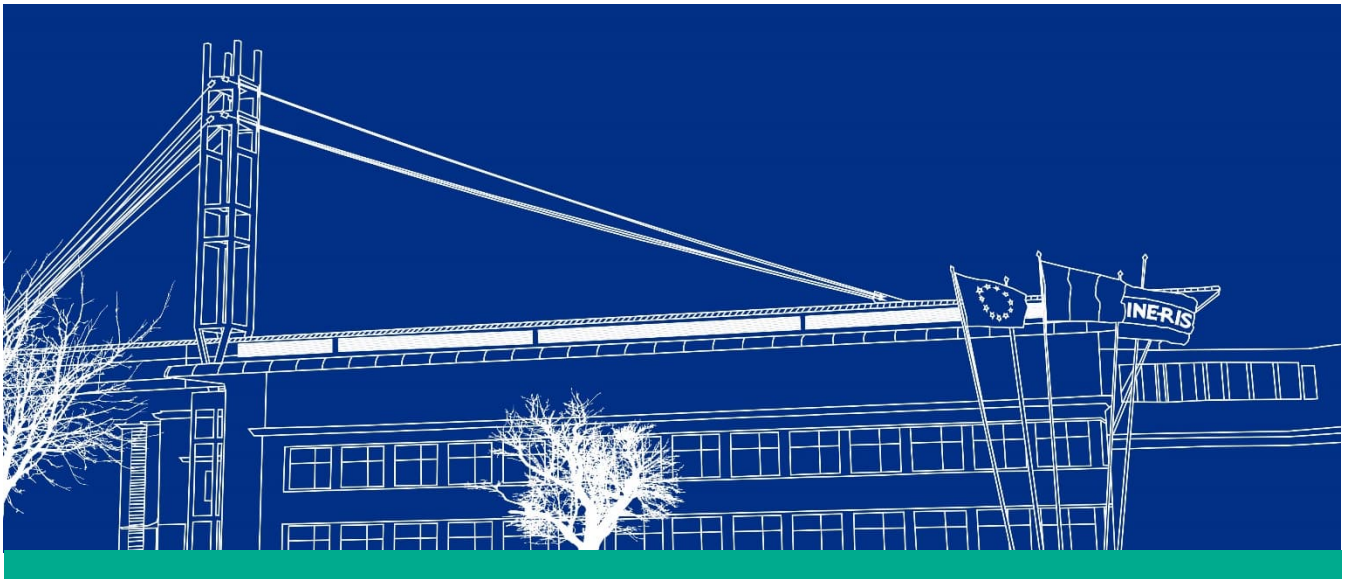
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 230711 - 2833688 - v1.0

27/01/2026

Observatoire de Château-Landon (77)

Synthèse des données acquises après six ans de suivi instrumental et observationnel

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : CONIL Nathalie, FAVIER Sylvain, DEFFRENNE Timothée

Vérification : LECOMTE AMELIE; AL HEIB MARWAN, POULARD FREDERIC

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 27/01/2026

Liste des personnes ayant également participé à l'étude :

- Ineris : Juliette COTTE, Roxane MULLER, Philippe GOMBERT, Sanka RUPASINGHE, Nicolas SPITZENSTEDER, Régis TOUSSAINT, Kamel DRIF, Julien HOERNER
- Cerema : Fabrice GAUMET, Emmanuel DUMONT

Table des matières

1 Cadre et contexte 9
2 Présentation générale du site 10
2.1 Choix du site de l'ancienne carrière souterraine Royer à Château-Landon 10
2.1.1 L'effondrement de la carrière Beaulieu 10
2.1.2 Constats préalables 13
2.2 Caractéristiques de la carrière 15
2.3 Environnement géologique et hydrologique de la carrière 16
2.4 Caractéristique et épaisseur du remblai 17
3 Dispositif d'instrumentation 20
3.1 Cartographie du site et localisation des capteurs 20
3.2 Présentation détaillée de l'instrumentation déployée sur site 22
3.2.1 Suivi hydrogéologique 22
3.2.2 Suivi géotechnique 25
3.2.3 Suivi des conditions climatiques internes et externes 29
3.3 Difficultés d'installation des capteurs dans la craie 29
3.3.1 Installation des capteurs de teneur en eau 29
3.3.2 Perturbations liées à la foration du massif crayeux 30
3.4 Suivi, fonctionnement et maintenance de l'instrumentation 31
4 Premières analyses et interprétations des données 33
4.1 Méthodologie d'analyse des données : une approche exploratoire 33
4.2 Analyses temporelles (ou chroniques) par type de données 33
4.2.1 Températures et précipitations à la station de Nemours (77) 33
4.2.2 Niveau de la nappe et de la rivière 36
4.2.3 Température mesurée devant la carrière 37
4.2.4 Teneurs en eau volumiques 38
4.2.5 Succions 39
4.2.6 Température et humidité relative 40
4.2.7 Déplacements extensométriques 43
4.2.8 Déplacements radar 47
4.2.9 Fissuromètre 48
4.2.10 Relevé de fracturation 49
4.2.11 Données acoustiques 51
4.2.12 Comparaison de nuages 3D 53
4.3 Analyse des corrélations par secteur (ou spatiale) 58
4.3.1 Zone A 58
4.3.2 Zone B 62
4.3.3 Zone C 68
4.4 Fonctionnement hydrogéologique du site 73
4.4.1 Sources potentielles des apports en eau de la carrière 73
4.4.2 Contribution des différentes sources à l'eau des piliers 80
4.4.3 Impact de l'eau sur la stabilité des piliers 84

