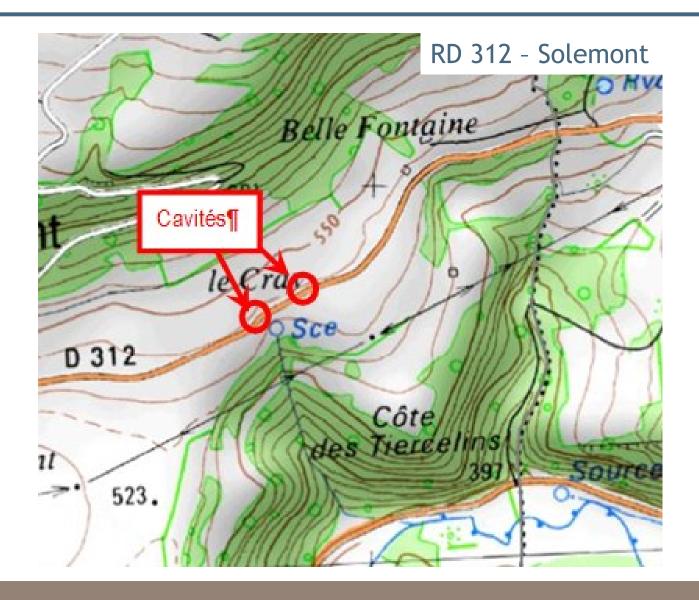
Ouverture de la cavité à la pelle pour visualiser l'origine du désordre

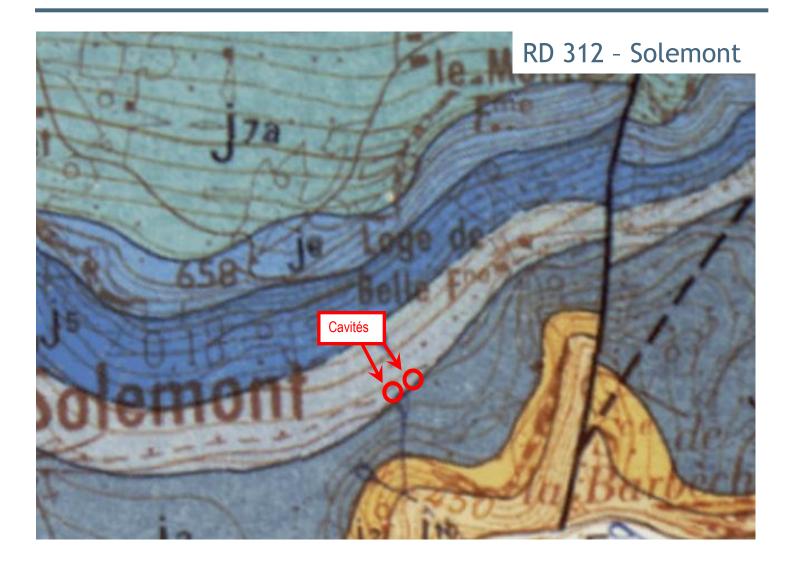


Découverte de bois en décomposition



 Ancienne souche d'arbre d'alignement non retirée et recouverte par un élargissement plus récent de la chaussée





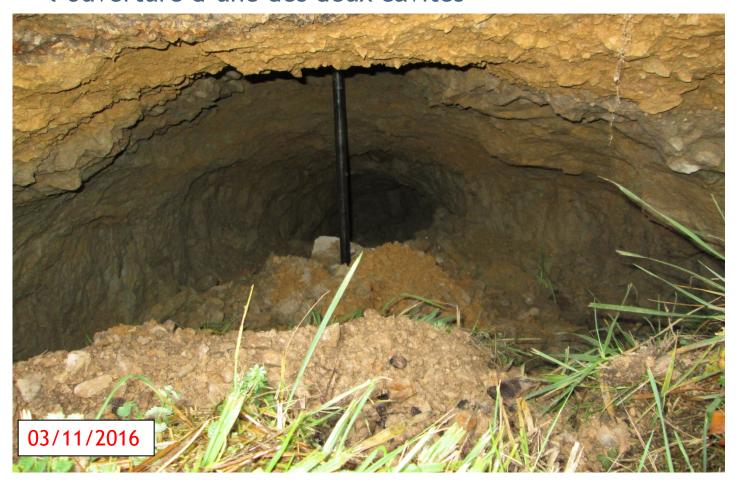


- 2 cavités distantes de 65 m
- Tailles limitées en surface

 Réalisation de sondages au pénétromètre dynamique pour essayer de circonscrire précisément l'extension des cavités et plus spécifiquement en profondeur



 Vue d'une tige du pénétromètre dynamique à travers l'ouverture d'une des deux cavités





Essai au pénétromètre dynamique à énergie constante

Reconnaissance de sols

Organisme : Sol Solution

Site: RD 312 - SOLEMONT Sondage: Sondage n°003.grz Date: 03/11/2016

Heure : 16:49 Opérateur : AB Responsable : PM

Conforme à la norme NF P 94-115

Localisation:

Type de repérage :

X: 47,344773 Y: 6,717712 Z: 547,00 m

Essai:

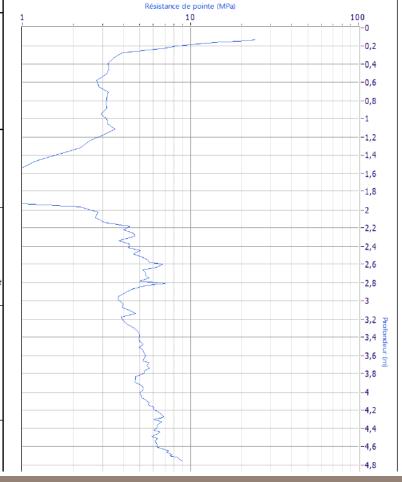
Profondeur visée: 0,00 m Profondeur atteinte: 4,75 m Nombre de coups: 121 Profondeur pré-forage: 0,12 m Condition arrêt: Volontaire

Caractéristiques :

Type d'appareil : GRIZZLY Etalonné le : Hauteur de chute : 0,76 m Masse du mouton : 63,5 kg Section de pointe : 20 cm²

