



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



*maîtriser le risque
pour un développement durable*

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA STABILITÉ DES CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES

Nathalie Conil - Ineris (SIT/RMC2)

**Journées francophones de mécanique des roches
et géologie de l'ingénieur**

14-15 mai 2025, Lille

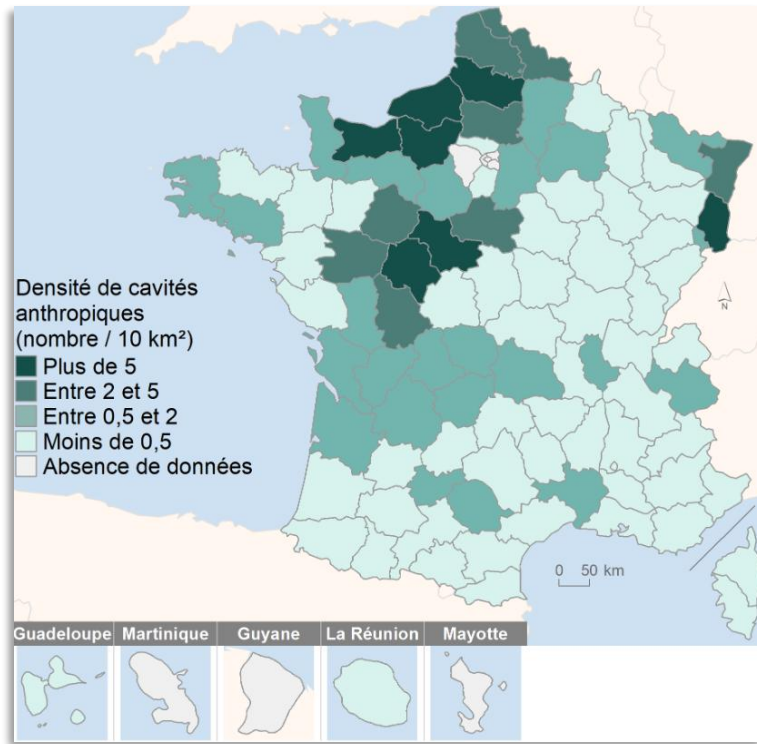
Ineris - 230717 - 2832413 0.1

Les carrières souterraines abandonnées

Une forte densité de carrières souterraines abandonnées

- 7 départements en recensent plus de cinq par km² (1,7 /km² en moyenne)
- Elles ont la particularité d'être peu profondes : < 50 m
- Leur stabilité dépend fortement de la nature du sol
- Elles sont souvent non entretenues et se dégradent inévitablement
- Le risque d'effondrement est difficile à évaluer.

Elles constituent un véritable enjeu territorial



Pourquoi le changement climatique peut accélérer les dégradations?

Le changement climatique transforme profondément l'environnement naturel, en particulier à travers :

- Une hausse progressive des températures
- Des alternances plus marquées entre sécheresse et humidité
- Une intensification des épisodes météorologiques extrêmes.

Les carrières peuvent alors réagir à plusieurs facteurs

- Variation de température (notamment proche des entrées)
- Infiltrations accrues d'eau
- Inondation par remonter de nappe ou débordement des cours d'eau
- Augmentation du battement des nappes
- Variation de la chimie des eaux

Carrière effondrée en Gironde : les maires inquiets face aux sites fragilisés par les pluies

Lecture 2 min

Accueil • Gironde • Libourne



Une maison voisine a également été touchée. Son occupant a dû être évacué. © Crédit photo : Linda Douli

Par Philippe Belbachs

Publié le 11/03/2024 à 19h29

Mis à jour le 12/03/2024 à 12h10



Écouter



Réagir



Voir sur la carte



Partager

Le danger présenté par certaines carrières souterraines est bien connu dans le Grand Libournaise. C'est l'un des enjeux de la définition des plans de prévention des risques mis en place ces dernières années

« Nous allons demander l'état de catastrophe naturelle. » Pour Jean-Luc Lamaison, maire de Nérigeau, c'est la bonne chose à faire, imputant aux fortes pluies l'effondrement d'une carrière souterraine déjà fragilisée qui a emporté, ce dimanche 10 mars, la maison qui était construite dessus, route de la Souloire à Nérigeau. « Le propriétaire doit se tourner vers les assurances », résume le premier magistrat de la commune. La maison était inhabitée depuis plusieurs années, une expertise avait fait apparaître un risque...

Annonces Google

Bloquer l'annonce

Pourquoi cette annonce ?

PREMIUM

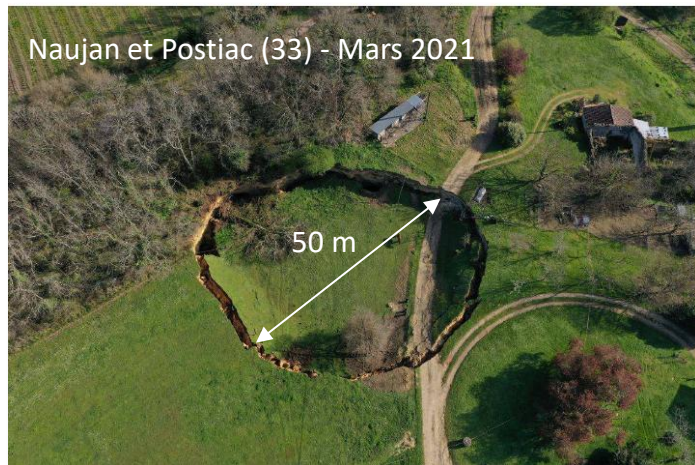
Sur Web, Tablette et Mobile

En souterrain

- Dégradation de l'ouvrage (piliers, voûtes, maçonnerie...)

En surface

- Affaissements progressifs
- Effondrements localisés
- Effondrements généralisés



Notre capacité à prédire ces désordres reste aujourd'hui limitée

De quelles manières ?

