

# Diagnostic karstique d'une digue affectée par un effondrement récurrent

Saint-Pryvé-Saint-Mesmin (45)

Alexandre PHILIPPE (Cerema)



**Cavités  
karstiques**

Equipe pluri-établissement Cerema/Brgm

Ludovic DORE (Cerema) - Lucile SAUSSAYE (Cerema) - Thomas JACOB (BRGM)

Gildas NOURY (BRGM) - Adnand BITRI (BRGM)

Séminaire national Risque karstique – Orléans – 04 et 05 avril 2024

# SOMMAIRE

1- Contexte de l'étude

2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques

3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus

4- Evolutions attendues et analyse des risques

5- Propositions de traitement

# SOMMAIRE

**1- Contexte de l'étude**

**2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques**

**3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus**

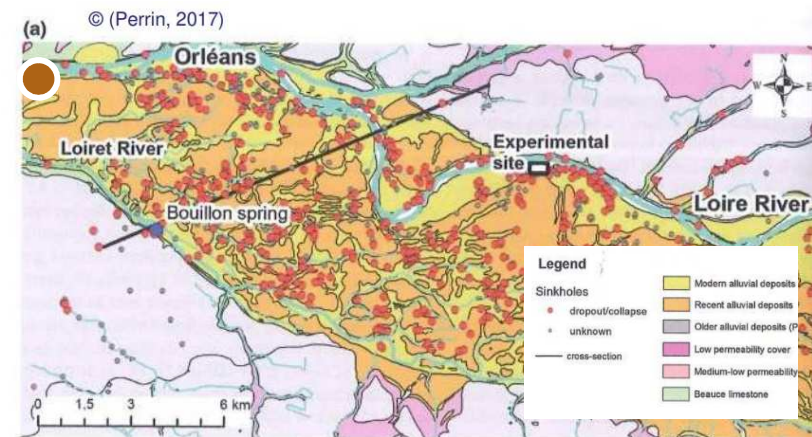
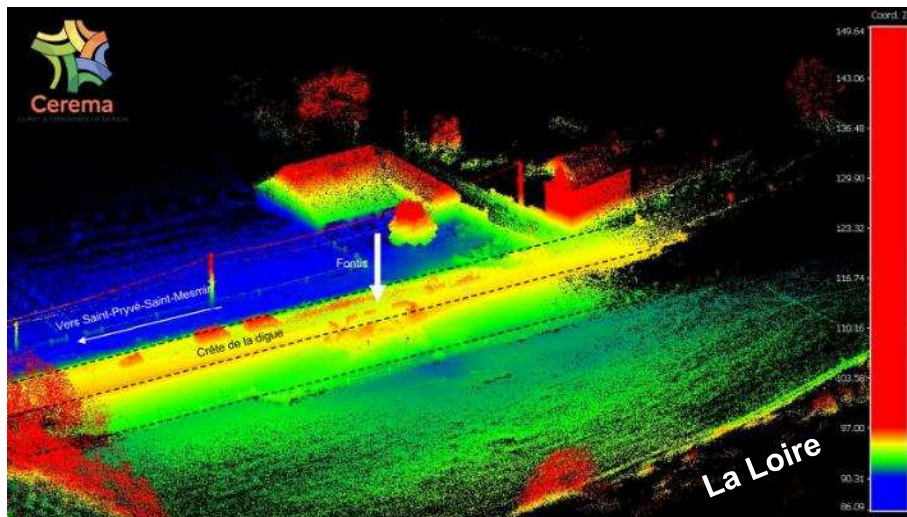
**4- Evolutions attendues et analyse des risques**

**5- Propositions de traitement**

# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE



- ✓ Un effondrement dans l'agglomération orléanaise entre la Loire et le Loiret
- ✓ Effondrement impactant une digue de Loire dans l'agglomération orléanaise
- ✓ Karst sous couverture



# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

✓ Un effondrement récurrent

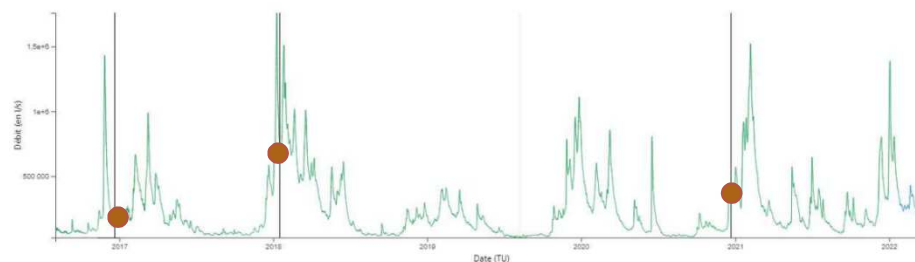


Année	Diamètre de l'effondrement (m)	Profondeur (m)
2016	4 m	3,0 m
2018	2 m	1,5 m
2021	4 m	3,5 m

**3 effondrements en 5 ans**

Les effondrements se produisent au même endroit

Débit moyen n horaire (n=1, non glissant) - Données les plus valides de l'entité - K435 0010 20 - La Loire à Orléans - Quai du Roi - du 01/08/2016 00:00 au 31/03/2022 23:59 (TU)



# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

- ✓ Des travaux de reprise après les évènements de 2016 et 2018



© DDT45

- ✓ **Purge des matériaux décomprimés**
- ✓ **Mise en œuvre d'enrochements 40/80**
- ✓ **Géotextile anti-contaminant**
- ✓ **Reconstitution du corps de digue et de la chaussée**

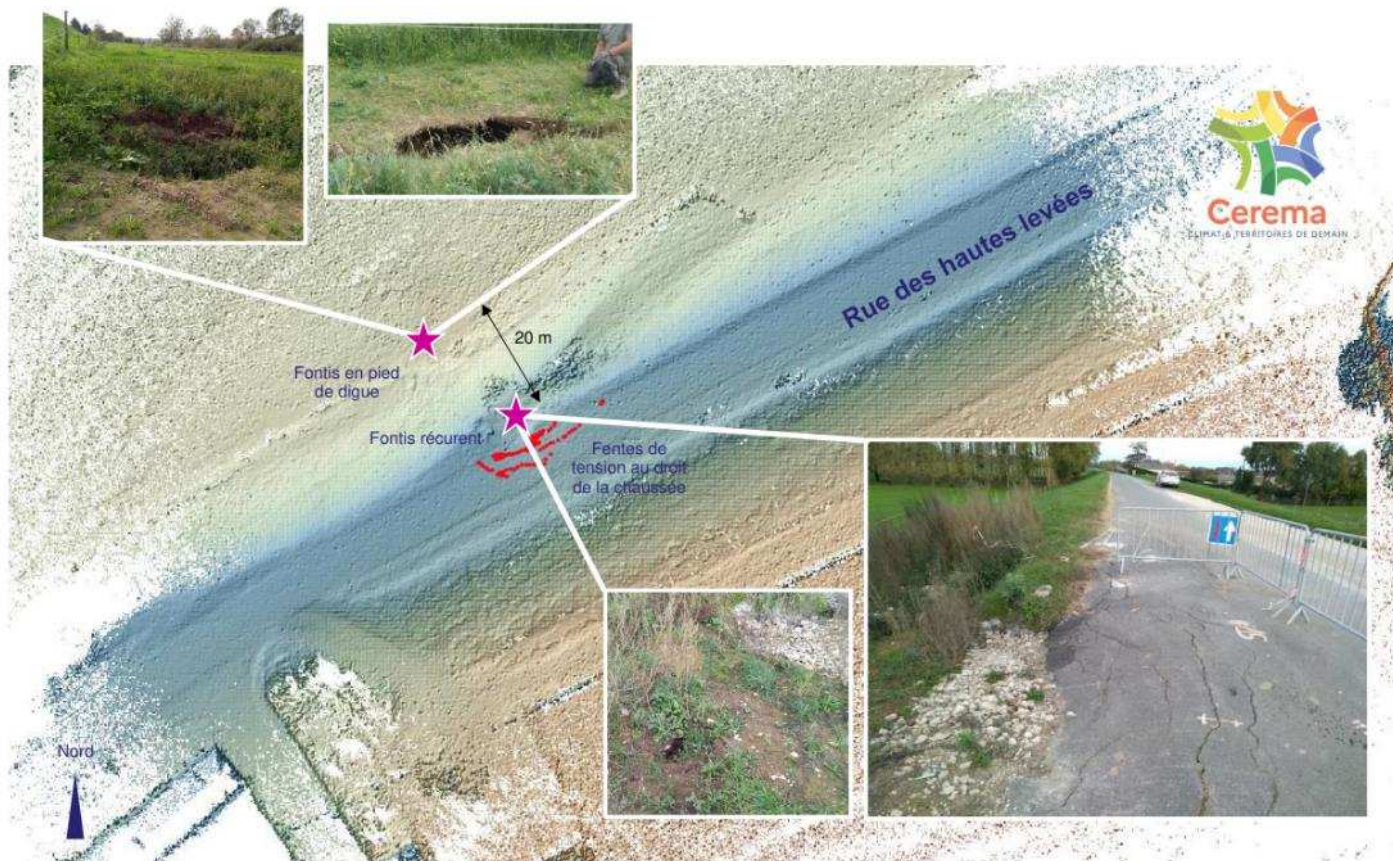
Solution de surface qui n'a pas conduit à traiter le vecteur à l'origine de l'effondrement