Matériel étalonné par le ministère de l'équipement

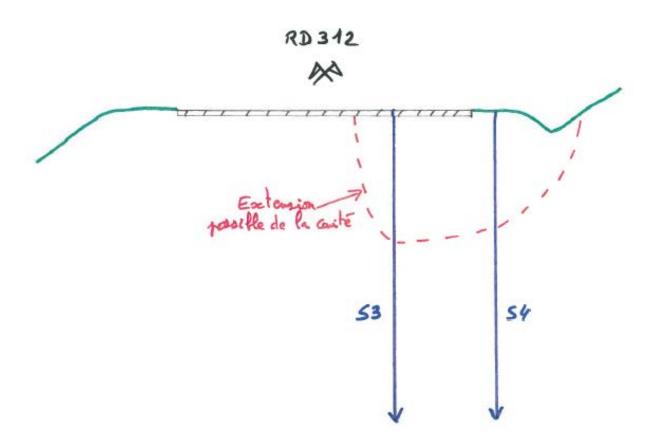
CER Rouen



Commentaires:

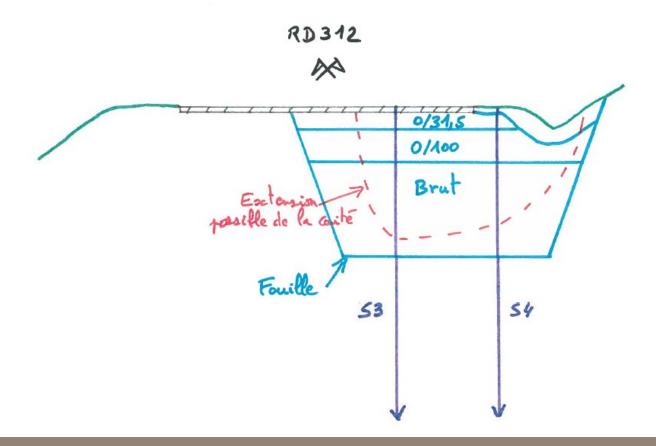
Coupe ochématique de la couté au 1/50

Echelle: 1m



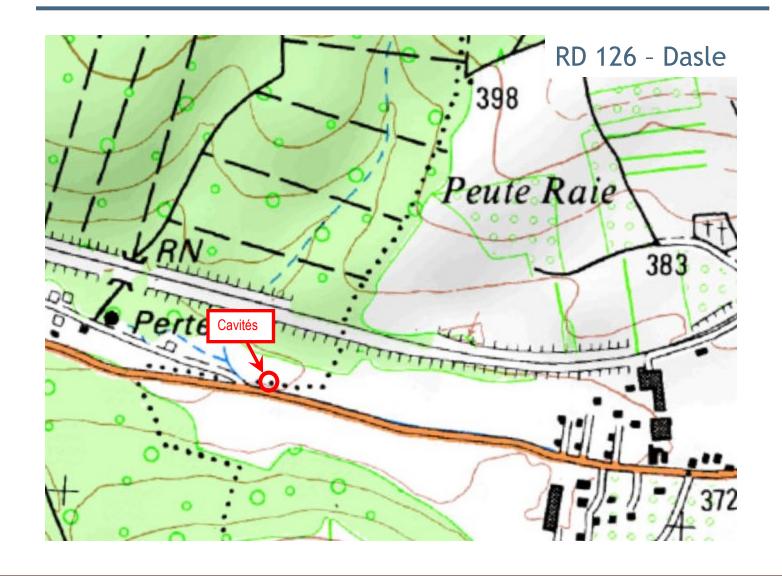
Coupe schématique du principe de traitement au 1/50

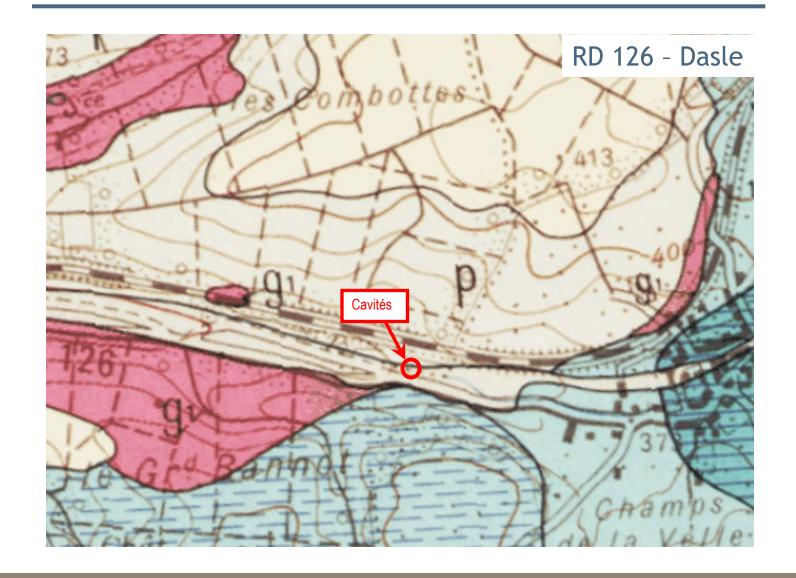
Echelle: 1m



 Terrassement de la chaussée jusqu'au toit des matériaux compacts et remblaiement







 Perte en bordure de la route départementale avec érosion des matériaux constituant son soubassement



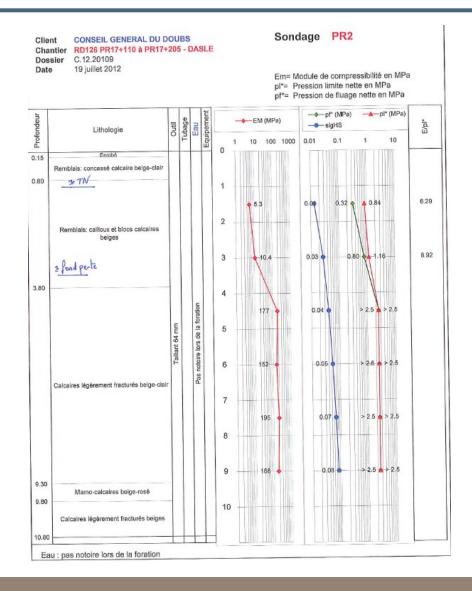
28/11/2011

Nouvelle perte en bordure de la route départementale



Nouvelle perte en bordure de la route départementale





 Après pré-forage, vibro-fonçage de palplanches pour soutenir les terrains meubles constituant l'assise de la route