Modification du régime hydrique

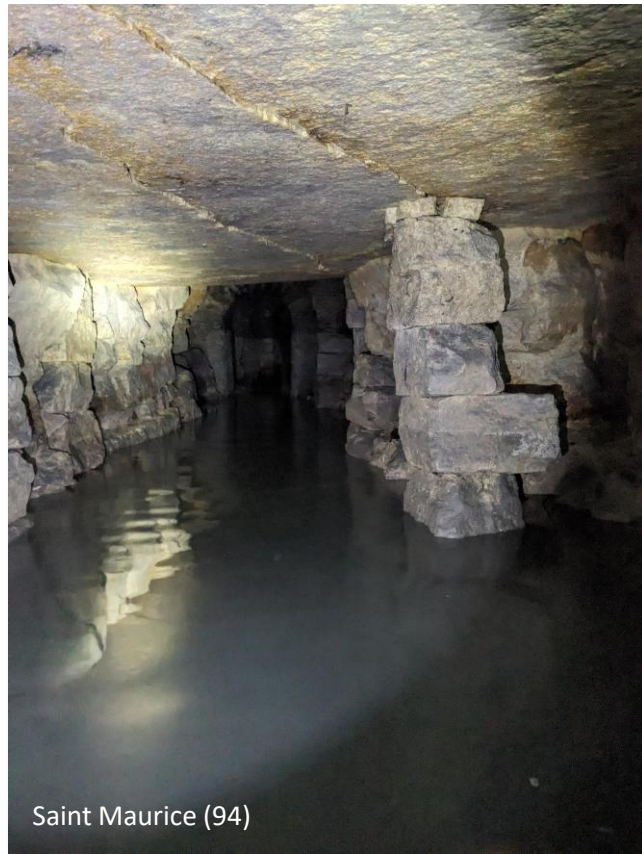
- Saturation soudaine → réduction de la résistance des piliers, lubrification des failles
- Désaturation → augmentation de la fissuration du massif

Modification du champ de contrainte

- Saturation/désaturation des terrains de recouvrement
→ diminution de la résistance au cisaillement
→ transfert de charge vers les vides/piliers
→ fatigue des piliers

Accélération des dégradations chimiques

- Percolation d'eaux non équilibrées chimiquement avec les massifs
→ contribution à la dégradation progressive des structures



Saint Maurice (94)

Chaque événement affecte une zone limitée

- ≠ un séisme : frappe des surfaces de plusieurs centaines ou milliers de kilomètres carrés
- Pas ou peu de signes précurseurs

Chaque événement est unique

- ≠ des inondations ou des pluies extrêmes pour qui on dispose de séries historiques de données qui permettent d'estimer sur un même site des périodes de retour

Un évènement résulte d'une combinaison de facteurs (Conil et al., 2024)

- Prédispositions (géométrie de la carrière, taux de défrètement...)
- Aggravants (géomorphologie, failles,)
- Déclenchant (eau, évènements climatiques,...)

Un risque majeur pour les aménagements, l'environnement
et dans certains cas pour les vies humaines

Peu ou pas d'effondrements directement attribués au changement climatique

Toutefois, certaines dégradations ou effondrement observés coïncident avec des événements climatiques extrêmes

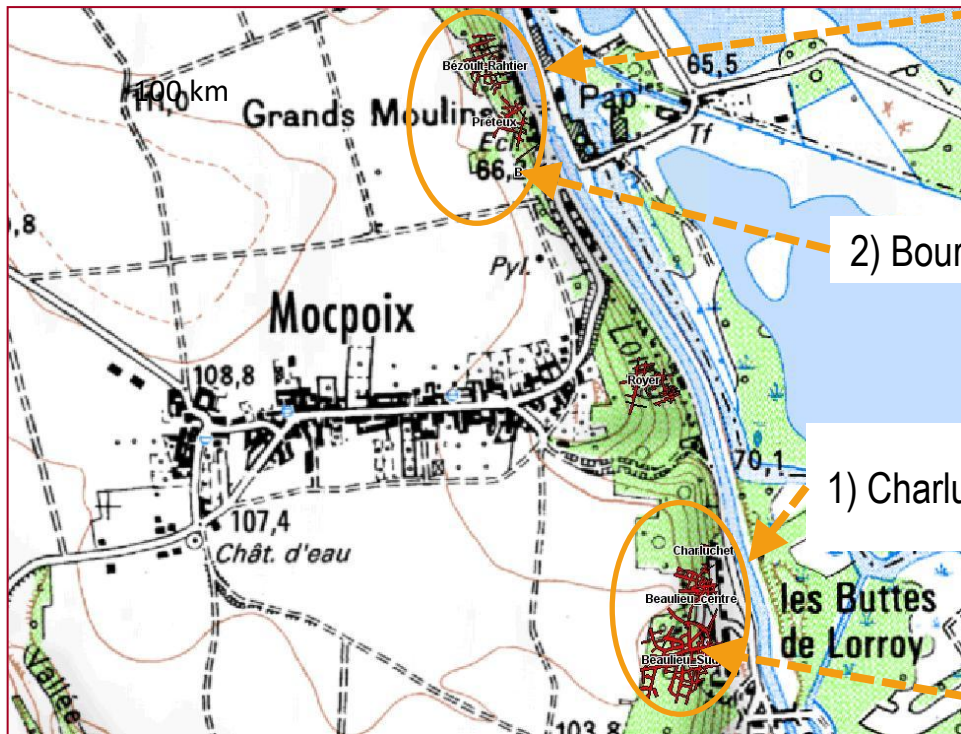
Le rôle du changement climatique est suspecté dans certains cas mais difficile à isoler des autres causes

- Complexité des interactions (climat, urbanisation, chargement en surface, état initial des carrières...)
- Manque de recul temporel : les effets peuvent se manifester a posteriori
- Phénomènes difficiles à modéliser avec les outils de diagnostic actuels

Un programme de recherche combinant différentes méthodes a été mis en place

Les carrières souterraines de Château Landon (77)

Watelet J.M., Kreziak C., 2010 ; Conil et al., 2023



3) Rathier : 1897

- Exploitation depuis 1844
- Chaux ou Blanc d'Espagne (poudre de craie broyée)
- Fond de la vallée du Loing
- 4 carrières effondrées dans le même secteur entre 1870 et 1910