5 Discussions, Synthèse et Perspectives 85
6 Références 90
7 Annexes 94
Annexe 1 : Analyses chimiques des eaux de SD1, SD2 du canal, du Loing, des eaux interstitielles et de la pluie 95

Liste des Figures

Figure 1 : Vue de la zone avant/après l'effondrement de la carrière de Beaulieu en 1910 (source : DRIEE IdF archives) 10
Figure 2 : Précipitations quotidiennes et hydrologie à Nemours au cours des deux mois précédant l'effondrement du 21/01/1910 (Conil et al., 2023) 11
Figure 3 : Schéma de la zone effondrée établi en 1910 par les ingénieurs des Mines (d'après Watelet et al., 2016) 12
Figure 4 : Modèle conceptuel de l'effondrement 12
Figure 5 : Schéma d'exploitation des carrières de Beaulieu (à gauche) et de Royer (à droite) 13
Figure 6 : Comparaison des précipitations à Nemours : normale 1982-2012 vs année 2016 d'après Conil et al. (2023) 14
Figure 7 : Dégâts constatés dans la carrière de Royer à la suite des épisodes pluvieux exceptionnels de 2016 (Kreziak & Cherkaoui, 2016). 14
Figure 8 : Dimensions de la carrière Royer 15
Figure 9 : Hauteurs des galeries de la carrière Royer 16
Figure 10 : Coupe schématique géologique de l'observatoire de Château Landon, d'après (Conil et al., 2023) 16
Figure 11 : Carte géologique des environs de Château-Landon (voir légendes dans le texte) (d'après Infoterre) (Conil et al., 2023) 17
Figure 12 : Essais pénétrométriques réalisés par le Cerema en mai 2021 18
Figure 13 : Localisation des sondages et épaisseur estimée des remblais entre parenthèse, en mètre (Gaumet et al., 2021) 18
Figure 14 : Pilier instrumenté dans la zone des petites piliers – Zone A 21
Figure 15 : Implantation des zones d'étude et du réseau de capteurs de l'observatoire de Château Landon – CIMx : microphones 21
Figure 16 : Installation des capteurs de teneur en eau 23
Figure 17 : Capteur Thetaprobe (à gauche, source : agriexpo). Capteurs de teneur en eau dans le pilier (à droite) 23
Figure 18 : Capteur de succion type WATERMARK Model 200SS (à gauche). Capteurs de succion dans le pilier (à droite) 24
Figure 19 : Nettoyage de la sonde piézométrique SD2 (à gauche). Forage piézométrique SD1 (au milieu). Limnimètre dans le Loing (à droite) 25
Figure 20 : Extensomètre 2 points en forage (Source : Sisgeo) (à gauche). Extensomètre dans le pilier (à droite) 26
Figure 21 : Fissuromètre installé en zone B pour suivre l'évolution d'une fracture 27
Figure 22 : Capteur acoustique sur pied dans la carrière 28
Figure 23 : Scanner laser 3D FARO Focus3D X330 utilisé pour les tests de surveillance 28
Figure 24 : Station climatique dans la carrière (à gauche). Capteur de température à l'extérieur au-dessus de l'entrée 1 (à droite). 29
Figure 25 : Les différents éléments du gabarit fabriqué pour l'installation des capteurs de teneurs en eau 30
Figure 26 : Transformation de la craie en boue lors de la foration 31
Figure 27 : Température et précipitation à la station Météo France de Nemours (77) située à 15 km de Château Landon 34
Figure 28 : Précipitations cumulées interannuelles par trimestre depuis 2019 (station de Nemours) 35
Figure 29 : Température moyenne interannuelle par saison depuis 2019 (station de Nemours) 35
Figure 30 : Niveau de la nappe mesurée en amont (SD1 en rouge) et aval hydraulique (SD2 en bleu) de l'observatoire de Château Landon et niveau du Loing en gris sombre. 36
Figure 31 : Niveau moyen interannuel de la nappe dans le piézomètre SD1 par trimestre (T) 36
Figure 32 : Températures mesurées à l'extérieure de la carrière devant l'entrée 1 37
Figure 33 : Écarts de température entre la station de Nemours et le site de la carrière Royer 37