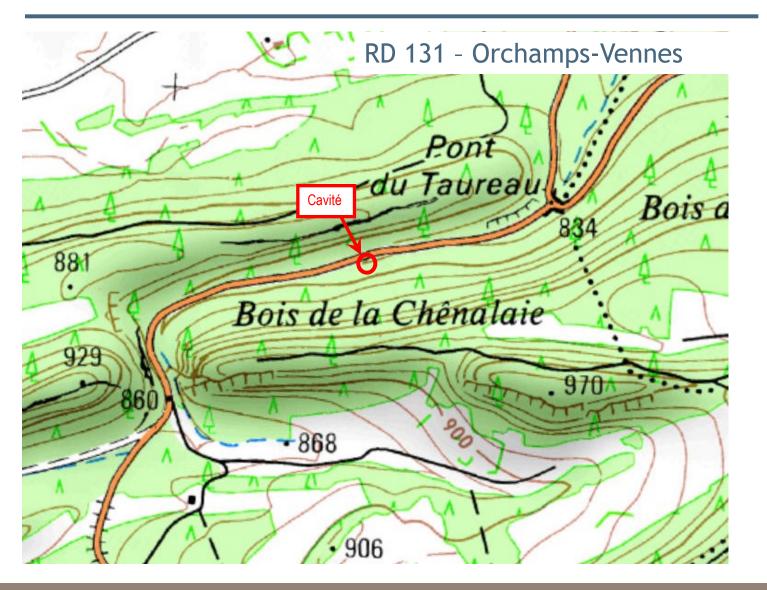


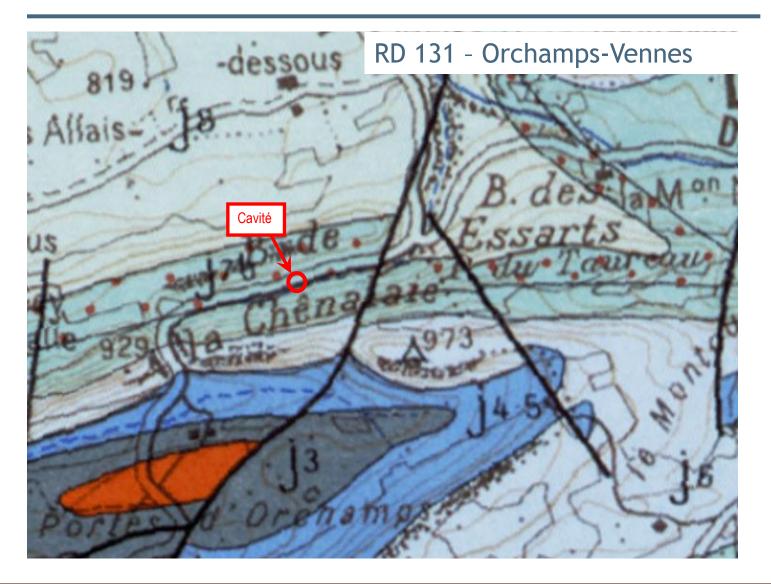
 Palplanches de 5 m de hauteur venant s'ancrer dans les calcaires





Pas de réapparition de désordres depuis la fin des travaux







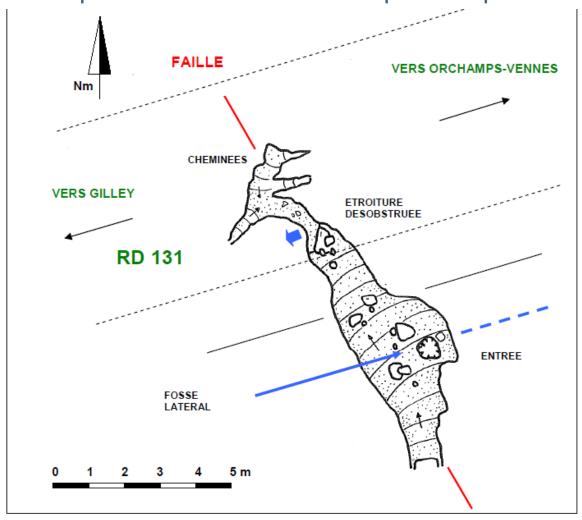
 Effondrement d'un fontis et découverte d'une cavité en bord de route départementale



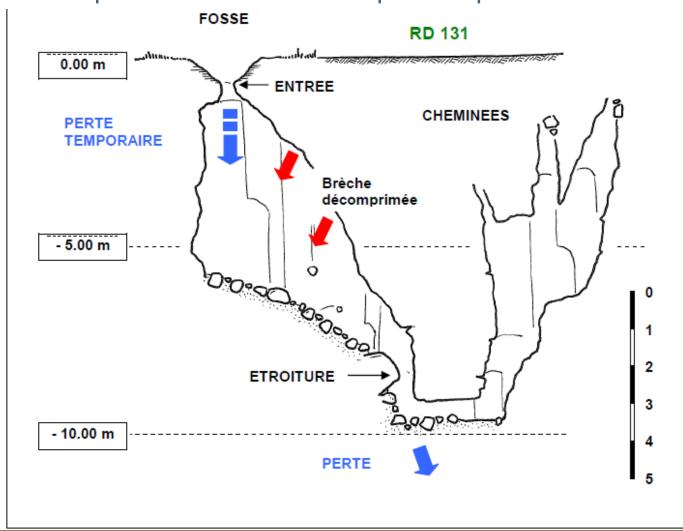
 Cavité de 6 m de profondeur x 4 m de longueur x 3 m de largeur