Choix de ne pas réaliser de travaux en profondeur

# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

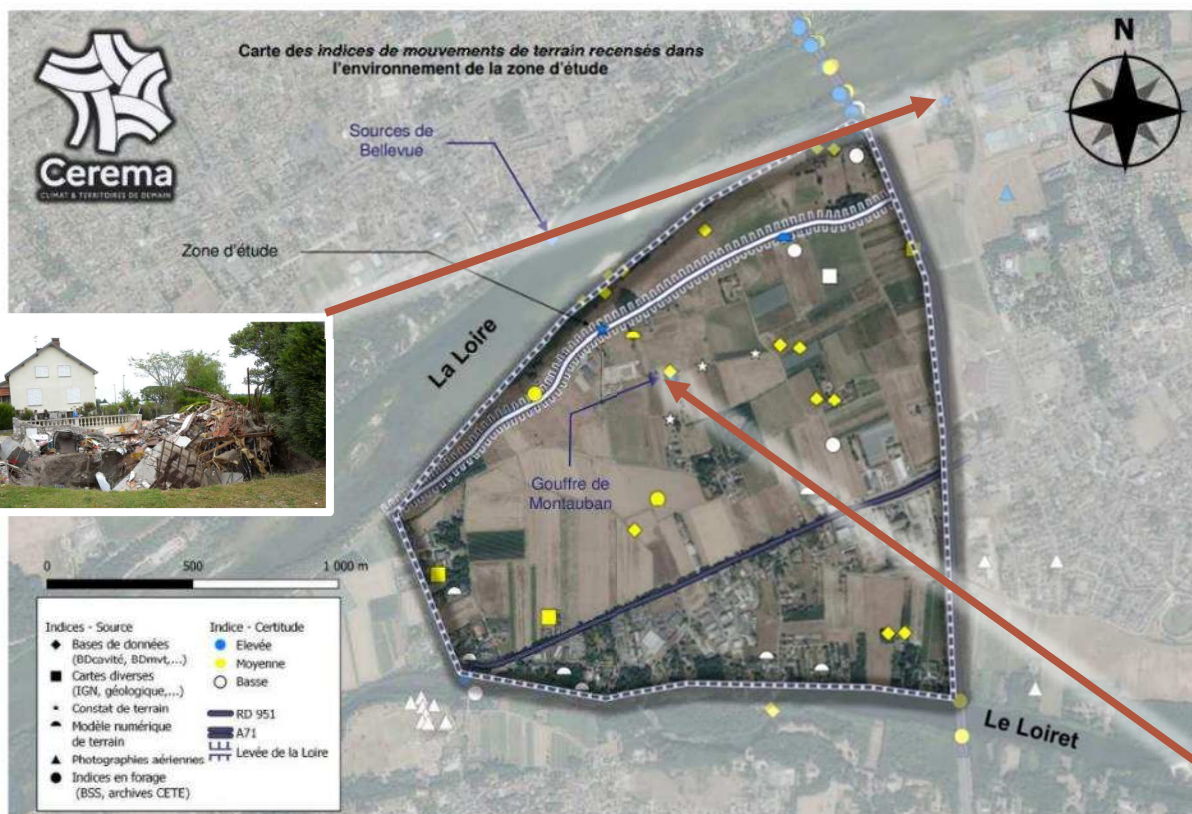
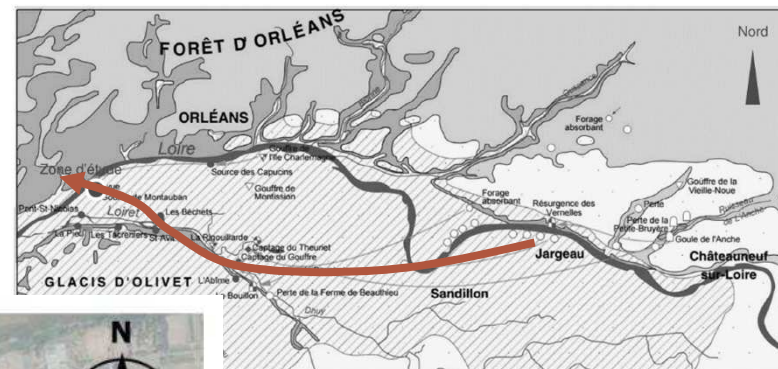
✓ Evolutions depuis 2021

- ✓ Poursuite des phénomènes de tassements
- ✓ Apparition de plusieurs fontis en pied de digue



# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

✓ Un évènement pas isolé...

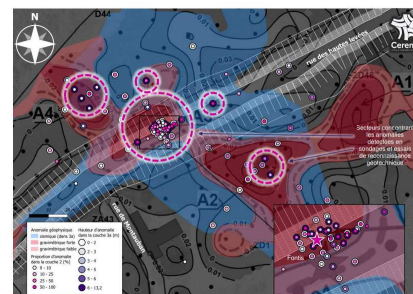
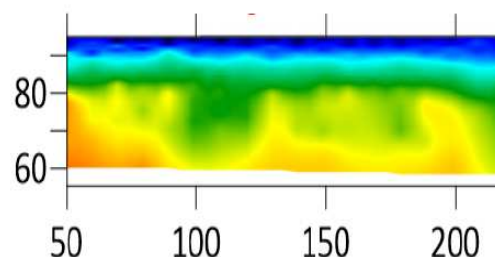
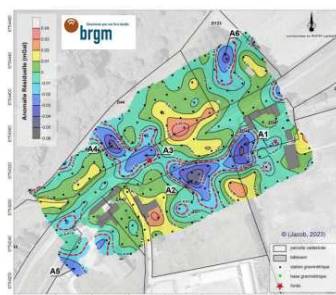




# 1- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

- ✓ Pourquoi réaliser une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques ?
- ✓ Elaborer le modèle géologique et géotechnique du site
- ✓ Comprendre les processus à l'œuvre et comprendre l'environnement karstique du site
- ✓ Appréhender les évolutions attendues et le niveau de risque résiduel
- ✓ Donner si nécessaire des préconisations de traitement dans le cadre d'un projet de réparation

Diagnostic de niveau G5 au sens de la norme NF 94-500.



# SOMMAIRE

**1- Contexte de l'étude**

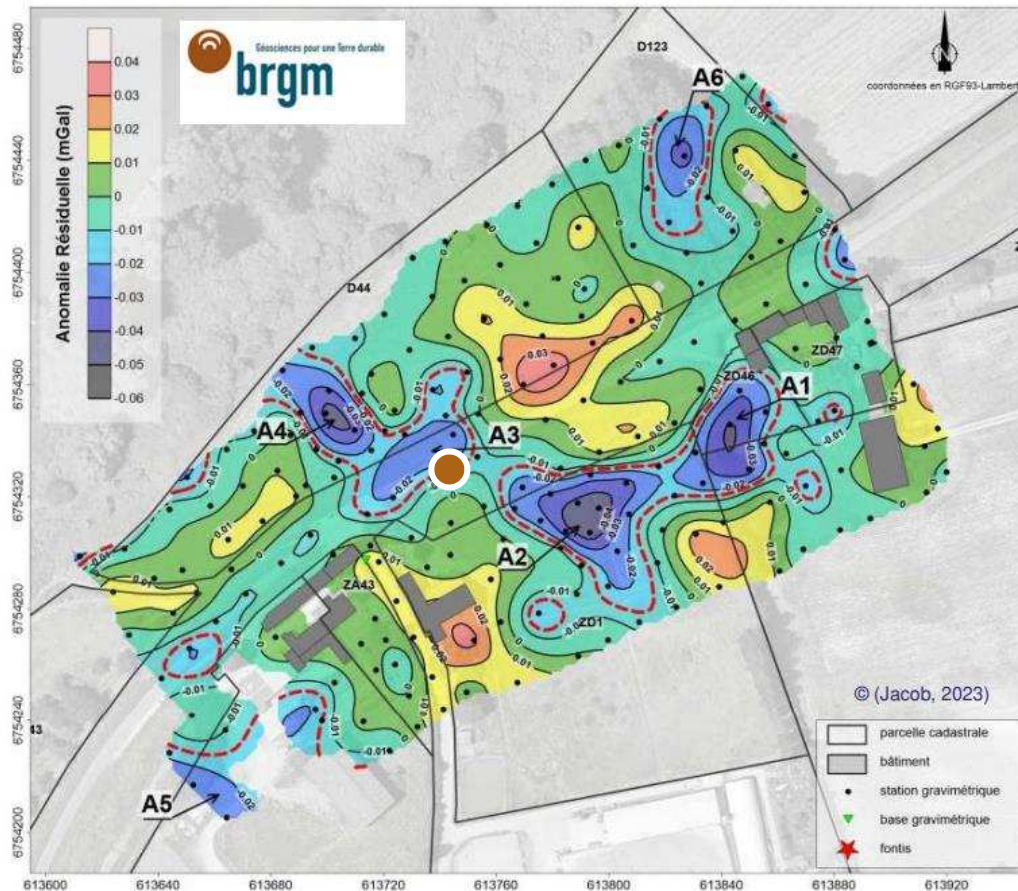
**2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques**