Figure 34 : Teneurs en eau à 5 cm, dans les différentes zones de l'observatoire 38
Figure 35 : Teneurs en eau à 50 cm, dans les zones A et C de l'observatoire de Château Landon 39
Figure 36 : Succions mesurées dans les zones A et B 2b à différentes profondeurs dans le massif ...40
Figure 37 : Températures mesurées dans les différentes zones de l'observatoire et température mesurée à l'extérieure.....41
Figure 38 : Humidités relatives mesurées dans les différentes zones de l'observatoire 42
Figure 39 : Comparaison des mesures d'humidités relatives mesurées à l'aide d'un capteur conventionnel (ligne bleue continu) et d'un capteur haute performance (ligne bleu pointillée) – Carrière de Saint Maximin (60) 43
Figure 40 : Déplacements mesurés en forages, à 65 cm et 130 cm de profondeur, dans les différentes zones de l'observatoire 43
Figure 41 : Signal extensométrique enregistré avec un des extensomètres à fil en paroi (brut, modèle thermique et signal corrigé).....44
Figure 42 : Spectre de fréquence (FFT) du forage extensométrique à fil en paroi 44
Figure 43 : Déplacements mesurés en forages à 65 cm et 130 cm de profondeur corrigées en température les différentes zones de l'observatoire 45
Figure 44 : Déplacements extensométriques à fil corrigés en température dans les différentes zones de l'observatoire de Château Landon 45
Figure 45 : Distances mesurées au radar depuis l'installation. Zoom sur octobre 2025. 47
Figure 46 : Hypothèses de projection d'onde radar 47
Figure 47 : Déplacements du remblai dans la zone C mesurés au radar.....48
Figure 48 : Écartement de fissure dans la zone B de l'observatoire de Château Landon 49
Figure 49 : Évolution de l'ouverture de la fracture dans la zone B 2b -mesures corrigées (effet thermique retiré).....49
Figure 50 : Cartographie des données de fracturation dans la carrière Royer (Gaumet et al., 2021) ..50
Figure 51 : Diaclase à veine siliceuse de direction N80 (pendage de 72° orienté Nord). Prise de vue depuis le coin Nord-Ouest du pilier (Gaumet et al., 2021). 51
Figure 52 : Exemple de signal déclenchant sur le microphone CIM2.....51
Figure 53 : Positionnement des 80 stations lors des campagnes de relevés scanner de l'observatoire de Château Landon 54
Figure 54 : Assemblage puis comparaison des nuages de points 2016 et 2024 55
Figure 55 : Écarts « parasites » localisés uniquement au sol 56
Figure 56 : Section au droit des extensomètres à fils en zone A : 2016 (à gauche) et 2024 (à droite).56
Figure 57 : Section au droit des extensomètres à fils en zone C : 2016 (à gauche) et 2024 (à droite) 56
Figure 58 : Visualisation de la position initiale de l'écaille sur le parement (cercle rouge) 57
Figure 59 : Bâche installée sous le puits.....57
Figure 60 : Représentation schématique de la localisation des extensomètres dans la zone des petits piliers – Zone A.....58
Figure 61 : Comparaison du niveau de la nappe alluviale (SD2) et des déplacements extensométriques avec leurs décalages temporels optimaux 59
Figure 62 : Mesures de teneur en eau dans le pilier de la zone des petits piliers – Zone A.....60
Figure 63 : Corrélation croisée normalisée entre le niveau de la nappe SD2 et la teneur en eau à 5 cm 61
Figure 64 : Mesures de succions dans le pilier de la Zone A.....62
Figure 65 : Exemple de capteurs de température, de teneur en eau et de succion (de gauche à droite) en Zone B – 2a 63
Figure 66 : Représentation schématique de la localisation des mesures de déplacements dans la zone B – Zone 2 a 63
Figure 67 : Teneur en eau volumique à 5 cm de profondeur dans Zone B - 2a 64
Figure 68 : Teneur en eau volumique moyenne à 5 cm dans le massif en Zone B 2a 65
Figure 69 : Teneurs en eau à 5 cm et 30 cm de profondeur dans Zone B : zone 2a.....65
Figure 70 : Corrélation croisée normalisée entre l'humidité relative de la zone B 2b et la teneur en eau à 31 cm, avec un décalage maximal de 130 jours (ligne jaune) et un décalage nul (ligne rouge).....66
Figure 71 : Superposition temporelle de la température et de la teneur en eau à 30 cm de profondeur dans le massif.....67
Figure 72 : Superposition temporelle de la température et de la succion à 40 cm de profondeur dans le massif.....67
Figure 73 : Superposition temporelle de l'humidité relative et du déplacement (corrigé thermiquement) de la fracture dans la zone B-2b.....68