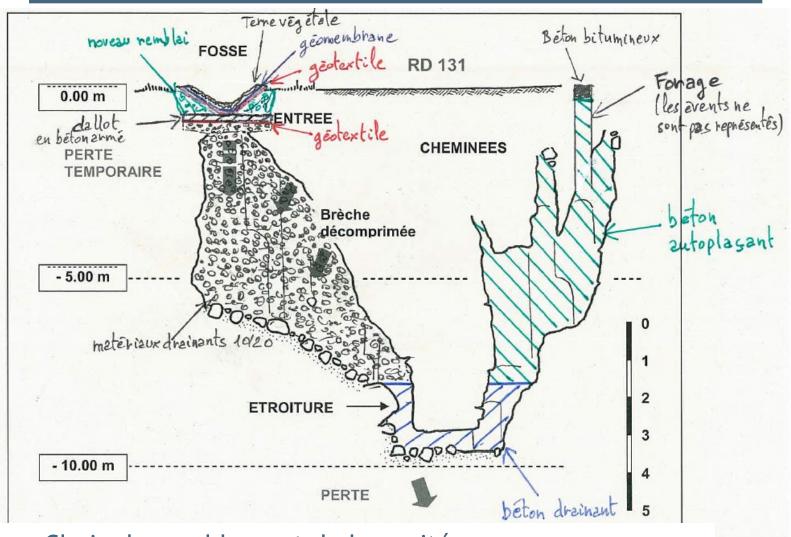


Vue en plan de la cavité relevée par les spéléos



Coupe de la cavité relevée par les spéléos

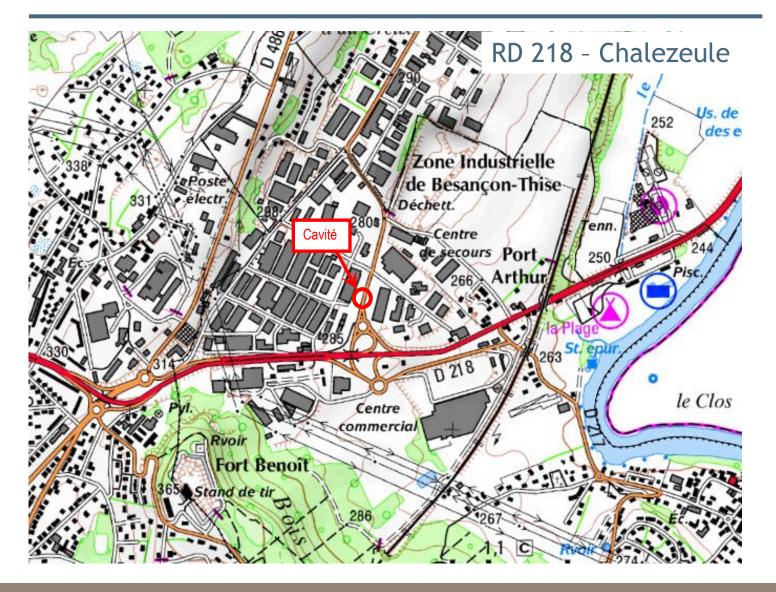


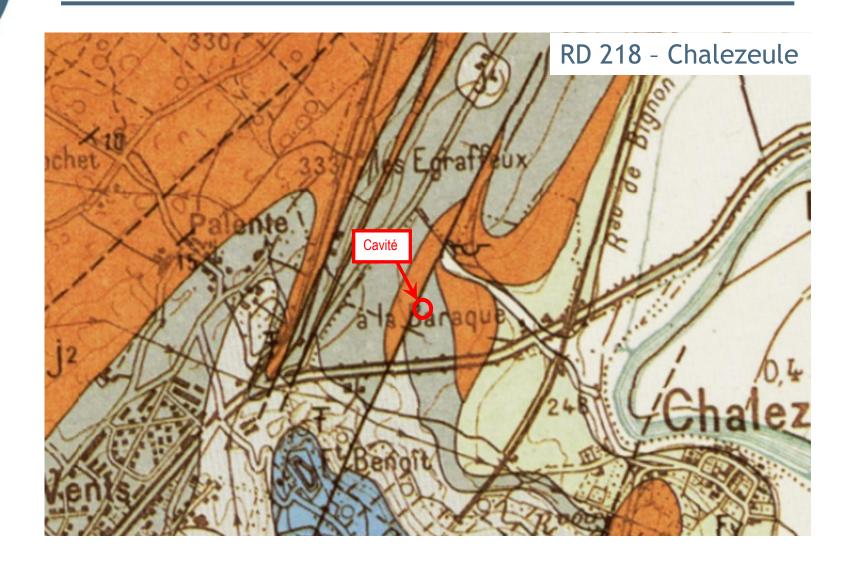


Choix de comblement de la cavité



Travaux de comblement de la cavité







Cavité de 20 m de profondeur x 3 m de diamètre



 Nécessité de faire intervenir une pelle pour agrandir l'accès et fournir un point d'ancrage aux spéléos