**3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus**

**4- Evolutions attendues et analyse des risques**

**5- Propositions de traitement**

## 2- CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS



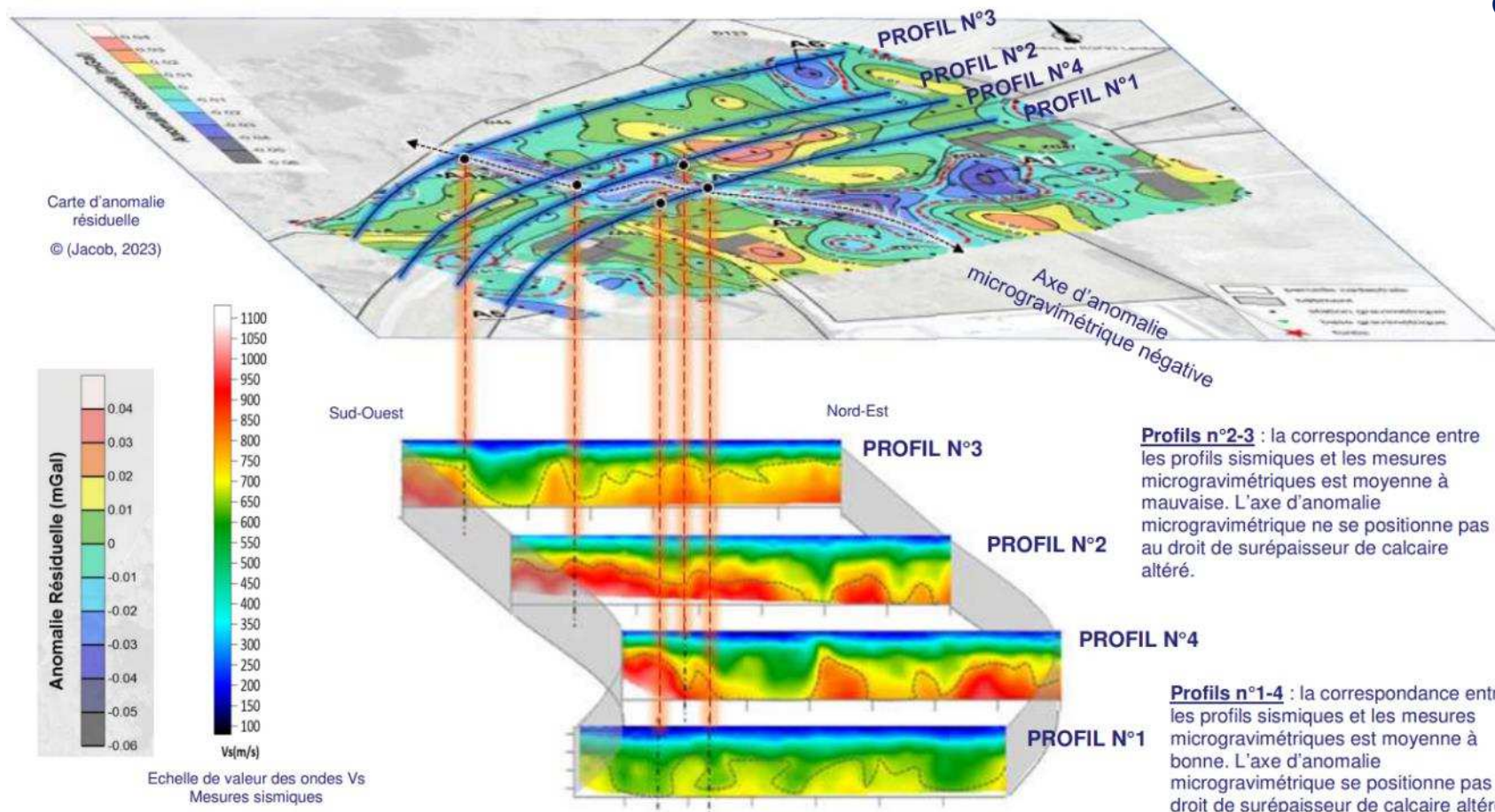
- ✓ **Couplage de mesures géophysiques**
- ✓ **Mesures sismiques MASW :**  
profils de vitesse sismique  
imageant le sol en profondeur  
(caractériser l'épaisseur de calcaire altéré)
- ✓ **Microgravimétrie :** repérer des vides ou des zones décomprimées

### **Microgravimétrie :**

- ✓ 4,15 ha de zone couverte
- ✓ Maille générale 15 x 15 m
- ✓ Maille resserrée en quinconce dans les zones d'anomalies
- ✓ 204 points de mesures centrés sur le fontis

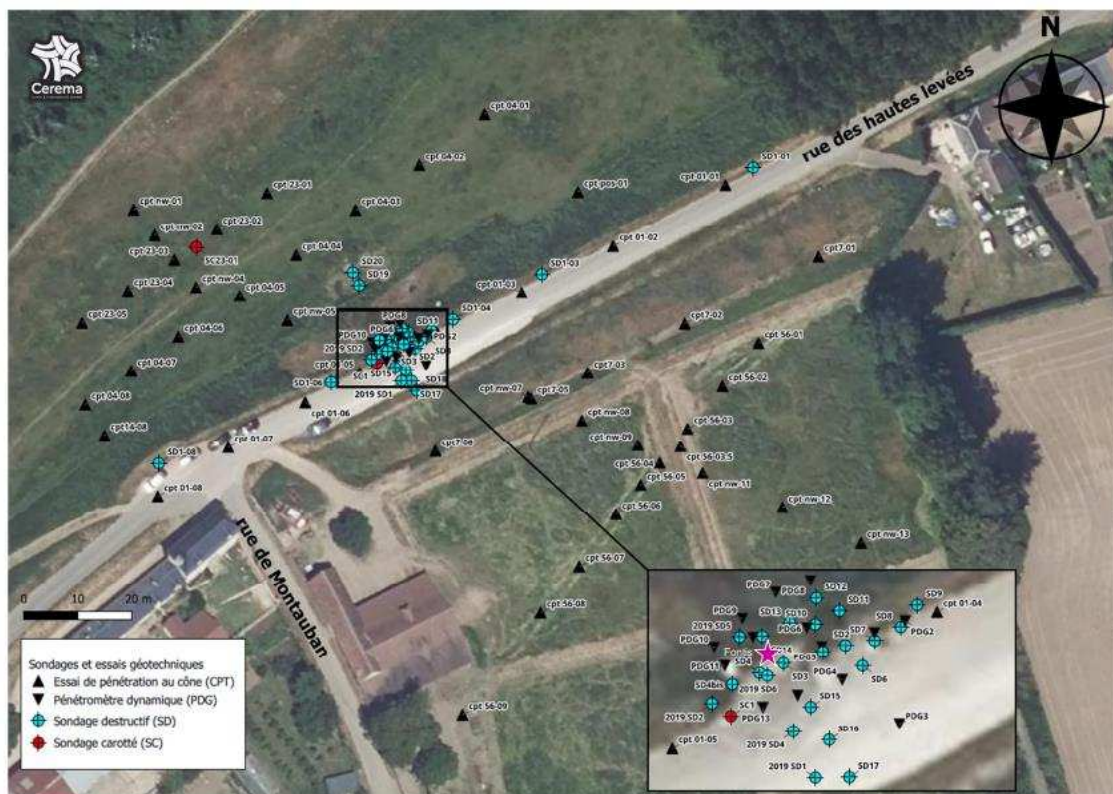
## 2- CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS

7 profils sismiques MASW  
longitudinaux et  
transversaux à l'axe de la  
digue



## 2- CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS

- ✓ Réalisation d'une campagne d'investigations géotechniques
- ✓ Implantation des sondages en fonction des résultats des mesures géophysiques