Figure 74 : Représentation schématiques de la localisation des extensomètres et de la mesure au radar dans la zone témoin – Zone C.....69
Figure 75 : Mesures de déplacements extensométriques après corrections avec la température dans la zone C.....69
Figure 76 : Déplacements moyens interannuels par saison mesurés en zone C au radar 70
Figure 77 : Teneurs en eau volumiques mesurées dans le massif à différentes profondeurs dans la zone C 71
Figure 78 : Teneur en eau volumique mesurée dans le remblai de la zone C.....72
Figure 79 : a) Localisation des piézomètres SD1, SD2 par rapport à la carrière Royer, au canal du Loing et à la rivière du Loing. b) Coupe des niveaux piézométrique dans le massif au printemps 2021 (en bleu) et en automne 2021 (en jaune).....73
Figure 80 : Matrice de corrélation de Spearman entre les teneurs en eau dans les piliers à 5 cm (w_5cm), 20 cm (w_20cm), 50 cm (w_50cm) de profondeur, les précipitations, le niveau piézométrique de SD1, de SD2 et le niveau du Loing. 74
Figure 81 : Carte de corrélation de Spearman entre SD1 et le cumul de précipitation déphasé. Seules les données statistiquement significatives relativement au seuil de 5% (p-value < 0,05) sont représentées sur la carte.....75
Figure 82 : Évolution du niveau de la nappe de la craie et de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour la configuration donnant la corrélation maximale : précipitations cumulées sur 95 jours et déphasage de 199 jours.....76
Figure 83 : Variations du niveau de la nappe de la craie en fonction de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour toute configuration donnant une corrélation de Spearman supérieure à 0.8.....77
Figure 84 : Évolution du temps de trajet théorique de la pluie pour atteindre la nappe de la craie, calculé à partir de l'estimation de la conductivité équivalente des terrains recouvrant la nappe. En vert et en rose, bornes supérieures et inférieures déduites des temps trajets estimés à partir de l'analyse de la corrélation.....78
Figure 85 : a) Carte des corrélations de Spearman entre SD2 et le cumul des précipitations déphasé. Seules les valeurs statistiquement significatives relativement au seuil de 5% (p_value < 0,05) sont représentées. b) Évolution du temps de trajet théorique de la pluie pour atteindre la nappe alluviale estimé à partir de la conductivité équivalente du recouvrement. c) Variations du niveau de la nappe alluviale en fonction de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour toute configuration donnant une corrélation de Spearman supérieure à 0.75.....79
Figure 86 : Dispositif de prélèvement de l'eau interstitielle au moyen d'une bougie poreuse raccordée à a) : une pompe à vide, b) une seringue 80
Figure 87 : ACP des analyses chimiques pour les éléments majeurs dans les eaux de SD1, SD2, le canal du Loing et le Loing 81
Figure 88 : ACP restreinte aux cations pour l'ensemble des prélèvements d'eaux interstitielles dans les piliers de la carrière.....82
Figure 89 : a) ACP des analyses chimiques pour les éléments majeurs dans les eaux de SD1, SD2 et les eaux interstitielles à l'entrée 1 de la carrière et dans la zone A. b Diagramme de Piper des eaux dans SD1, SD2 le canal du Loing, le Loing, les eaux interstitielles et les eaux de pluies du massif central et de l'est de la France (eaux de pluie d'après Négrel & Roy, 1998; Sanusi et al., 1996) 83
Figure 90 : Diagramme d'activités de la calcite montrant l'état de saturation des différentes eaux étudiées vis à vis de la calcite, ainsi que la sensibilité de cet équilibre aux variations de pH pour les eaux interstitielles. Une eau est en équilibre avec la calcite si elle est dans le domaine jaune. 84
Figure 91 : Vue des silex dans le pilier instrumenté de la zone A – image scanner – Source : Ineris ..86
Figure 92 : Forages réalisés dans le cadre de la thèse de Lafrance (2016)– photos prises en 2023...87

Résumé

La crue centennale de janvier 1910 a provoqué l'effondrement catastrophique de la carrière souterraine de craie de Beaulieu à Château-Landon, résultant d'une succession de processus hydrologiques et géomécaniques, incluant des précipitations intenses, une montée rapide d'un cours d'eau, la mise en charge hydraulique du massif crayeux et la remontée de la nappe phréatique. L'inondation progressive de la carrière, renforcée par des infiltrations localisées le long d'une faille, a affaibli les piliers supportant l'ouvrage souterrain, déclenchant un effondrement généralisé. Dans un contexte de changement climatique, caractérisé par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux, ce type de mécanisme demeure susceptible de se reproduire dans d'autres carrières souterraines de craie abandonnées.

La carrière Royer, voisine de celle de Beaulieu mais restée stable, a été instrumentée depuis 2019 en tant qu'observatoire souterrain afin d'étudier les interactions hydromécaniques et d'évaluer l'influence des circulations d'eau sur la stabilité de massifs crayeux, anciennement exploitée en souterrain. Le dispositif, combinant capteurs géomécaniques et hydriques, levés scanner 3D et inspections géotechniques, n'a révélé aucune déformation macroscopique sur six années de suivi. Néanmoins, les données mettent en évidence des processus lents d'altération de la craie, liés à sa forte porosité et à sa sensibilité aux variations hydriques, se traduisant par une modification progressive des propriétés mécaniques et hydrauliques du massif sans expression immédiate en surface. Le comportement des fractures et les hétérogénéités de teneur en eau observées confirment la sensibilité du système aux micro-variations hydromécaniques, soulignant l'intérêt d'un suivi instrumental à long terme pour suivre et caractériser l'évolution de la dégradation de ces propriétés et, in-fine, pour anticiper d'éventuelles instabilités différées. À ce jour, le dispositif s'est montré fiable et capable de détecter des signaux faibles, ouvrant la voie à de possibles approches prédictives à long terme.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Observatoire de Château-Landon (77), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 230711- 2833688 - v1.0, 27/01/2026.

Mots-clés :

Carrière souterraine, Mouvements de terrains, Effondrements, Craie, Surveillance, Mesures in-situ, Comportement à long-terme.