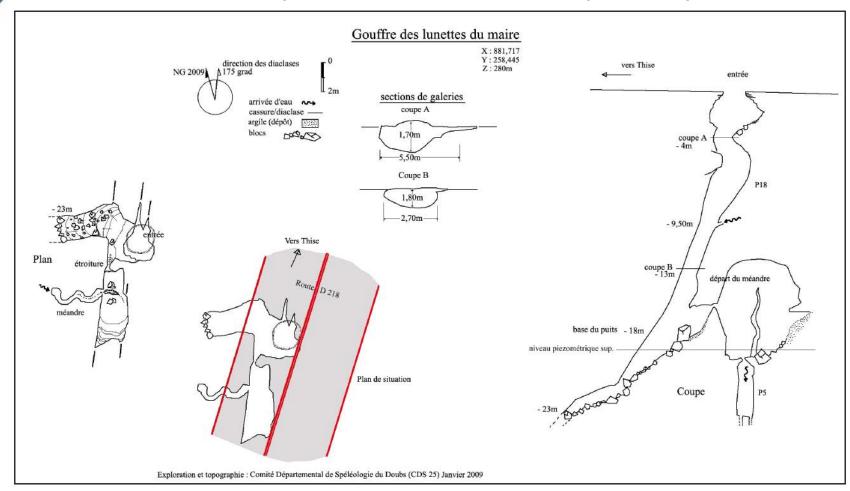


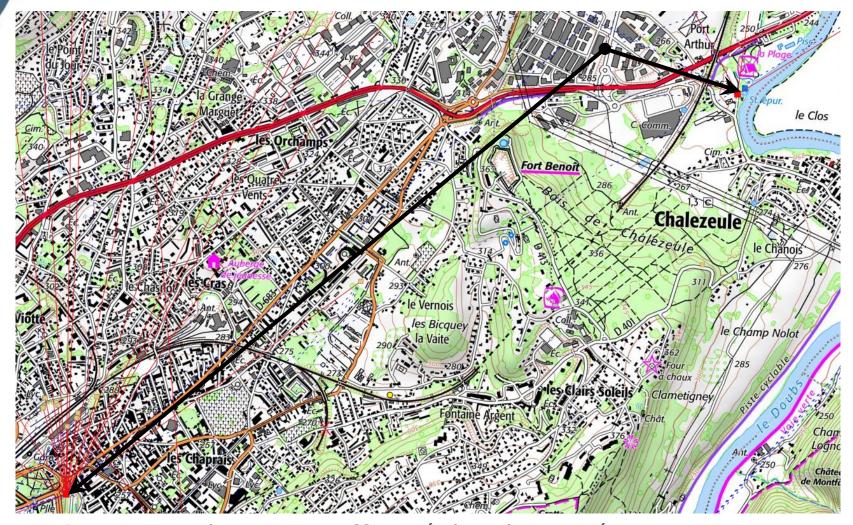
 Intervention des spéléos après vérification d'absence de gaz toxiques et sécurisation du puits d'accès





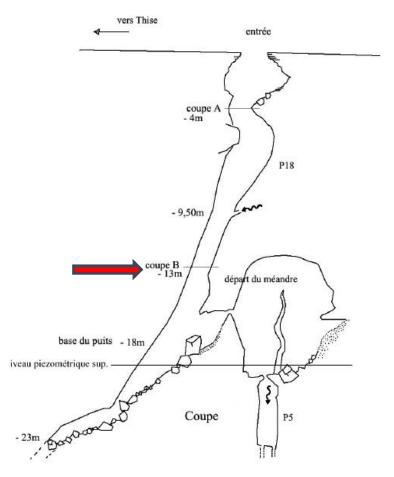
Plans et coupes de la cavité relevées par les spéléos





Restitution du traçage effectué dans la cavité

Création d'un bouchon s'appuyant sur les parois rocheuses de la cavité au niveau de l'étroiture située à - 13 m

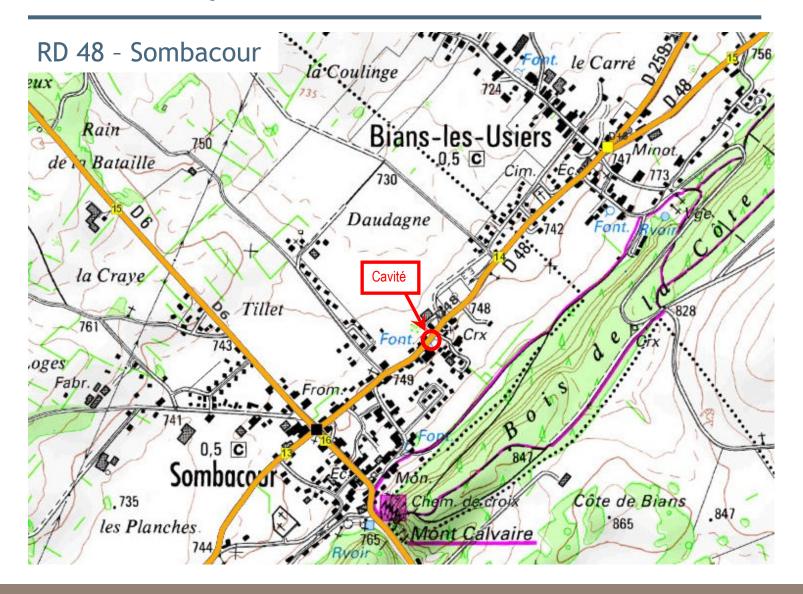


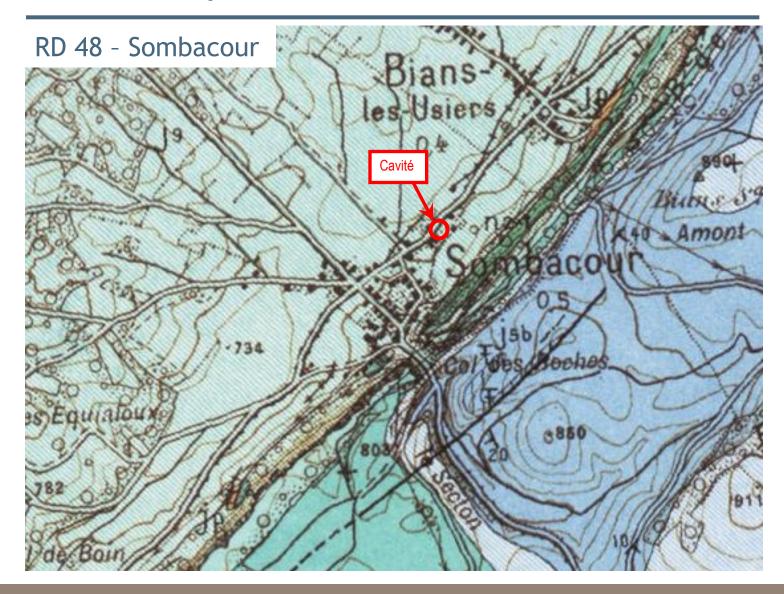
Mise en œuvre d'un bouchon constitué d'un béton cyclopéen



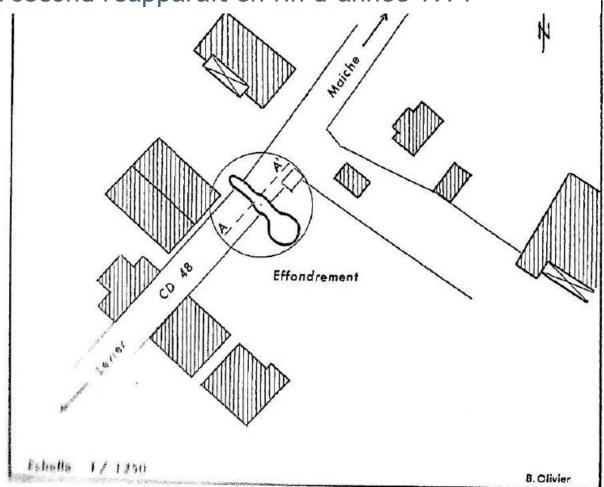
 Temps de séchage du béton : 1 semaine, puis reconstitution de la structure de chaussée