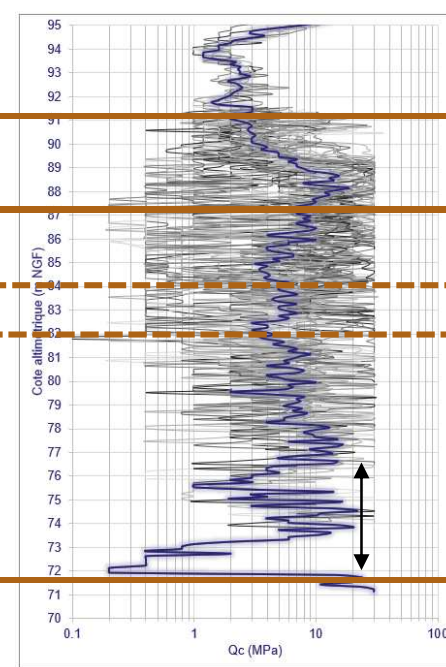
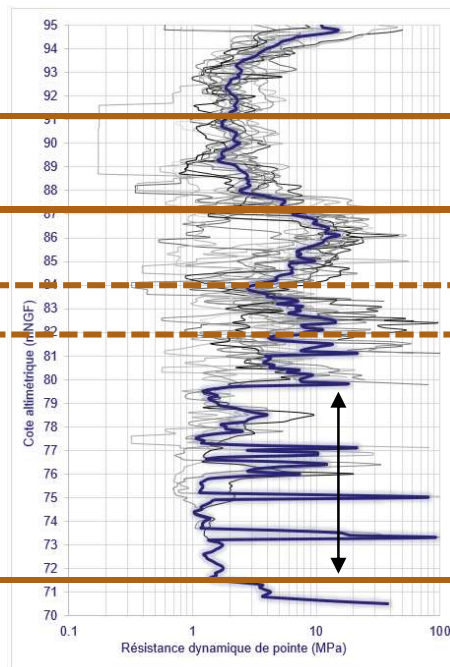
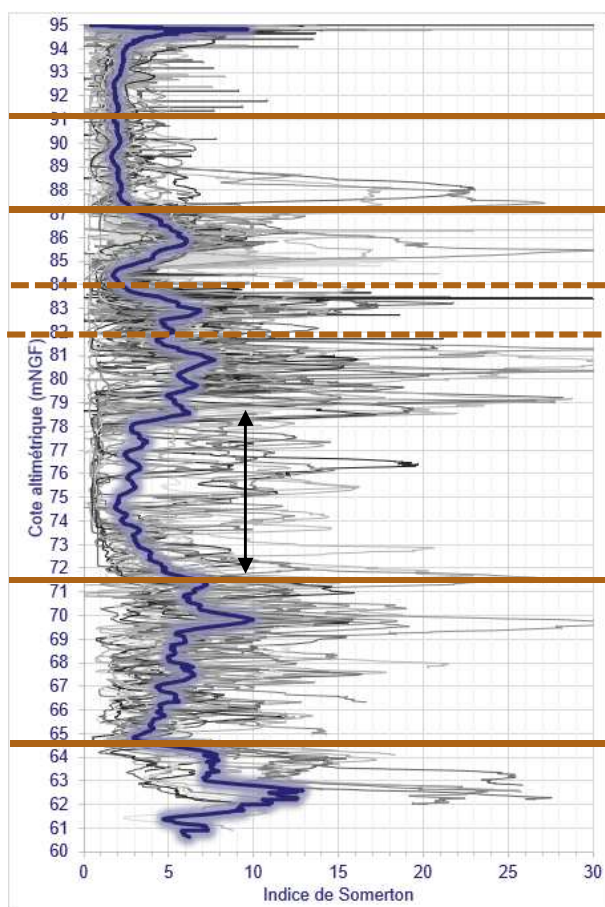


- ✓ 30 sondages destructifs
- ✓ 51 essais de pénétration statique (CPT)
- ✓ 14 essais de pénétration dynamique
- ✓ 2 sondages carottés