Château-Landon, Seine et Marne (77)

« L'assise crayeuse coupée de fissures ou diaclases, où circulent des réserves considérables d'eau intéressent les hydrologues. Cette imprégnation d'eau dans les parties friables, devenues une véritable pâte glissante, peut entraîner des catastrophes »

Maurice Royer à propos de la craie de Château
Landon, 22 septembre 1926, Bulletin de l'association
des Naturalistes de la vallée du Loing

1 Cadre et contexte

En raison de sa géologie et de son histoire industrielle, la France compte de nombreuses cavités souterraines naturelles et anthropiques. On estime leur nombre à environ 500 000, dont la majorité ne sont pas précisément localisées. Selon la base de données nationale du site georisques.gouv.fr, on dénombre, hors Île-de-France, environ 42 000 carrières souterraines abandonnées. En Ile de France, la superficie sous-cavée demeure considérable, avec près de 4 700 hectares à Paris et dans la petite couronne, et plus de 10 000 hectares dans la grande couronne.

Une partie de ces carrières se situent sous ou à proximité des secteurs bâtis ; les enjeux liés à la stabilité de ces ouvrages sont majeurs, tant sur le plan humain qu'économique. Plusieurs effondrements historiques, comme ceux de Château-Landon en 1910 (7 victimes) ou de Clamart en 1961 (21 victimes), ont en outre mis en évidence le rôle important de l'eau dans la dégradation et la rupture des carrières souterraines (Kreziak & Watelet, 2016; Al Heib et al., 2015).

Avec le changement climatique en cours, il est attendu sous nos latitudes, une fréquence accrue d'évènements climatiques exceptionnels (fortes précipitations, sécheresses prolongées, crues) pouvant induire des variations importantes des niveaux de nappe et des régimes d'infiltration (Didier et al., 2010). Ces fluctuations hydriques peuvent modifier la saturation et la résistance des roches sensibles à l'eau, telles que la craie ou le gypse (Pajiep Ngongang, 2024), favorisant ainsi l'instabilité, voire l'effondrement de ces ouvrages. L'épisode pluvieux exceptionnel du printemps 2016 dans le Loiret, ayant provoqué entre 20 et 40 effondrements recensés, a d'ailleurs confirmé cette corrélation entre conditions climatiques extrêmes et instabilités souterraines (Noury et al., 2018).

De nombreuses carrières abandonnées présentent ainsi un comportement évolutif, marqué par des cycles de saturation/désaturation susceptibles d'altérer les propriétés mécaniques de la roche (Homand & Shao, 2000). Les processus en jeu relèvent d'un couplage complexe entre paramètres hydriques, mécaniques, thermiques et chimiques, qui restent encore mal quantifiés à l'échelle de l'ouvrage.

Dans ce contexte, les experts de l'Ineris ont commencé, depuis 2015-2016, à nourrir des réflexions autour d'un observatoire expérimental aménagé dans une ancienne carrière souterraine de craie.

Un exemple particulièrement représentatif de la mise en œuvre réussie d'un dispositif expérimental in-situ est celui du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (bien qu'à une échelle nettement supérieure), qui a apporté une quantité considérable de connaissances sur le comportement hydromécanique à court et long termes de l'argilite du Callovo-Oxfordien (Armand et al., 2016 ; Armand et al., 2017, Conil et al., 2020, De La Vaissière et al., 2014, Delay et al., 2011). Installés depuis plus de vingt ans, les réseaux d'instrumentation y ont permis de :

- suivre en continu le comportement du massif argileux ;
- documenter les réponses mécaniques et hydriques du milieu lors des excavations successives ;
- valider et affiner les modèles numériques employés pour évaluer la sûreté à long terme.

Les travaux de récents de (Castellanza et al., 2018) fournissent un cadre méthodologique pertinent pour l'évaluation de la stabilité des cavités souterraines dans des massifs rocheux altérables. Ces auteurs proposent une approche combinant levés in situ, essais expérimentaux en laboratoire et analyses numériques tridimensionnelles, permettant de quantifier l'effet de l'eau, de l'humidité et de l'altération chimique sur les propriétés mécaniques des roches et sur la sécurité des cavités (résistance à la compression, module de Young, résistance en traction, comportement des piliers). Ils soulignent que la prise en compte de l'état réel du massif et de l'évolution temporelle des propriétés mécaniques est essentielle pour prédire les scénarios de rupture et définir des mesures de remédiation adaptées.

Dans ce contexte, la mise en place d'un dispositif d'observation pérenne apparaissait essentielle pour mieux comprendre les interactions entre circulation d'eau, déformations et stabilité des carrières souterraines abandonnées. C'est dans cet objectif qu'a été créé, en 2019, l'observatoire souterrain de la carrière Royer à Château-Landon (Seine-et-Marne), l'une des dernières carrières encore intactes de la commune. L'observatoire de Château-Landon apporte un enrichissement important en offrant la possibilité de mesurer en continu les paramètres hydrogéologiques et géomécaniques permet de suivre l'évolution réelle de la craie face aux variations d'humidité et à l'altération naturelle et anthropique de la roche. Ces données in-situ fournissent un calibrage direct des modèles numériques et offrent une meilleure évaluation du risque d'instabilité des structures souterraines.