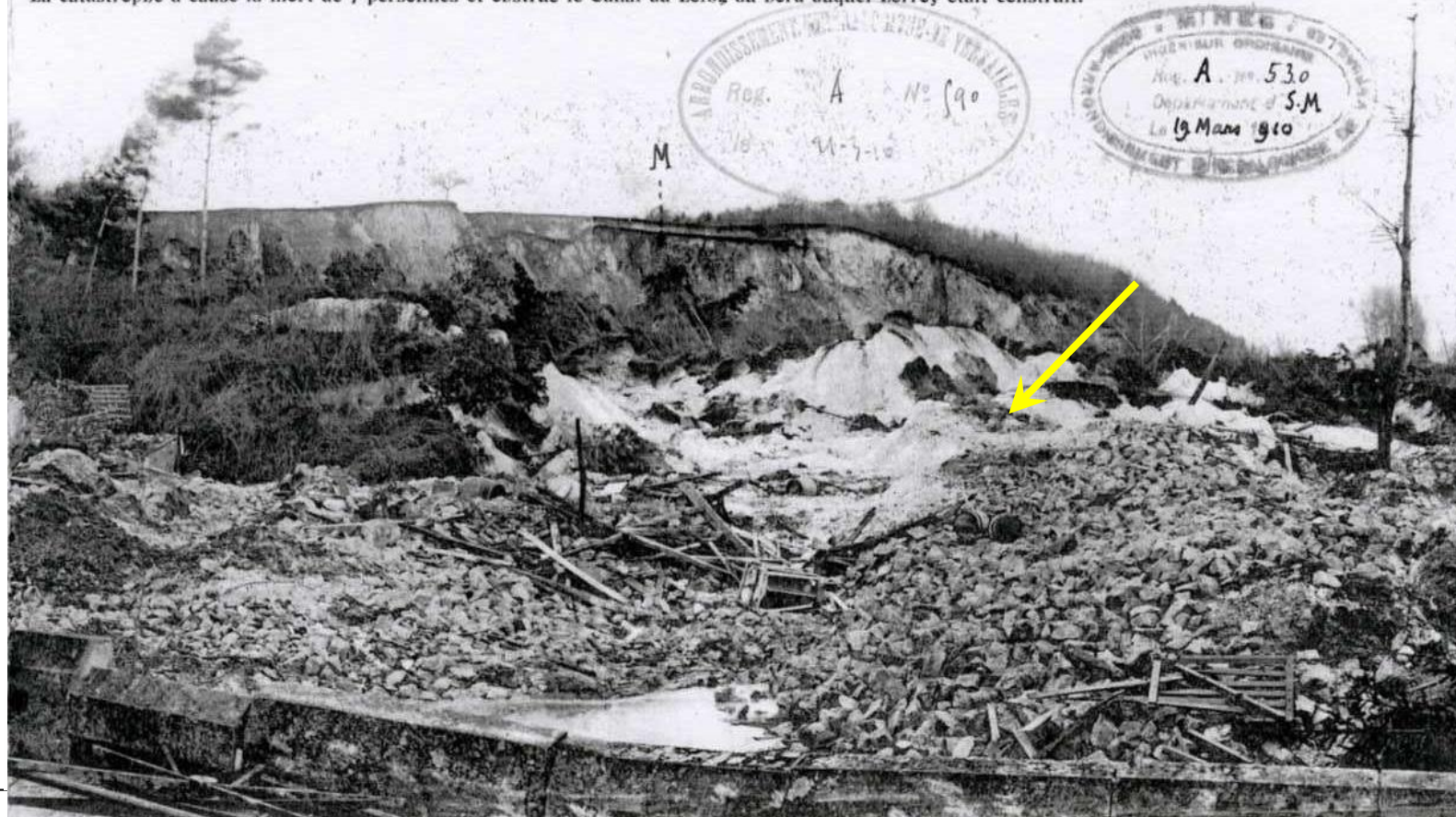
2) Bourdin : 1878

1) Charluchet : < 1878

4) Beaulieu : 1910
7 morts et plusieurs blessés

Catastrophe de LORROY — 21 Janvier 1910

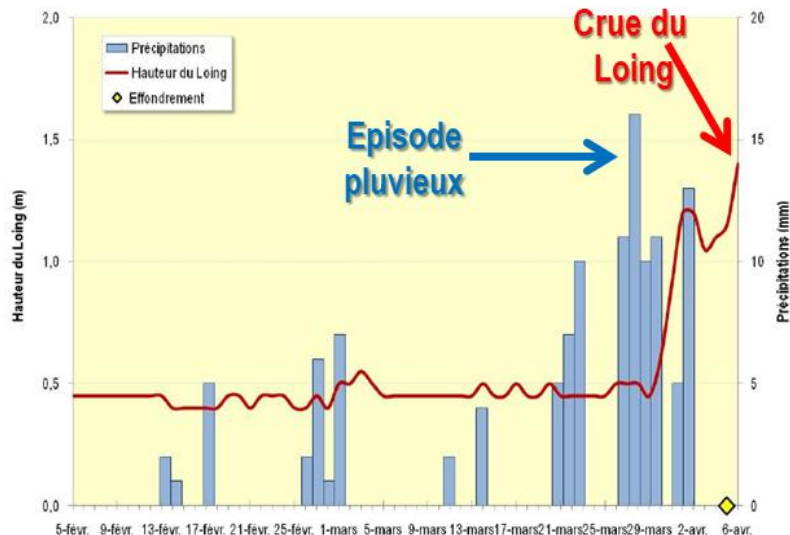
ndant de Château-Landen, se composait de 5 maisons qui furent écrasées et ensevelies sous l'éboulement de la falaise les surplombant.
La catastrophe a causé la mort de 7 personnes et obstrué le Canal du Loing au bord duquel Lorrey était construit.