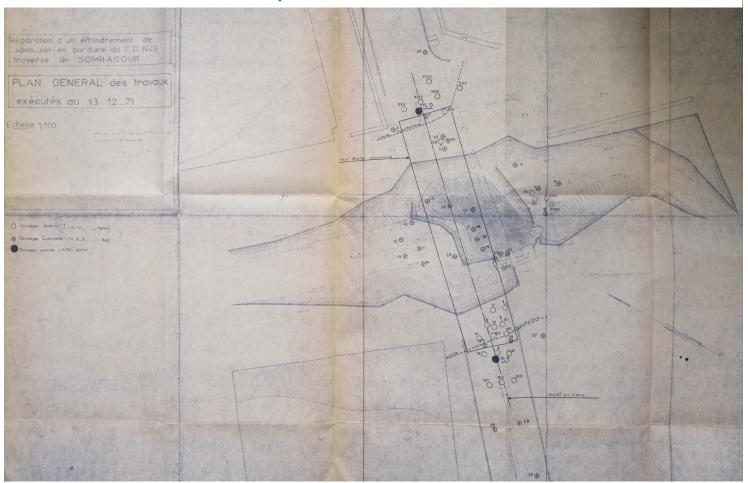


- Apparition d'un 1^{er} effondrement le 28 mai 1967
- Un second réapparait en fin d'année 1971



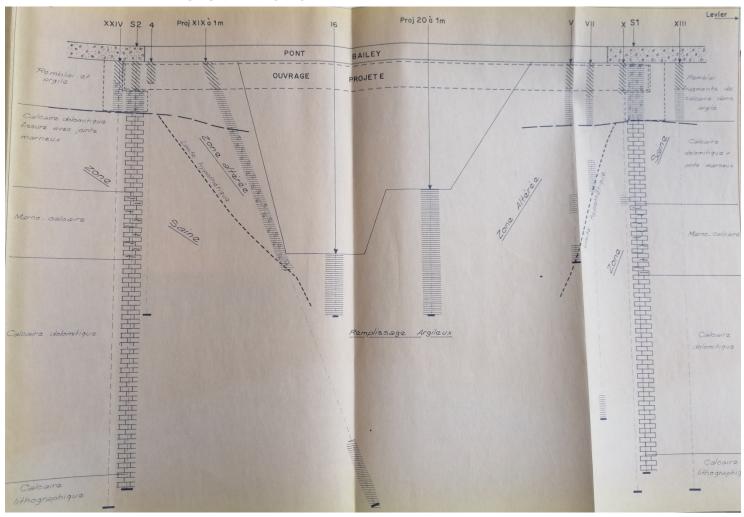


 Réalisation de très nombreux sondages pour déterminer l'extension de la dépression

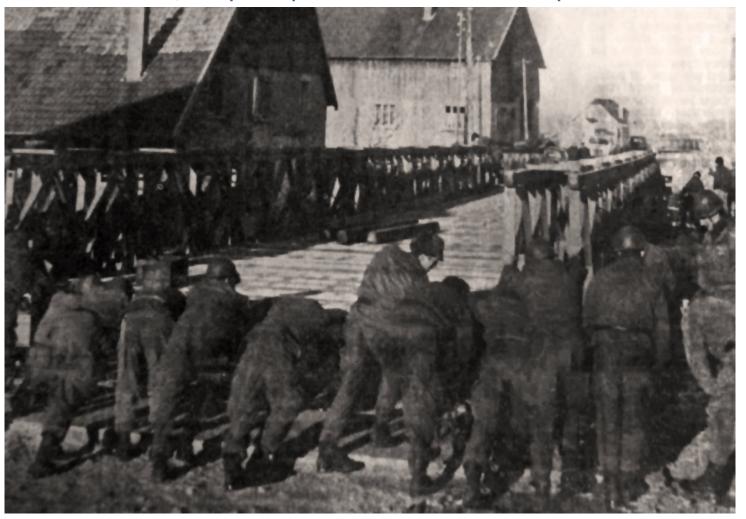




Profil en long géologique



o Début 1972, un pont provisoire est installé par l'armée





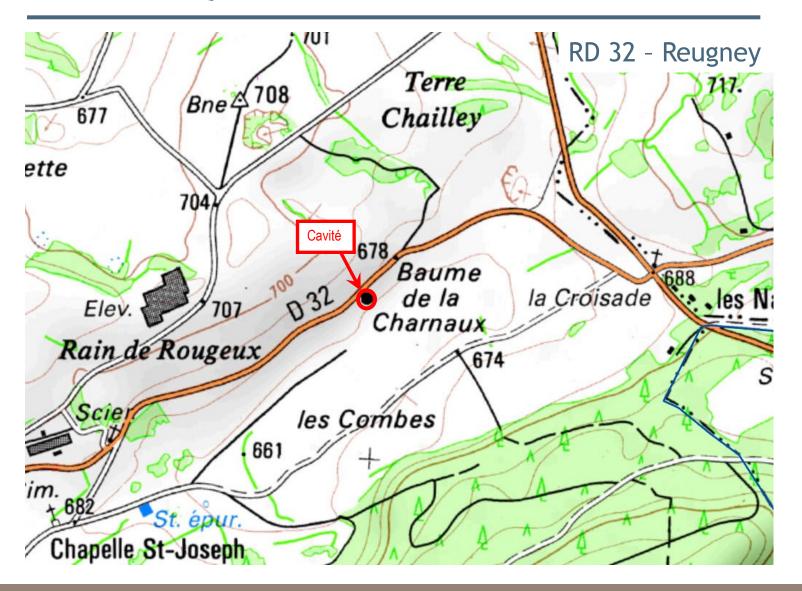
 Fin 1972, un pont définitif permettant le franchissement pérenne de cette brèche est construit