Soutenu par le ministère de la Transition écologique, notamment au travers de la feuille de route nationale « Cavité » ; et opéré en partenariat avec l'Ineris, le Cerema et le département de Seine-et-

Marne, cet observatoire constitue un site de référence pour l'étude à long terme du comportement hydromécanique des carrières souterraines abandonnées. Par les données collectées, l'observatoire devrait permettre de documenter la réponse du massif à des événements extrêmes (crues, sécheresses, infiltrations massives), dont la fréquence et l'intensité devraient augmenter avec le changement climatique et ainsi contribuer à l'amélioration de la compréhension des mécanismes d'instabilité des carrières souterraines abandonnées.

2 Présentation générale du site

2.1 Choix du site de l'ancienne carrière souterraine Royer à Château-Landon

2.1.1 L'effondrement de la carrière Beaulieu

Sur la commune de Château-Landon (Seine-et-Marne), on récence au moins six carrières souterraines qui ont été creusées dans la craie en pied de versant. Parmi elles, quatre se sont effondrées : Charluchet avant 1878, Bourdin en 1878, Rathier en 1897 et Beaulieu en 1910. Dans ce secteur d'un peu plus d'un kilomètre de long, seules deux carrières subsistent, situées au barycentre des précédentes.

L'effondrement de la carrière de Beaulieu, survenu le 21 janvier 1910, est le seul des quatre effondrements recensés sur la commune de Château-Landon à avoir été documenté (Royer, 1926, Liénard AM, 1910). L'effondrement brutal du versant exploité par la carrière, suivi d'un glissement de terrain (Figure 1), a entraîné la destruction de plusieurs habitations situées le long du canal du Loing et causé la mort par ensevelissement de sept personnes. Le volume de matériaux soudainement mobilisés est estimé à 100 000 m³. L'effondrement s'est développé sur une longueur d'environ 100 m, avec une surface de rupture haute d'une vingtaine de mètres, localisée à environ 40 m en retrait de la bordure originelle du coteau (Conil et al., 2023). D'après les documents d'archives, le bruit généré par l'effondrement a été perçu à plus de 6 km de distance (Royer, 1926).

Figure 1 : Vue de la zone avant/après l'effondrement de la carrière de Beaulieu en 1910 (source : DRIEE IdF archives)

Selon Gombert & Cherkaoui (2011), l'effondrement peut être décrit à travers le scénario suivant :

1. Après dix jours de précipitations importantes (48 mm) sur un sol rendu imperméable par le gel, un nouvel épisode pluvieux significatif (27 mm) s'est produit le 19 janvier 1910 (Figure 2) ;
2. Le Loing a alors fortement débordé le jour suivant, atteignant un niveau maximal de 3,90 m à l'échelle de Nemours, soit une hausse rapide de l'eau d'environ 1,8 m. Les affluents locaux, le Fusain et le Betz, ont également été inondés, contribuant à la submersion de la plaine alluviale située au pied du hameau de Lorroy. Cependant, les témoins ont rapporté que les eaux de crue se sont arrêtées au bord de la route et n'ont pas pénétré dans les galeries souterraines de la carrière (Liénard AM, 1910) ;
3. La nappe alluviale, en connexion hydraulique directe avec les cours d'eau, est alors montée de plusieurs mètres ;
4. Ce phénomène a créé un barrage hydraulique, bloquant l'écoulement de la nappe de craie vers la vallée et entraînant une hausse de plusieurs mètres de la surface piézométrique, ce qui a provoqué l'inondation des parties basses des anciennes zones de la carrière. Le témoignage d'un champignonniste exploitant ces galeries indique que, le jour de la catastrophe, il a observé les galeries nord submergées sous 0,20 à 0,40 m d'eau, montant à partir des puits installés dans la carrière (Liénard AM, 1910) ; Watelet & Kreziak, 2010). Ces puits (appelés « fontaines » sur la Figure 3) avaient 2 m de profondeur, ce qui implique une hausse comparable de la nappe phréatique ;
5. À 13 h 10 le 21 janvier 1910, la catastrophe s'est produite, provoquant l'effondrement massif de la partie nord de la carrière. L'inondation a entraîné la rupture des petits piliers de cette zone, suivie par l'effondrement du reste de la cavité. L'effondrement du terrain a ensuite déclenché un glissement concomitant jusqu'à une faille majeure située 40 m en retrait à l'intérieur du massif.