Rétro-analyses hydro-climatique des effondrements

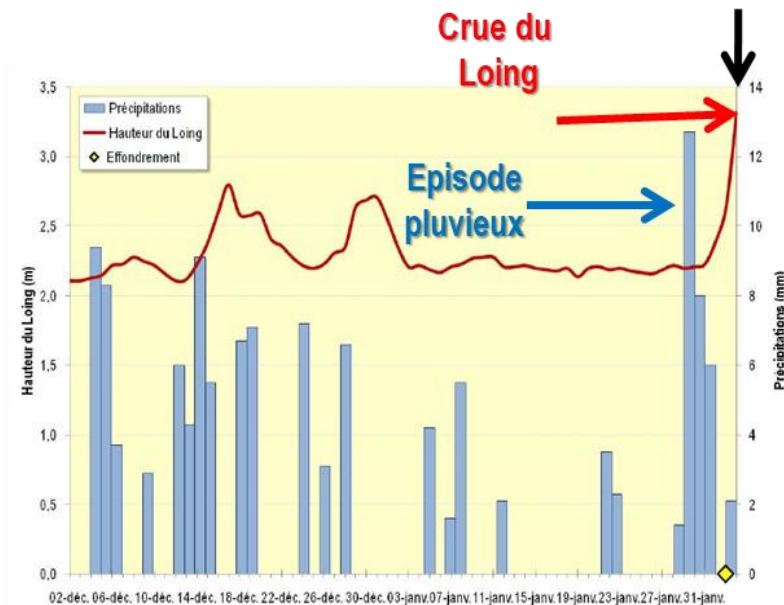
Gombert, 2010

Effondrement



Effondrement de la carrière Bourdin
1878

Effondrement

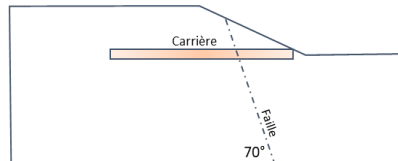


Effondrement de la carrière Rathier
1897

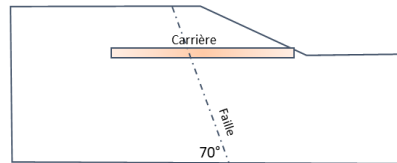
Méthode

- Modèle 2D avec hypothèse de déformations planes
- Code UDEC (Itasca), critère Mohr–Coulomb élasto-plastique
- 5 configurations testées : effets de la pente, de la faille et de la saturation

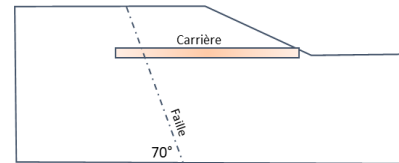
Impact de la faille



Configuration 3



Configuration 4



Configuration 5

Données

Rock Unit	Density $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	Young Modulus MPa	Poisson Ratio	Cohesion MPa	Friction Angle (°)	Compression Strength * MPa	Tensile Strength MPa
Unsaturated Chalk	20	500	0.22	1	30	3.5	0.2
Saturated chalk	20	100	0.23	0.35	30	0.9	0.2
Puddingstone	22	2000	0.30	Elastic			
Limestone	25	4000	0.30				
Joints/fault Symbol Unit	Normal Stiffness J_{kn} $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$		Tangential Stiffness J_{ks} $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$		Cohesion J_{coh} MPa	Friction Angle J_{fric} (°)	Tensile Strength J_{ten} MPa
No degraded Fault	298		205		5	30	5
Degraded fault	298		205				
Horizontal Joints	2500		1150				

Principaux résultats

Rôle de la saturation

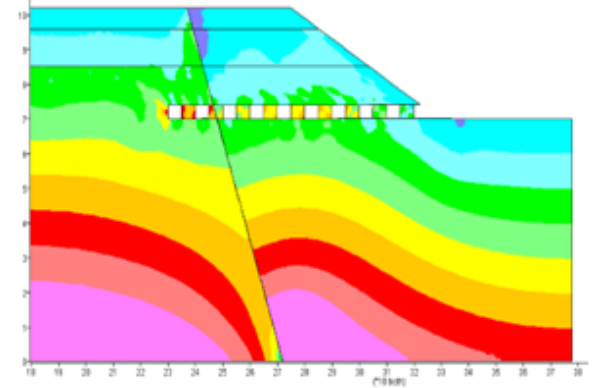
- Diminue fortement la résistance de la craie
- Provoque la déformation plastique des piliers

Contraintes de traction dans le recouvrement

- Apparition de tractions dans les bancs raides (calcaire/puddingstone) amplifiées par l'affaiblissement des piliers

Rôle déterminant de la faille

- Saturation de la faille : glissement facilité (réduction du frottement)
- Provoque une rupture progressive de la pente et l'effondrement massif