## 2- CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS

### ✓ Modèle géologique et géotechnique



Digue

Alluvions

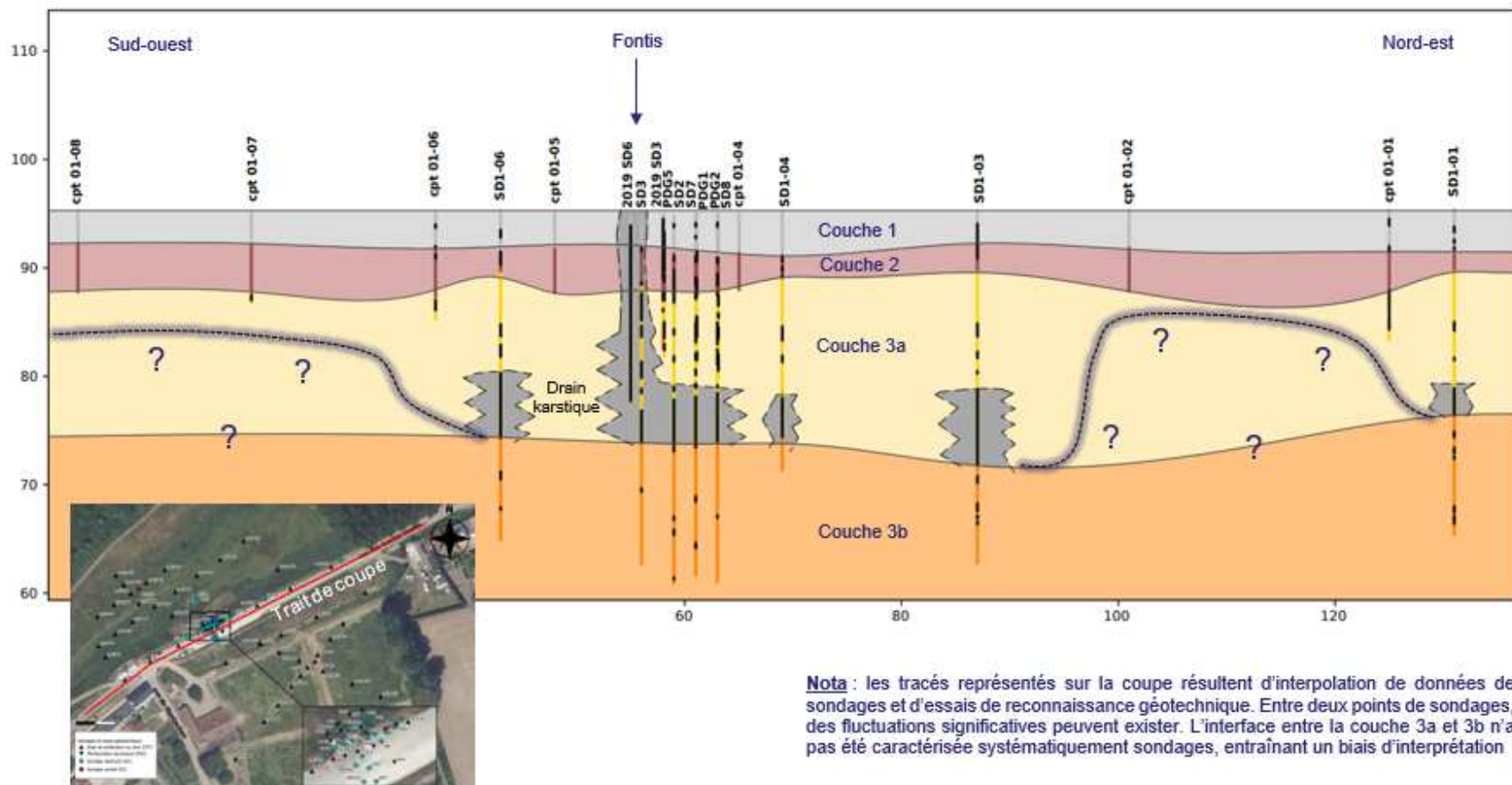
Calcaire altéré et karstifié

Calcaire moins altéré

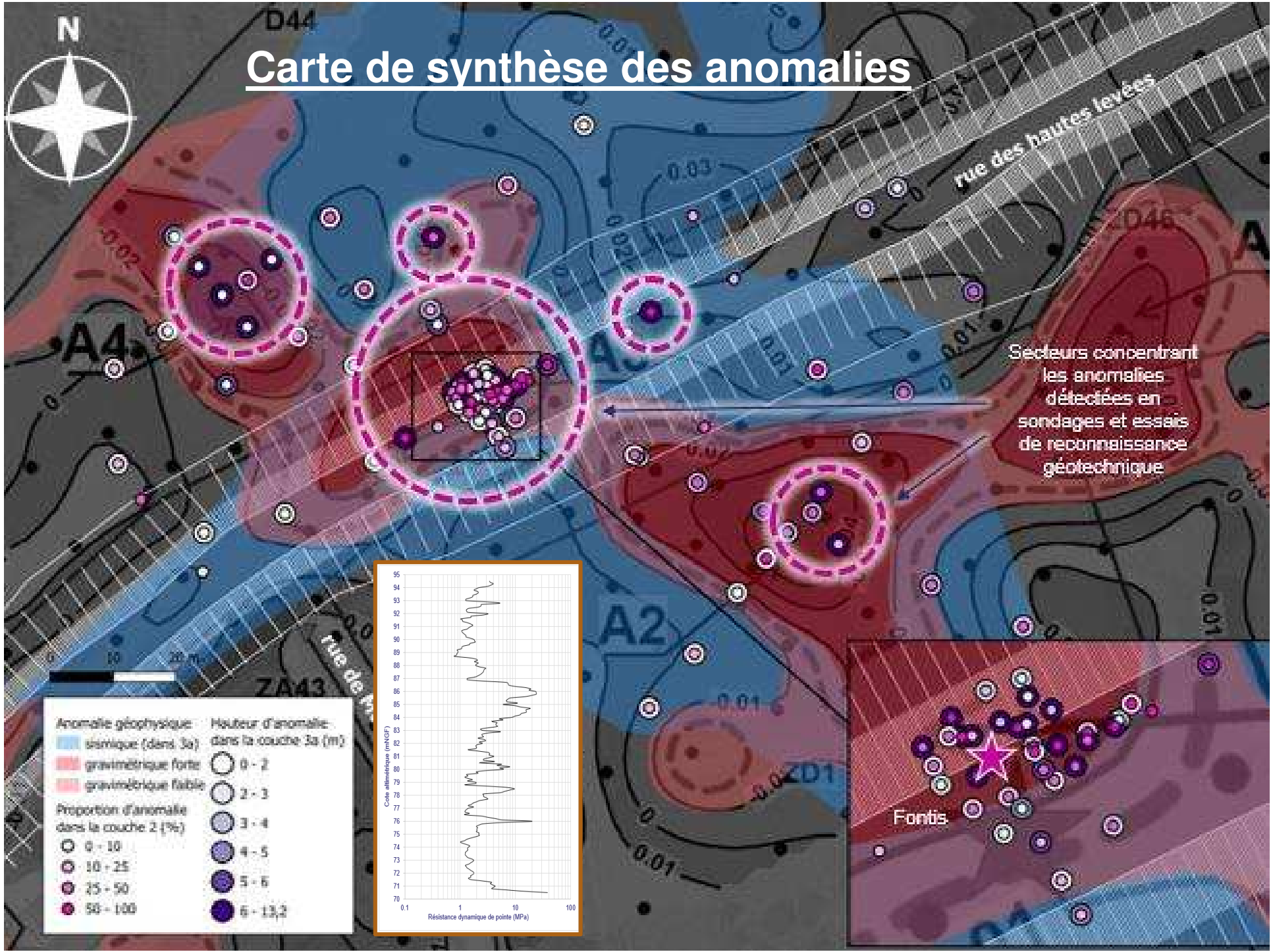


## 2- CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS

### ✓ Modèle géologique et géotechnique



# Carte de synthèse des anomalies

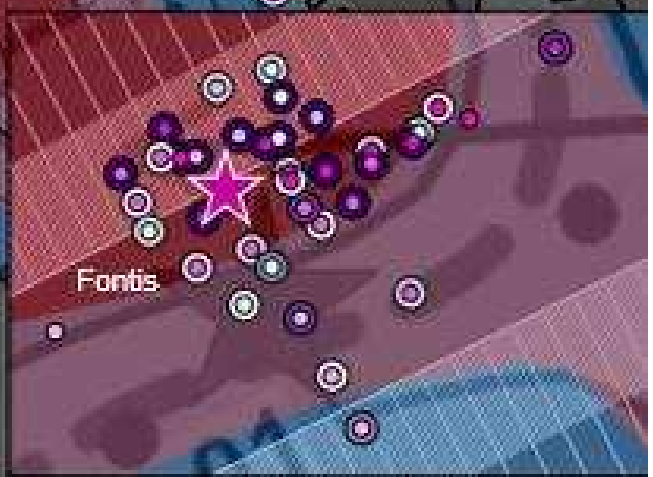
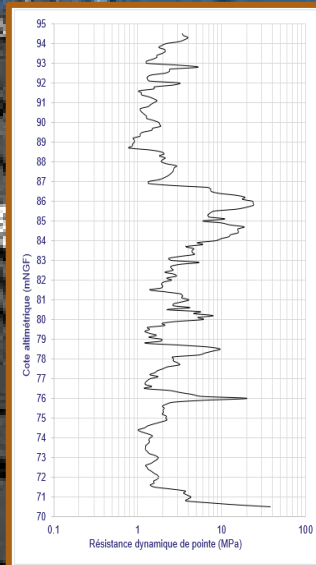


Secteurs concentrant les anomalies détectées en sondages et essais de reconnaissance géotechnique

Anomalie géophysique:	Hauteur d'anomalie dans la couche 3a (m)
bleu clair	0 - 2
bleu foncé	2 - 3
rouge clair	3 - 4
rouge foncé	4 - 5
orange clair	5 - 6
orange foncé	6 - 13,2

Proportion d'anomalie dans la couche 2 (%)	Proportion d'anomalie dans la couche 2 (%)
○	0 - 10
○	10 - 25
○	25 - 50
○	50 - 100





# SOMMAIRE

1- Contexte de l'étude

2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques

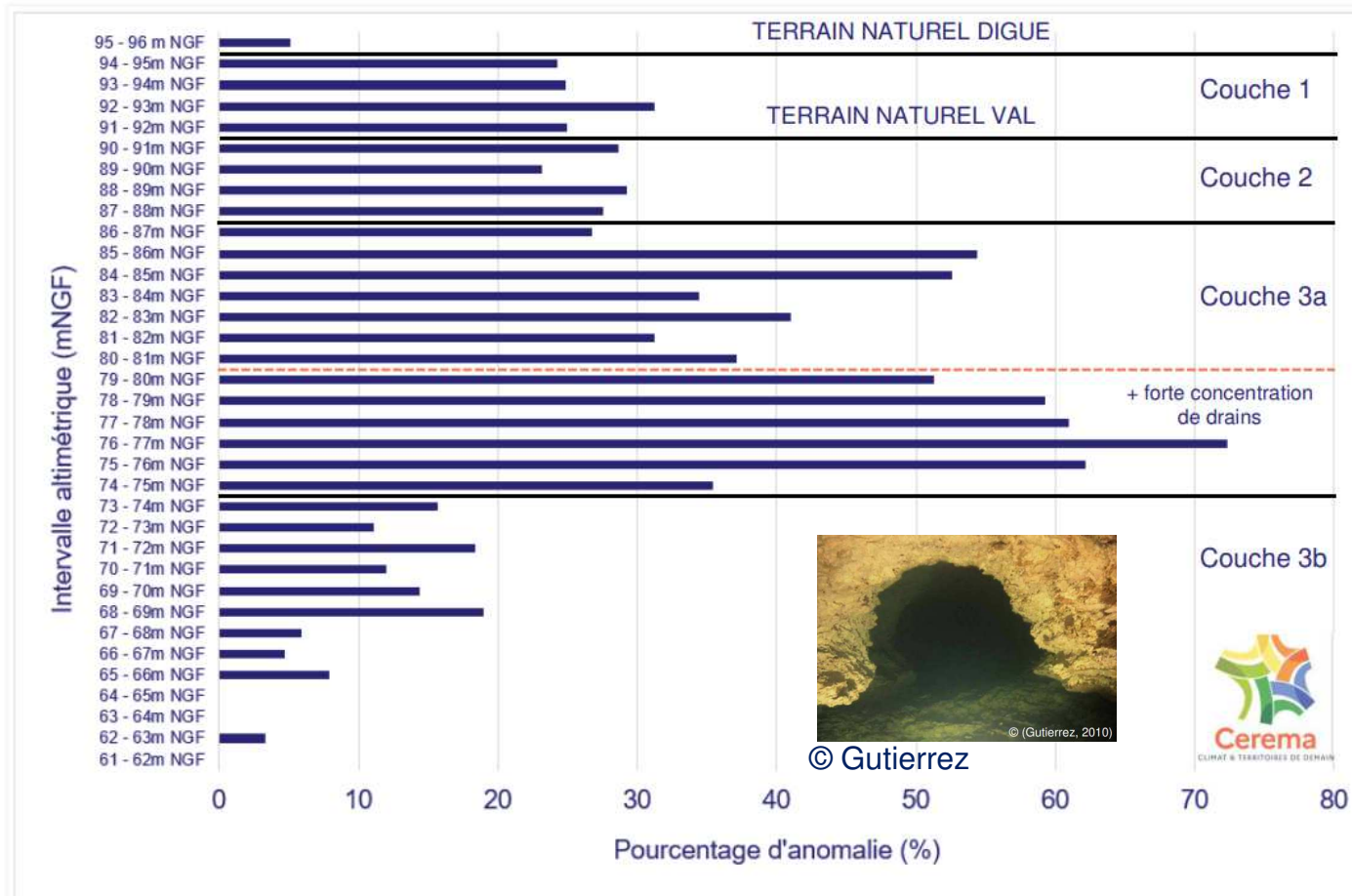
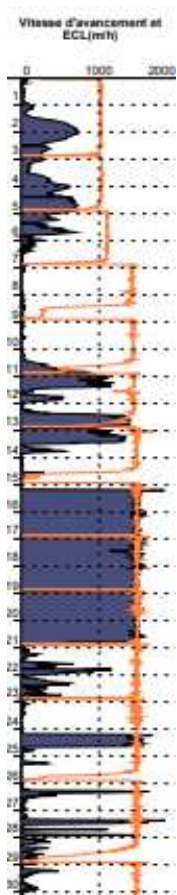
3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus