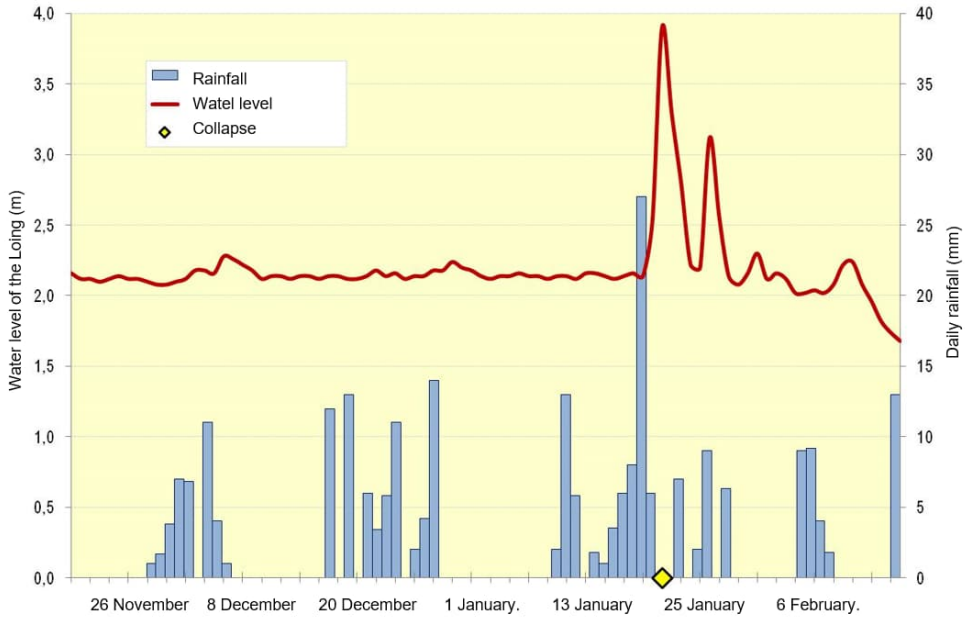


Figure 2 : Précipitations quotidiennes et hydrologie à Nemours au cours des deux mois précédant l'effondrement du 21/01/1910 (Conil et al., 2023)

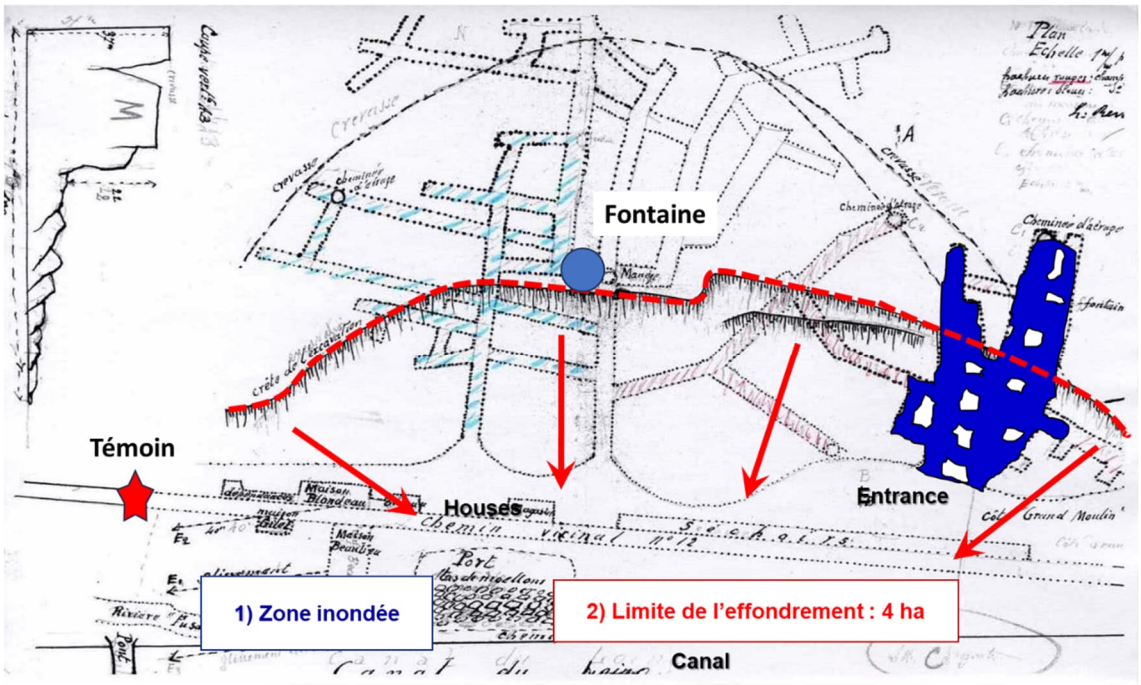


Figure 3 : Schéma de la zone effondrée établi en 1910 par les ingénieurs des Mines (d'après Watelet et al., 2016)

Afin de confirmer le diagnostic et de mieux comprendre les mécanismes ayant conduit à l'effondrement de la carrière et le glissement du coteau, et en particulier de l'impact de la faille sur l'ampleur de l'événement, Al Heib et al. (2023) ont réalisé des modélisations numériques intégrant l'ensemble des facteurs de prédisposition et aggravants. L'étude met en évidence le rôle central de la saturation de la craie constituant les piliers. Celle-ci réduit fortement la résistance de la craie et provoque la déformation plastique. Elle induit également des contraintes de traction dans le recouvrement et favorise l'apparition de tractions dans les bancs raides (calcaire, poudingue), phénomène amplifié par l'affaiblissement progressif des piliers (Figure 4). Le rôle de la faille est également déterminant : sa saturation par les eaux de pluie facilite le glissement en réduisant le frottement, entraînant une rupture progressive de la pente et conduisant à l'effondrement massif.