Diminution de la résistance
des piliers
+
Saturation de la faille
=
Effondrement

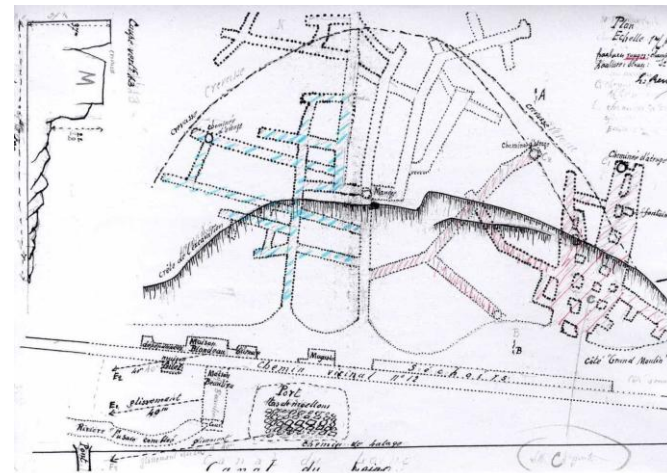
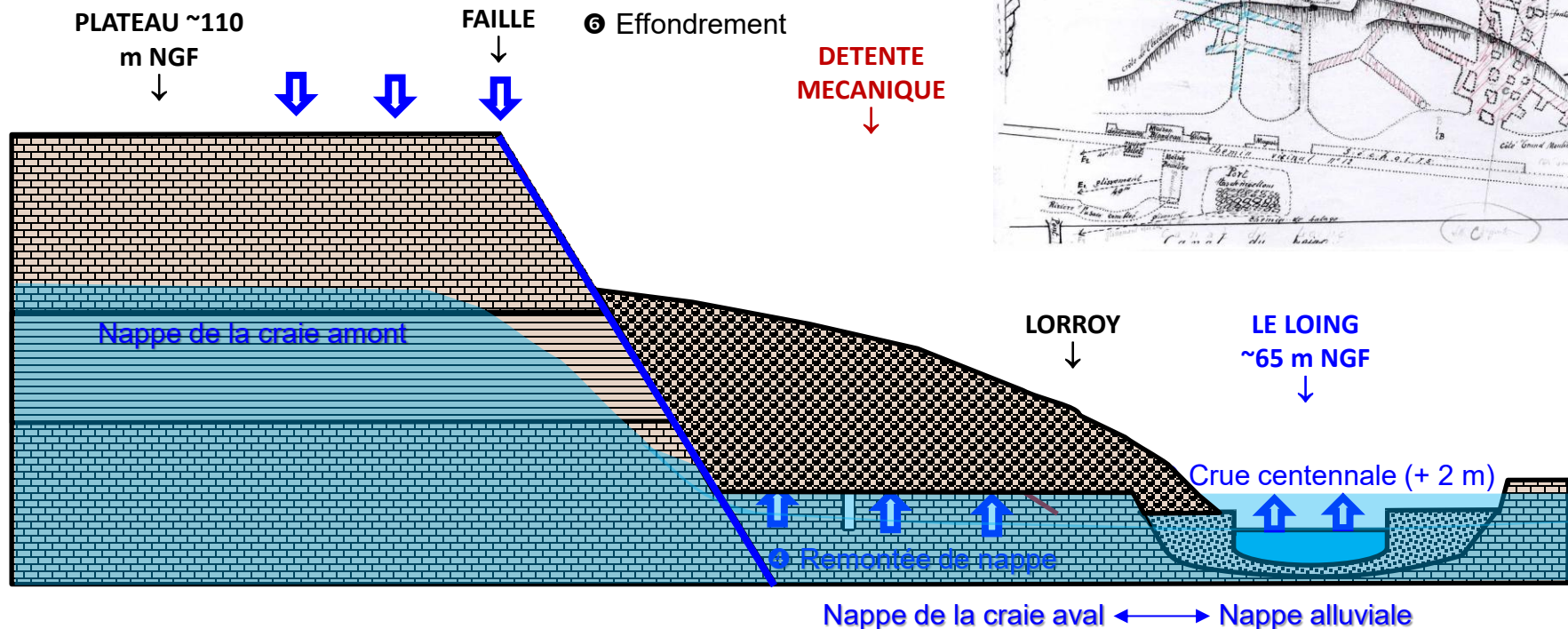
Scénario reconstitué de la catastrophe

Gombert et Conil, 2024

⑦ Glissement en masse

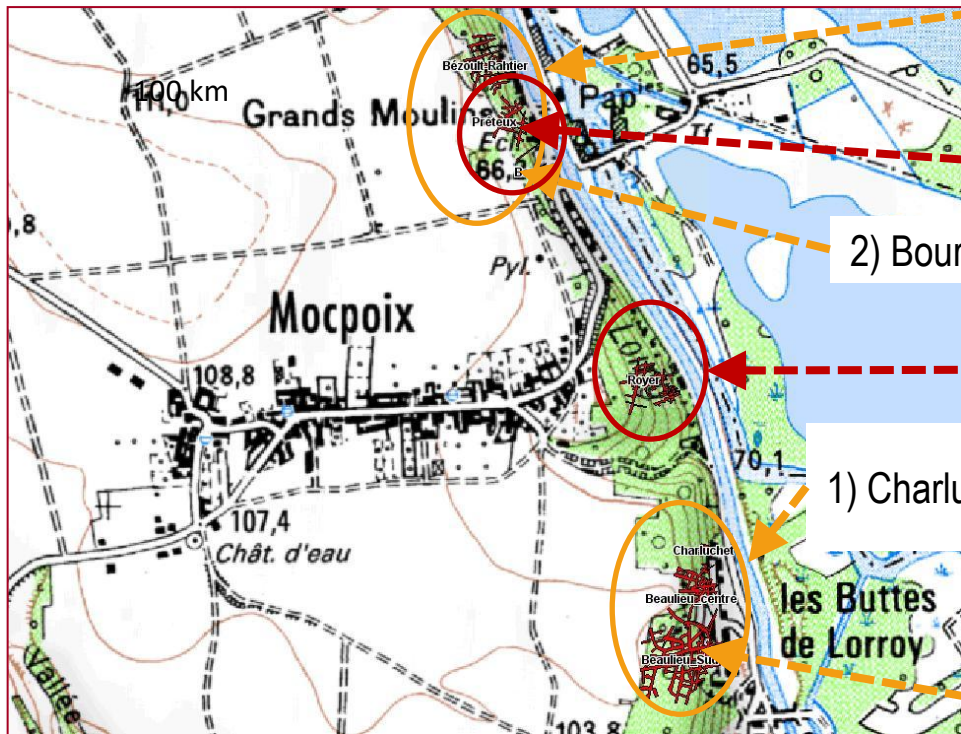
⑤ Ennoyage de la zone des « petits piliers »

⑥ Effondrement



Les carrières souterraines de Château Landon (77)