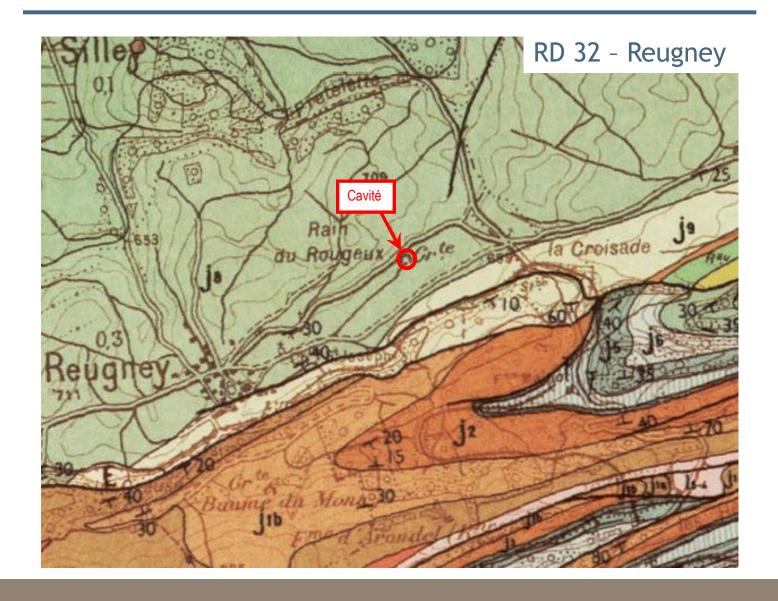




 Des difficultés d'entretien de l'ouvrage se présentent actuellement



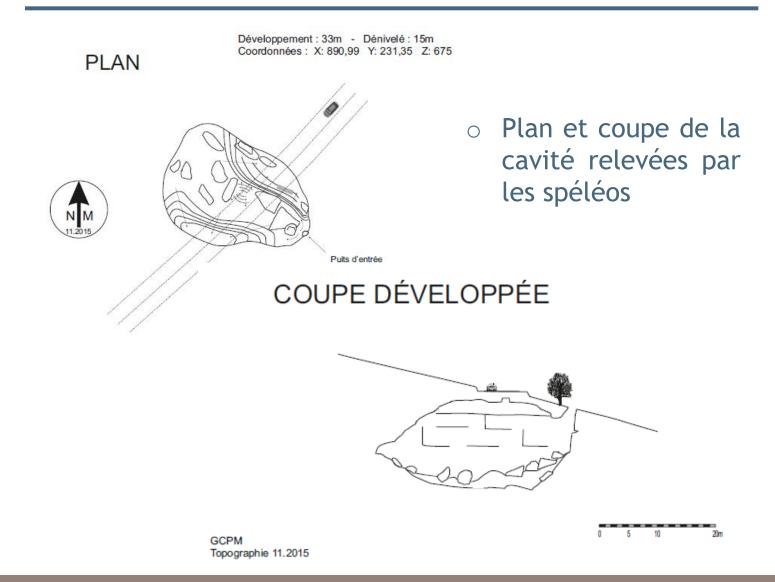


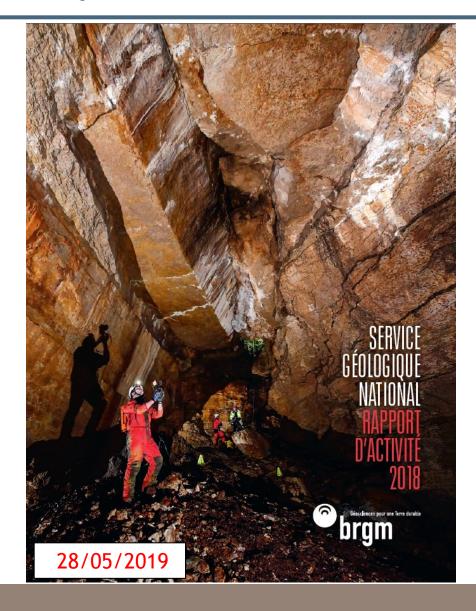




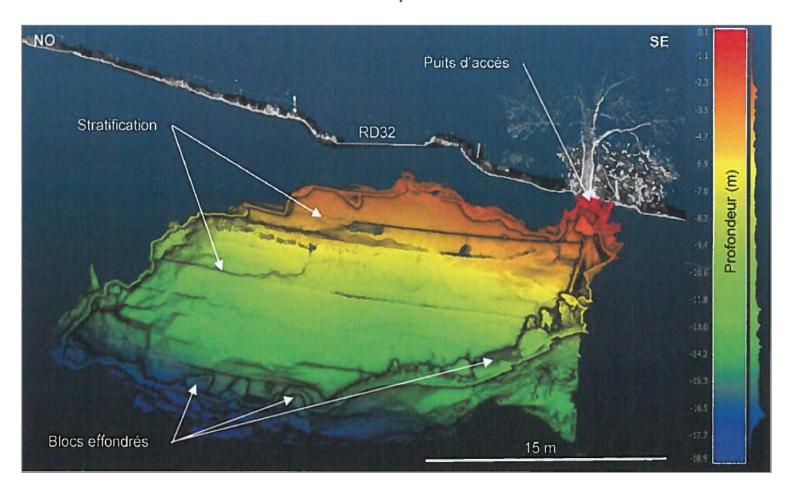
 Re-découverte d'une cavité sous une route départementale avec puits d'accès dans un champs