4- Evolutions attendues et analyse des risques

5- Propositions de traitement

# 3- CARACTÉRISATION DU PROCESSUS

## ✓ Répartition des anomalies en fonction de la profondeur



### 3- CARACTÉRISATION DU PROCESSUS

✓ **Processus de suffosion karstique ?**

Evacuation des matériaux fins dans des vides par le biais de fracture

Peu probable au regard de la hauteur des phénomènes de décompression constatés

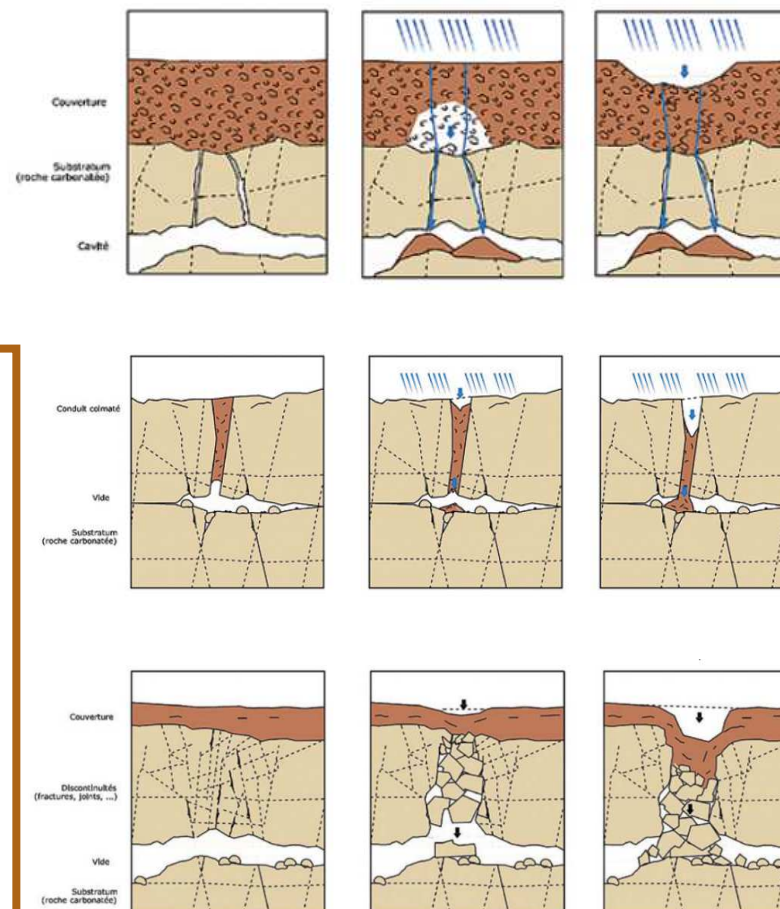
Toutefois pas exclu au droit de la zone d'étude

✓ **Processus de débouillage ?**

Débouillage d'un conduit colmaté dans l'encaissant rocheux

✓ **Effondrement d'un drain karstique ?**

Rupture du toit d'un drain karstique et amorce d'une cloche d'effondrement



© Guide karst / Cerema-Brgm

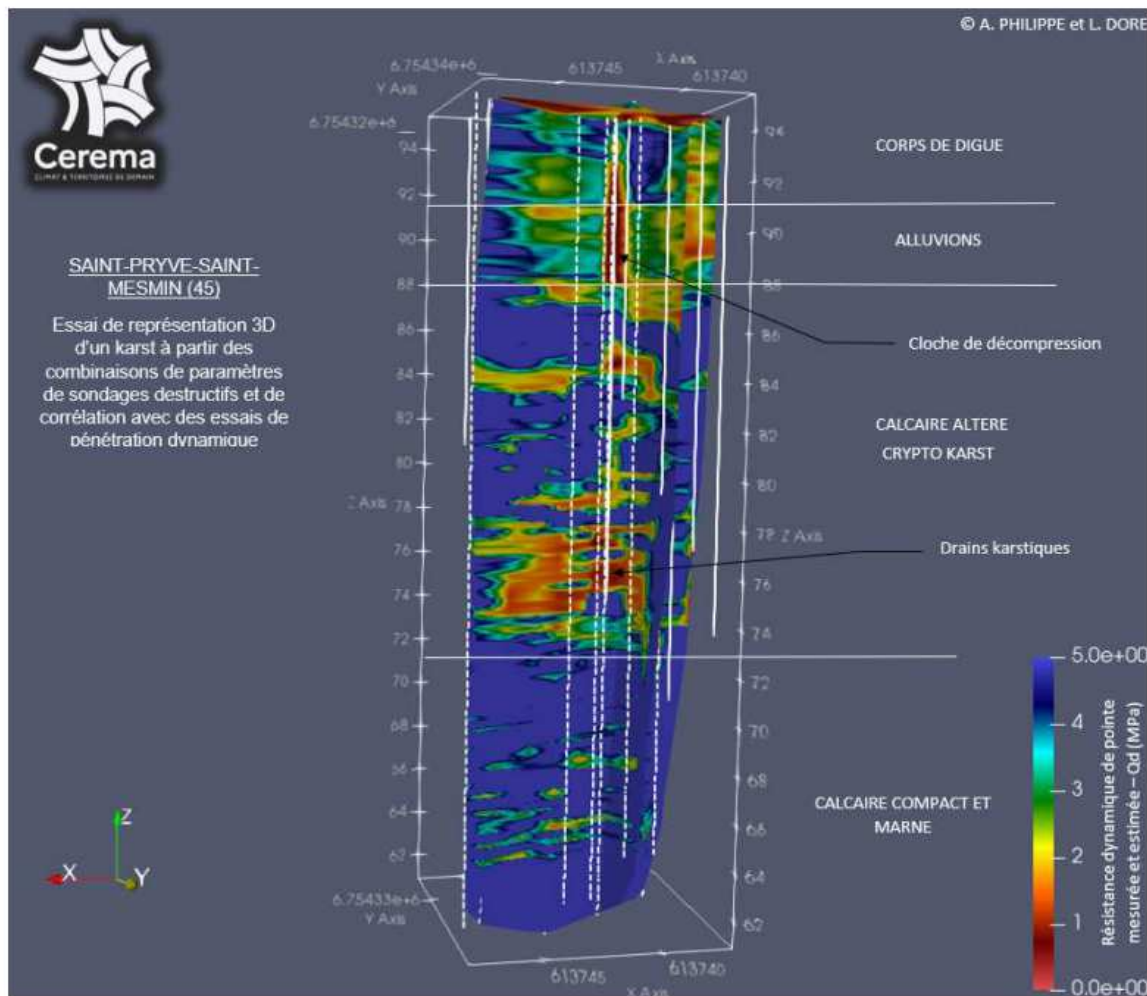
# 3- CARACTÉRISATION DU PROCESSUS

## ✓ Hypothèse de l'effondrement d'un drain karstique

POUR	CONTRE
Existence de drains karstiques en profondeur	Facteur de recouvrement des vides de 10 à 30 soit des processus d'effondrement en théorie absorbés par le foisonnement des matériaux
Drains partiellement colmatés présentant à leur sommet de manière non systématique des vides francs de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à 1 m de hauteur	Répétition du phénomène de manière régulière et au même endroit
	Profondeur de l'effondrement > hauteur de vide

Hypothèse de la rupture de toit parait moins probable au regard de l'hypothèse de débouillage. Le processus de débouillage parait le plus probable.

### 3- CARACTÉRISATION DU PROCESSUS



- ✓ Représentation graphique du phénomène
- ✓ Utilisation des données de sondages et essais au pénétromètre dynamique dans l'environnement immédiat du fontis
- ✓ Harmonisation des données de sondages et essais pour s'affranchir des conditions et d'exécution
- ✓ Choix d'une combinaison de paramètres
- ✓ Etablissement d'une loi de corrélation entre les différentes données de sondages par intervalle altimétrique et par couche
- ✓ Application de la loi de corrélation
- ✓ Interpolation 3D

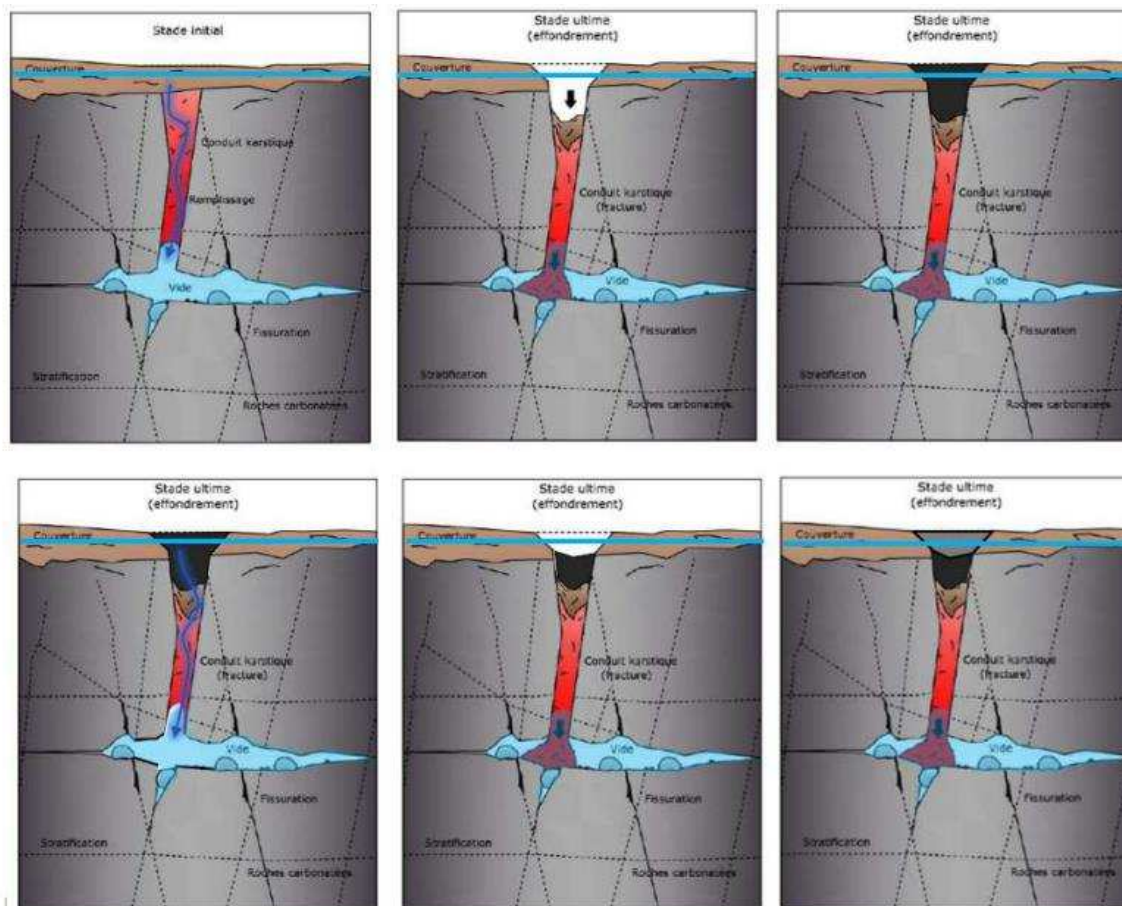
### 3- CARACTÉRISATION DU PROCESSUS

✓ **Et les répétitions du phénomène ?**

Dues probablement au tassement des matériaux au sein du conduit et à une digestion des matériaux dans le drain karstique conduisant à la réactivation du phénomène

✓ **Et les fontis en pied de digue ?**

Lien probable avec la dégradation d'une canalisation AEP ayant pu favoriser des processus de suffosion/soutirage.