Watelet J.M., Kreziak C., 2010 ; Conil et al., 2023



3) Rathier : 1897

6) Pietreux

2) Bourdin : 1878

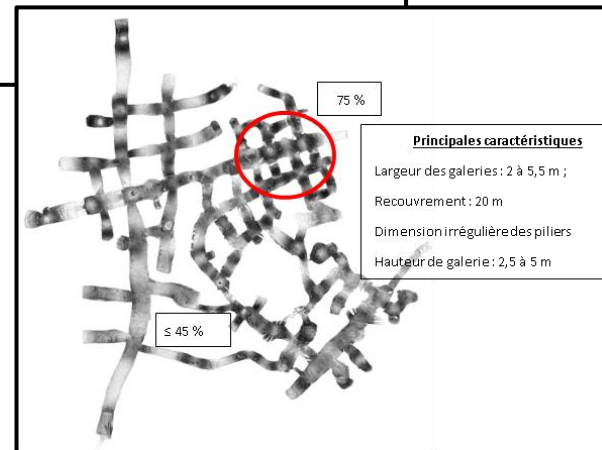
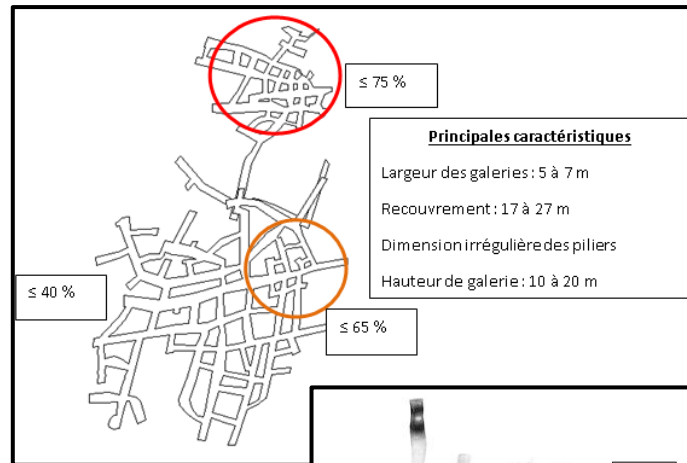
5) Royer

1) Charluchet : < 1878

4) Beaulieu : 1910
7 morts et plusieurs blessés

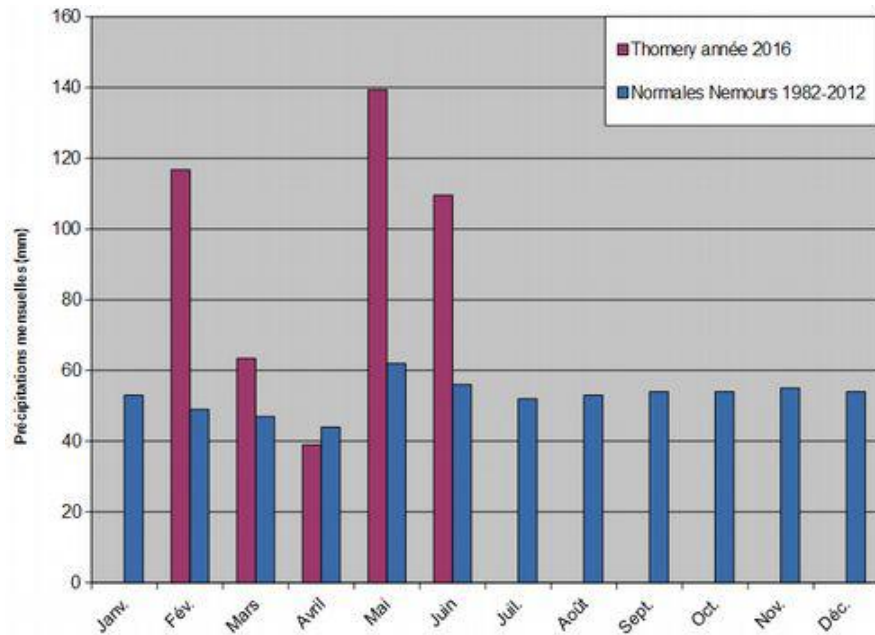
La carrière Royer

- Une des dernières carrières intacte dans le secteur
- Département Seine et Marne
- De nombreuses similitudes avec la carrière de Beaulieu
- Carrière abandonnée en 1931
- Située à moins de 200 m du Loing
- Ouvrage très fracturé



L'épisode climatique de 2016

Crue du Loing d'occurrence plus que centennale



Gombert, 2012



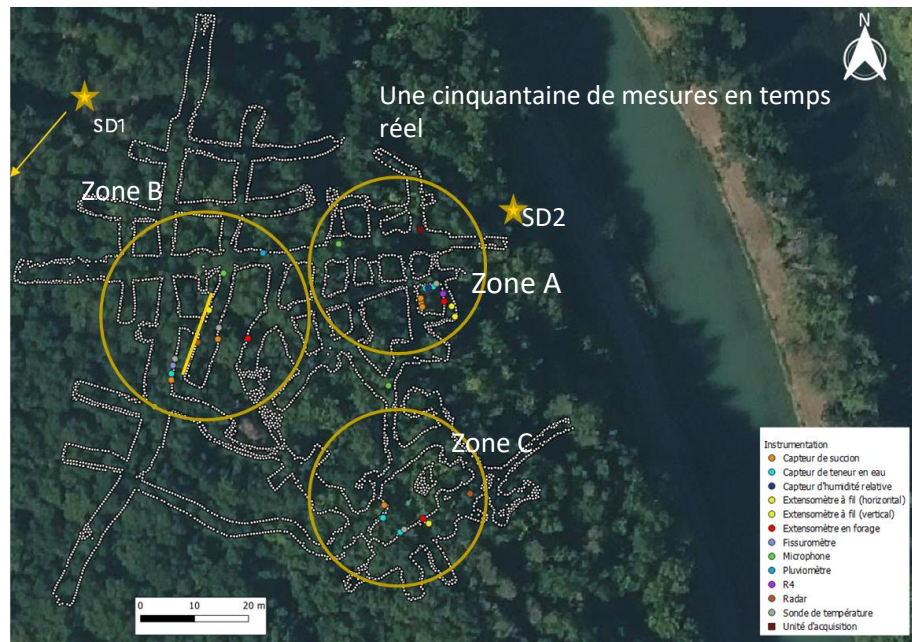
Eboulement en fond de cavité

Convention avec le département et le Cerema
Suivre l'évolution de la carrière en fonction des variations saisonnières