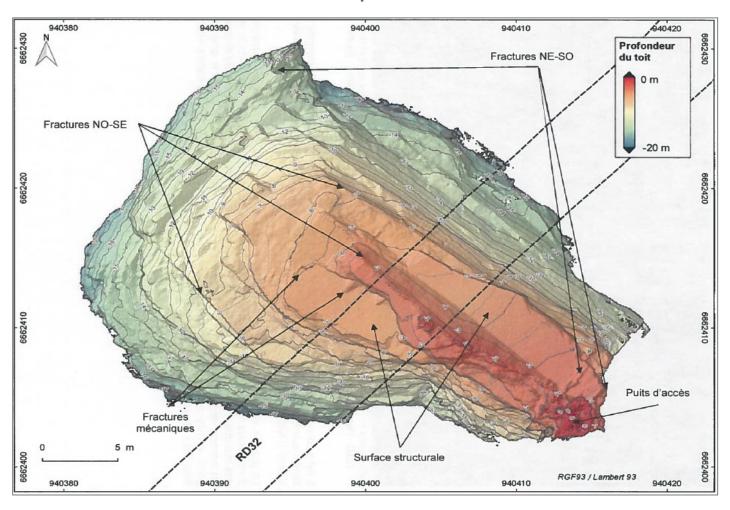




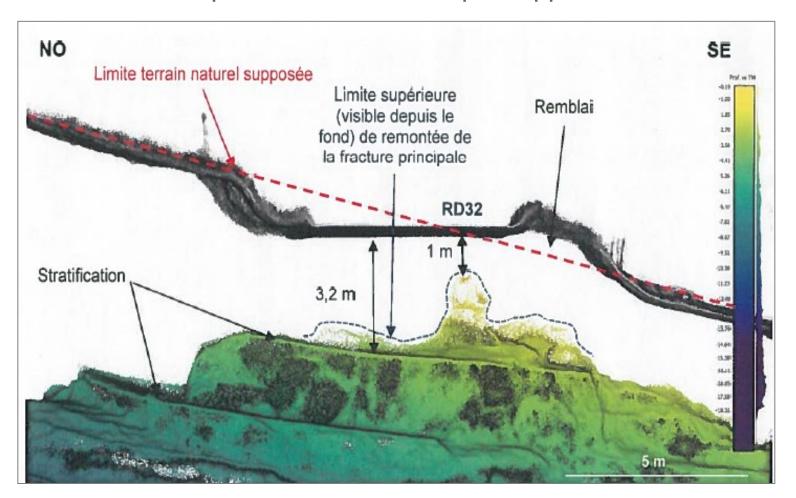
Résultat du scan 3D réalisé par le BRGM



Résultat du scan 3D réalisé par le BRGM



Zoom sur la position de la cavité par rapport à la route



 Visite de la cavité par le CEREMA pour étudier son possible confortement



Propositions de solutions de sécurisation par le CEREMA

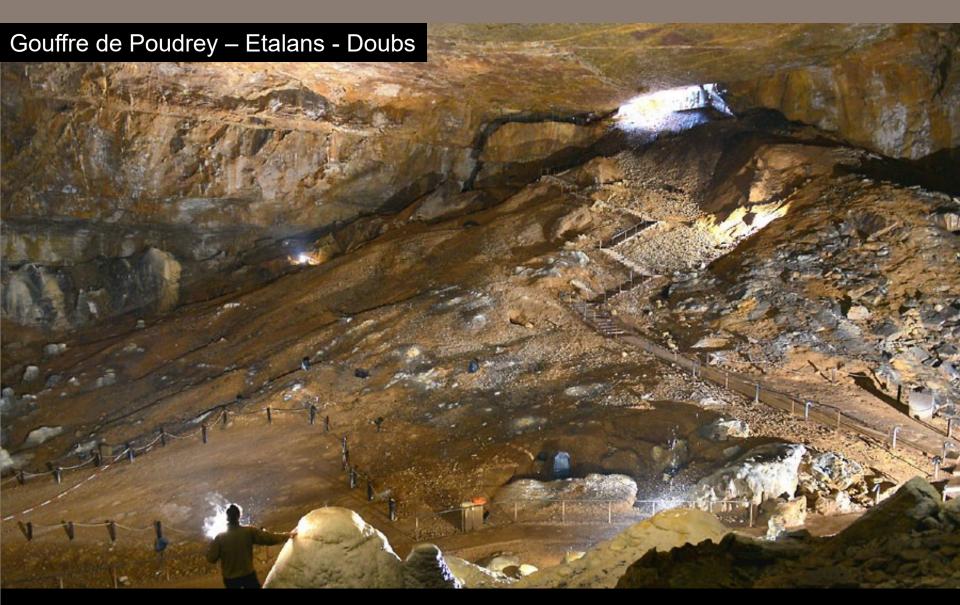
| Solution | Coût estimé | Limites de la solution | Pérennité de l'ouvrage | Etudes complémentaires à envisager | Incertitudes* |
|-------------------------------------|------------------|--|---------------------------|---|---------------|
| A – coque en béton projeté | > 450 k € | considéré comme un ouvrage et dimensionné selon une approche « tunnel » difficulté de mise en œuvre depuis 1'intérieur de la cavité | 100 ans | campagne d'investigations géotechniques étude de la fracturation de la cavité étude pour le dimensionnement de la coque | 2,67 |
| B – ancrages | > 60 k€ | création de massifs de réaction au niveau de la chaussée difficulté de mise en œuvre | 25 ans | campagne géophysique pour la détection d'anomalies entre le toit de la cavité et le terrain naturel campagne d'investigations géotechniques étude de la fracturation étude pour le dimensionnement des massifs de réaction | 2,00 |
| C – déviation | > 360 k€ | - acquisition foncière à prévoir | « illimité » | campagne géophysique pour la détection d'éventuelles cavités campagne d'investigations géotechniques étude de dimensionnement de la future voirie | 1,33 |
| D – ouvrage de franchissement | > 1000 k€ | - ouvrage d'art - très onéreux | 100 ans | campagne géophysique pour la détection d'éventuelles cavités campagne d'investigations et études géotechniques pour le dimensionnement | 1,66 |

^{*}Incertitude calculée par le CEREMA sur la conception, la réalisation et l'usage de l'ouvrage selon trois niveaux (1, 2 ou 3), la note croit avec l'incertitude.

- Solution contournement privilégiée
- Etudes environnementales en cours dans et aux abords de la cavité
- o Etude géophysique à venir dans les semaines prochaines



- Le Département du Doubs tente de proportionner les études et travaux en fonction des aléas et des enjeux.
- Pour ce faire, il se fait accompagner par de nombreux et divers professionnels : spéléos, BRGM, CEREMA, BE géotechniques,
- Les moyens mis en œuvre pour s'affranchir de ces aléas sont réfléchis et étudier sous de nombreux aspects et les solutions sont adaptées aux contextes et enjeux.
- Contourner, franchir ou combler reste la question centrale à laquelle il nous faut savoir répondre,



Merci de votre attention