© Clément

# SOMMAIRE

**1- Contexte de l'étude**

**2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques**

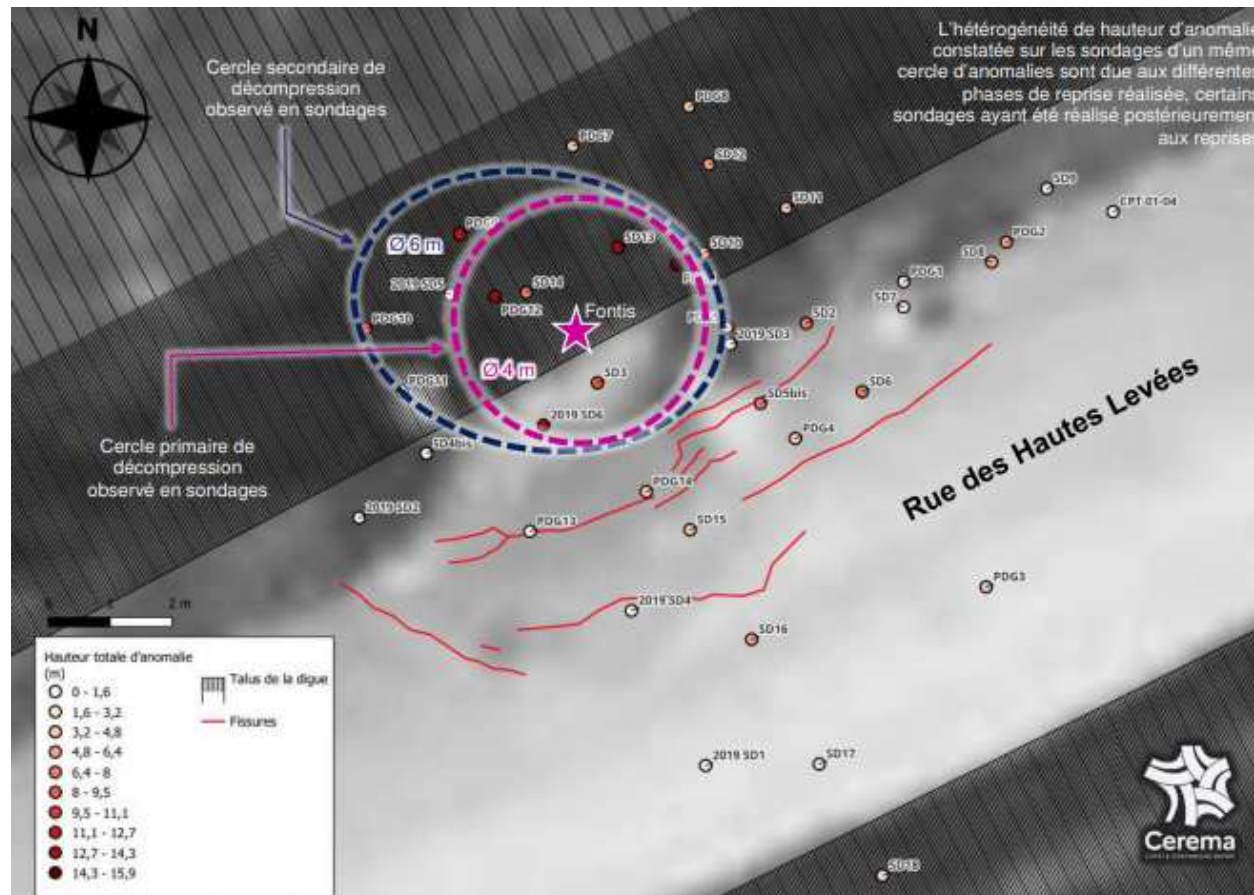
**3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus**