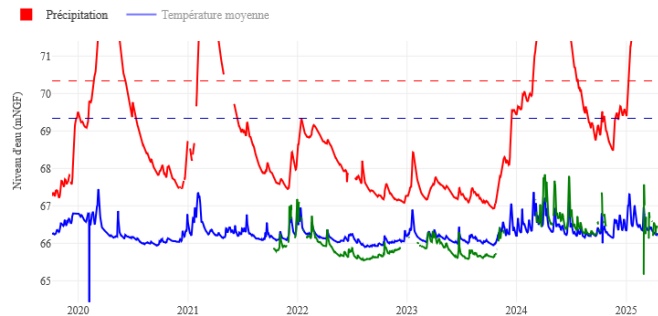
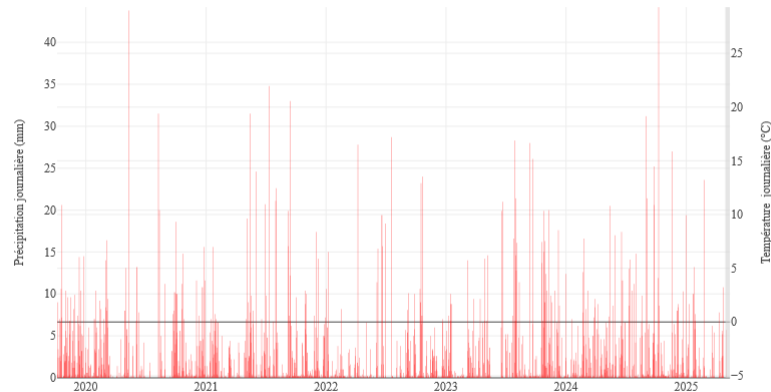
- Démarrage installation en octobre 2019
- Humidité > 95 %, température = 10-11°C

Mesures en cours

- Teneur en eau, succion
- Déformations dans le massif, en surface (extensomètres, radar)
- Fissuromètre
- Niveau piézométrique, niveau du Loing
- Chutes de blocs : microphones
- Inspections visuelles (Cerema), scanner 3D



Conil et al., 2022



Analyse des données en cours (bilan fin d'année)

- aucun épisode pluvieux exceptionnel
- très peu de déformations
- les teneurs en eau en profondeur dans le massif et le niveau piézométrique du SD2 sont assez bien corrélés
- quelques chutes de pierre : développement d'une méthode de classification des signaux acoustiques (Drif et al., 2024)
- nouveaux piézomètres en septembre 2025

<https://cenaris.ineris.fr/>

Caractérisation et modélisation de la craie de Château Landon

Pajiep, 2024

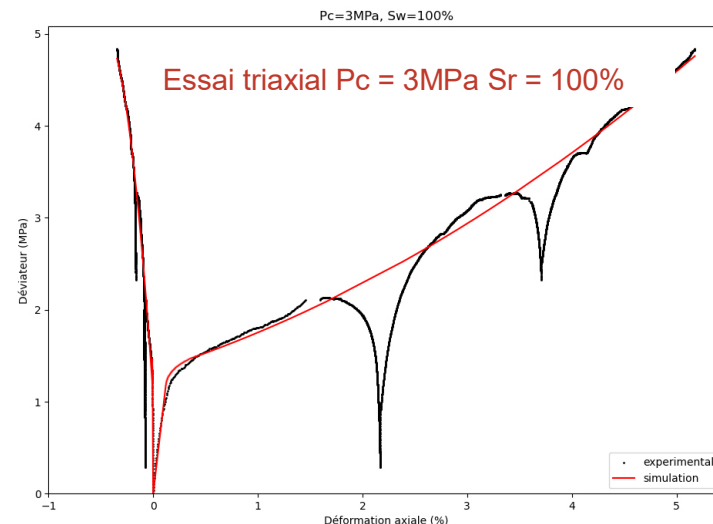
Pajiep et al., 2024

Impact de la saturation sur les propriétés mécaniques

- Essais triaxiaux à différentes saturations
- Essais triaxiaux à différentes pressions de confinement
- Essais hydrostatiques à différentes saturations

Modélisation élastoplastique par approche micromécanique

- Prise en compte de la saturation sur la valeur du seuil de pore collapse



$$\bar{\sigma} = \sigma_0(S_w) \left(1 + a(\varepsilon_{eq}^p)^n e^{b\varepsilon_{eq}^p} \right)$$

Inventaire des cas d'effondrement en France

Recenser et analyser des cas d'effondrement

Nombre d'effondrements : 550

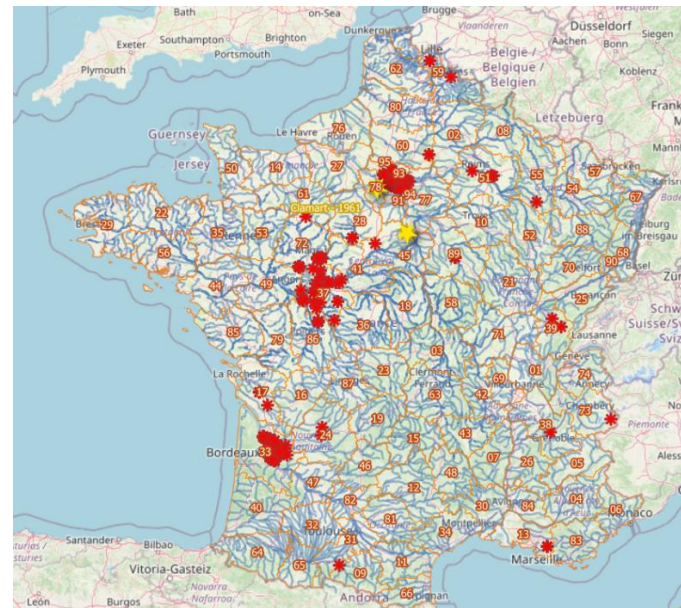
Nombre de départements : 30

Nombre de communes : 171

Nombre de paramètres : 48 (Localisation, Contexte, Exploitation, Effondrement)

Apprendre des événements du passé pour mieux gérer les risques dans le futur

- comprendre les effondrements passés : facteurs de prédisposition, facteurs déclenchants, facteurs aggravants
- évaluer l'impact du changement climatique : météo, hygrométrie, chimie de l'eau



Conil et al. 2024, Conil et Gombert, 2024

Corrélation avec les événements climatiques mémorables

Évènements mémorables : événements météo qui sont gravés dans la mémoire collective du fait de leur impact (tempête, canicule, pluie, crue .etc)
(Source : Météo France)

- 471 événements pluvieux mémorables recensés par Météo France depuis 1766
<http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/-Tous-les-evenements-.html>
- 140 effondrements datés au jour dans notre liste / 550 effondrements (actuellement) recensés



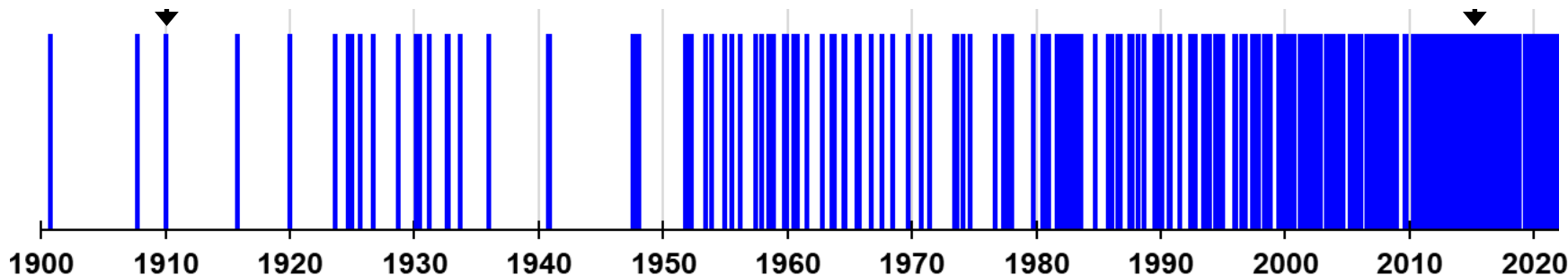
Crue centennale de 1910 – Paris
(<https://www.sh6e.com/>)

(Conil et Gombert, 2024)

Corrélation avec les événements climatiques mémorables

Conil et Gombert, 2024

Accélération discontinue des effondrements mais l'effectif est faible (biais dus aux signalements ou rapports) : seuls 2 effondrements en lien avec ces événements remarquables (Ch^t.-Landon, Gidy)



Nette accélération de la fréquence des pluies mémorables depuis le début du 19^e siècle

Corrélation avec des conditions climatiques dégradées

Conil et Gombert, 2024

Réf.	Conditions climatiques	Date de l'effondrement	Localisation
SGP33-03	<u>Pluies exceptionnelles</u> de l'hiver 1864-1865	07/02/1865	Saint-Germain-du-Puch (33)
CHA86-01	Hiver rigoureux avec <u>pluies abondantes</u> .	12/01/1887	Châtellerault (86)
EPN51-01, EPN51-02	<u>Pluies diluviennes</u> pendant l'hiver	23/02/1900, 20/03/1900	Epernay (51)
SGR33-02	<u>Pluies persistantes</u> 6 mois avant accident	05/05/1910	St-Germain-la-Rivière (33)
CRO33-01	<u>Pluies hivernales abondantes</u>	01/02/1920	Croignon (33)
CHP39-01	Plusieurs jours avant la catastrophe des <u>pluies diluviennes</u> se sont abattues sur la région	27/07/1964	Champagnole (39)
AVY17-01	<u>Très abondantes pluies</u> d'orage les 14 et 15 août dans une carrière peu profonde avec de <u>fortes infiltrations</u> d'eau au toit	Août 1972	Avy (17)
MFM93-01	<u>Fortes pluies</u> peu de temps avant le fontis	26/04/1986	Montfermeil (93)
MBO09-01	Effondrement amplifié par des <u>venues d'eaux</u> météoritiques à travers recouvrement	2000	Mercenac-Bonrepaux (09)
LOS59-01	Année de <u>fortes pluies</u>	27/12/2001	Loos (59)
NEP33-01	<u>Pluies abondantes</u> au cours des derniers mois et <u>infiltrations</u> dans la carrière	13/03/2021	Naujan-et-Postiac (33)

Légende :

Pluies

Infiltrations d'eau

11 cas intéressants sur
86 observations liées à
des conditions
hydroclimatiques
dégradées



**Influence probable
de l'eau dans 13 % des
effondrements**

Un facteur aggravant pour les carrières souterraines abandonnées

- Le changement climatique agit souvent de manière indirecte mais durable
- L'eau en est le principal vecteur d'instabilité (infiltrations, désaturation, surcharge hydrique)

Vers une meilleure anticipation des risques

- Plusieurs études, combinant essais expérimentaux, modélisations numériques et analyses statistiques, machine learning sont en cours
- Un réel besoin d'intégrer ces phénomènes dans les modèles de stabilité.
- Le croisement entre conditions climatiques, paramètres d'exploitation et matériaux exploités permettra d'identifier plus précisément les zones sensibles.

Mieux prédire les instabilités en lien avec les événements climatiques extrêmes, et intégrer ces risques dans la gestion à long terme des structures souterraines.

Poursuite des travaux de Pajiep

- Validation du modèle de comportement de la craie en l'appliquant à la carrière Royer
- Évaluation de scénarios d'effondrement potentiels

Poursuite de l'inventaire

- Enrichissement de l'inventaire pour améliorer la robustesse des modèles
- Poursuite des travaux de machine learning pour l'analyse des données
- Prise en compte des paramètres hydro-climatiques dans les analyses
- Exploration de nouvelles méthodes (ex : PINN's, Régressions symboliques)

Études du fonctionnement hydrogéologique de l'observatoire de Château Landon

- Origine de l'eau qui imbibe les parois et les piliers
- Rôle des discontinuités dans les flux
- Impact de la qualité de l'eau et de ses fluctuations

Analyse de cas d'école (Naujan et Postiac, 2021 : Renaud, 2023 , Lecomte et Pilsh, 2022, Conil et Gombert, 2024)

- Visites de terrain
- Essais sur échantillons
- Retro-analyse (hydro-climatique, HM)

Je vous remercie pour votre attention



Clamart, 1961 - (Al Heib et al., 2014)

Gidy (45) au nord d'Orléans

(Noury et al., 2018)



Inondation été 2016 © D. Chauveau

14 effondrements et 6 affaissements sur un
demi-hectare : ruine d'une ancienne carrière



Source : Brgm