**4- Evolutions attendues et analyse des risques**

**5- Propositions de traitement**

# 4- EVOLUTIONS ATTENDUES ET RISQUES

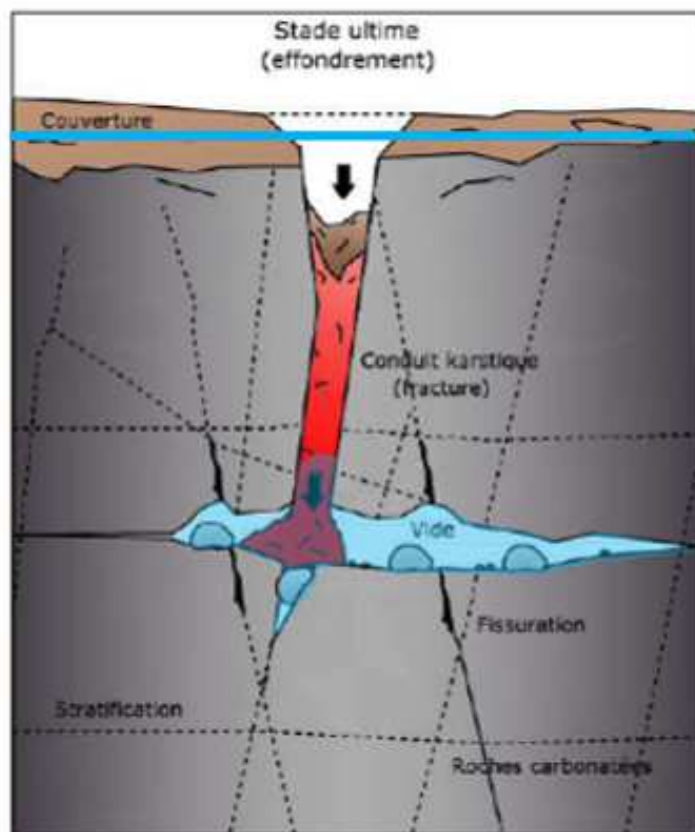
## ✓ Evolutions attendues





## 4- EVOLUTIONS ATTENDUES ET RISQUES

### ✓ Evolutions attendues



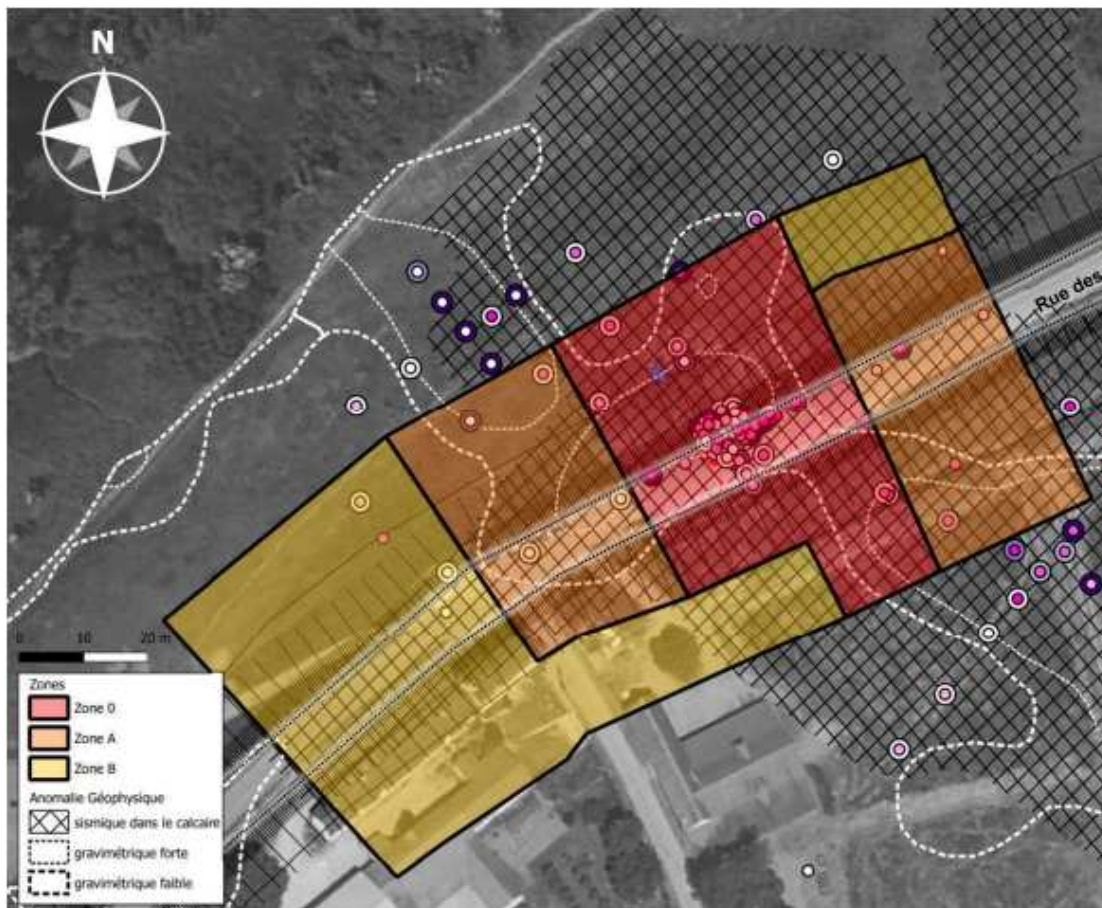
© Clément

**5** m = Diamètre du conduit ou de sa trace à l'interface crypto-karst (calcaire altéré) / couverture (alluvions)  
Mesuré par sondage et cohérent avec le gouffre de Montauban

**13** m = Diamètre de l'évènement évasé à 45° dans la couverture

Notion d'évènement de référence pour la zone d'étude

## 4- EVOLUTIONS ATTENDUES ET RISQUES



Zonage tracé sur la base de l'évènement de référence, les résultats des mesures géophysiques et géotechniques

### ✓ Zone 0

Zone environnant le sinistre à forte évolution avec drains karstiques majeurs susceptibles de générer des effondrements.

### ✓ Zone A

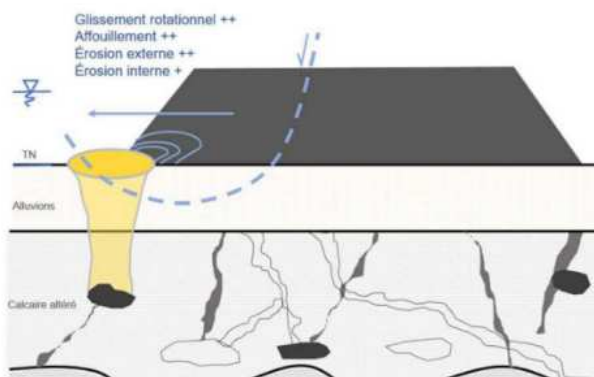
La zone A présente un contexte proche de la zone 0 : présence de drains karstiques en profondeur, anomalies sismiques et microgravimétriques. Les sondages n'ont pas mis en évidence de processus de cloche de décompression en cours de progression. La prédisposition à des évènements paraît forte.

### ✓ Zone B

Les mesures géophysiques ont mis en évidence une surépaisseur de calcaire altéré. La prédisposition des effondrements paraît moins importante que dans la zone A, les mesures microgravimétriques ne mettant pas en évidence d'anomalies négatives. La densité de sondages est toutefois plus faible et nécessiterait des investigations complémentaires pour confirmer ces observations.

# 4- EVOLUTIONS ATTENDUES ET RISQUES

## ✓ Risque ouvrage



La survenue de l'effondrement conduit à l'augmentation du risque de déstabilisation par :

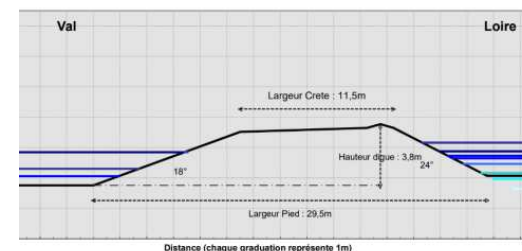
- ✓ Glissement rotationnel
- ✓ Affouillement de pied
- ✓ Érosion externe
- ✓ Érosion interne

## ✓ Risque routier



En cas de réactivation de l'évènement lors du passage d'un véhicule avec ou sans déstabilisation du talus, possibilité d'accident

## ✓ Risque inondation



Pour Q20, 50, 70, la hauteur d'eau côté Loire est négligeable

Pour Q200, 500, 1000, le remous conduit à l'inondation du Val sans rupture de la digue

Le risque d'inondation apparait ainsi plus fort pour des crues de période de retour Q100 à Q200

# SOMMAIRE

1- Contexte de l'étude

2- Résultats d'une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques

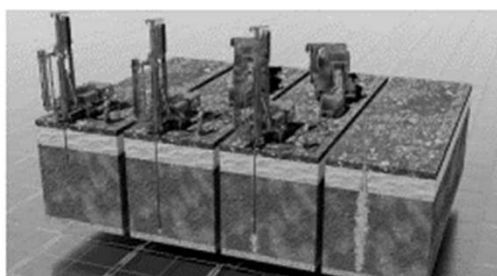
3- Avis sur l'origine du phénomène et caractérisation du processus

4- Evolutions attendues et analyse des risques

5- Propositions de traitement

# 5- PROPOSITIONS DE TRAITEMENT

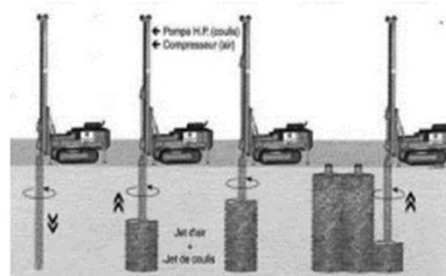
Techniques de travaux	Potentiel de réactivation	Désordres attendus sur la digue	Impact des travaux sur le karst	Soutirage Suffosion	Débouillage	Eff. Cavité
Purge / déconstruction	++	++	--	O	~	~
Palplanches	++	+	-	O	~	~
Géogrilles	++	+	--	~	~	~
Jet Grouting	-	--	+	O	~ (Ø faible)	~ (Ø faible)
Injections Solides	--	--	++	O	O	O



© Solétanche Bachy



© PréventionBTP



© Antea



© DDT45

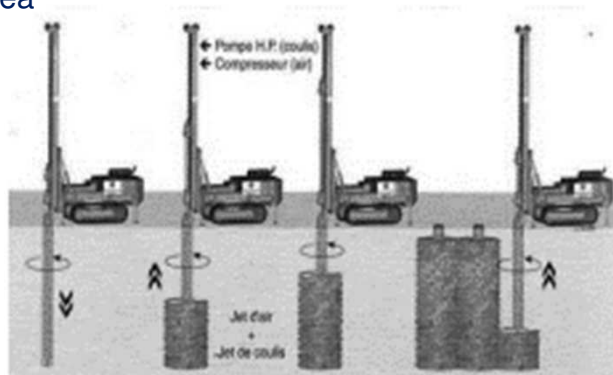
## 5- PROPOSITIONS DE TRAITEMENT

Critère d'appréciation	Scenario n°1 Démontage- reconstruction	Scenario n°2 Géogrille	Scenario n°3 Renforcement de sol
Travaux résiduels	+	++	--
Aléa inondation	+ Q100 à Q200	+ Q100 à Q200	~ Inondation du Val pour Q170 à Q200
Possibilité de rouvrir la chaussée	Restrictions	Oui mais risque de coupure régulière de la circulation	Oui
Impact sur le karst	-	-	++
Coût de la solution initiale	-	+	+++
Coût induit par la réouverture	+	++	--

# 5- PROPOSITIONS DE TRAITEMENT

## ✓ Jet Grouting

© Antea



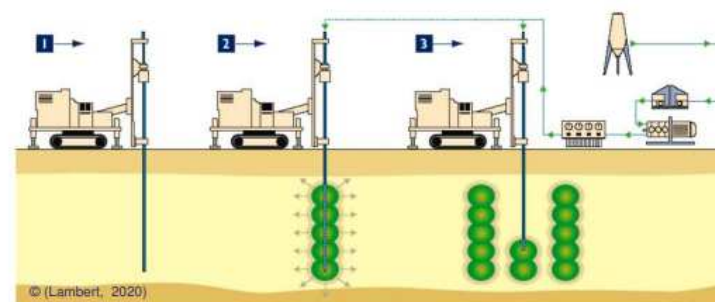
**Principe** : Traitement de la couche d'alluvions et partie supérieure du crypto-karst par jet grouting + traitement différencié du conduit

**Aléas de chantier attendus** : perte de coulis dans la nappe, problème de la traversée de la couche de grave en base des alluvions

**Impact** : perte de la transparence hydraulique de la couche d'alluvions et création d'un « point-dur » mais non perturbation du drain en profondeur

## ✓ Injections solides (CHS)

© Keller



**Principe** : Redensification des terrains dans le crypto-karst

**Aléas de chantier attendus** : horizon d'ancrage pour les colonnes d'injections solides

**Impact** : perturbation potentielle des drains karstiques en profondeur (maîtrisable en jouant sur les critères d'arrêt de l'injection et la profondeur de traitement)

# 5- PROPOSITIONS DE TRAITEMENT







Merci de votre attention