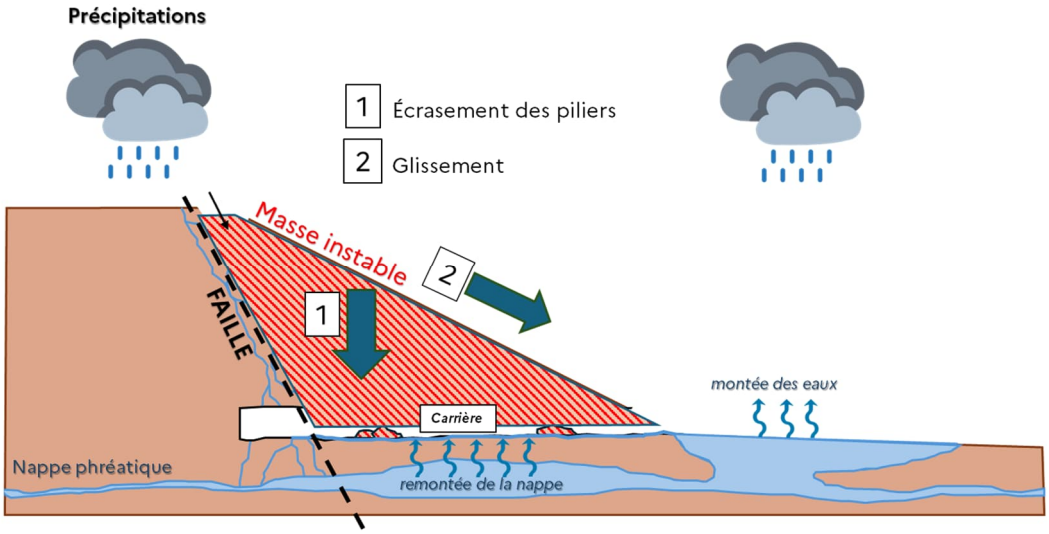


Figure 4 : Modèle conceptuel de l'effondrement

Gombert & Cherkaoui (2017) ont étudié les contextes géologiques, géotechnique et hydrogéologiques afin de comparer les carrières de Beaulieu (effondrée) et de Royer (non effondrée). Cette comparaison s'est révélée pertinente, mettant en évidence plusieurs points de similitude :

- Géométrie : les deux carrières présentent une entrée située au pied d'un coteau de 25 à 40 m de hauteur. Les deux carrières ont été exploitées par la méthode de chambres et piliers. Leur configuration, en termes de salles (chambres d'exploitation) et de piliers, est irrégulière, comportant une ou plusieurs zones fortement exploitées (Figure 5) ;
- Géologie et géomécanique : les deux sites sont constitués de la même craie, connue pour subir une diminution significative de sa résistance lorsqu'elle est complètement saturée ;
- Fracturation : la craie est globalement fortement fracturée (Royer, 1926), avec la présence de failles traversantes parallèle au versant identifiées dans les deux carrières (Gaumet et al., 2021).

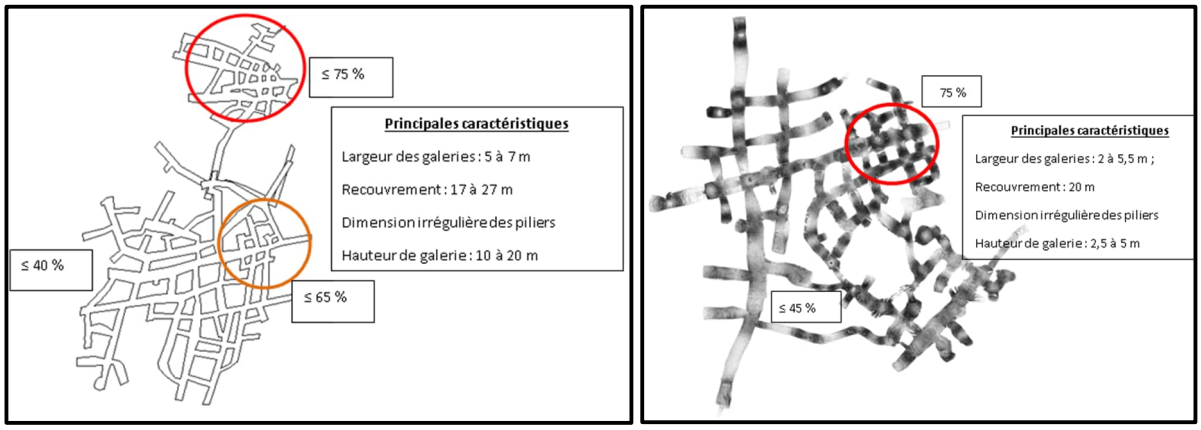


Figure 5 : Schéma d'exploitation des carrières de Beaulieu (à gauche) et de Royer (à droite)

2.1.2 Constats préalables

Dans le cadre de leurs travaux de recherche et à la demande du Conseil Départemental de Seine et Marne, le Cerema et l'Ineris ont réalisé des visites de la carrière souterraine de craie dite de Royer dès 2011 puis à nouveau en 2015 et 2016.

Ces reconnaissances ont mis en évidence :

- des désordres liés au vieillissement de l'ouvrage (fissures, chutes de blocs, fracturation des parements et des bords de piliers) ;
- la présence de discontinuités subverticales (failles, fissures, chenaux paléokarstiques), traduisant les contraintes tectoniques et hydrogéologiques subies par le massif crayeux.

Alors qu'aucune évolution significative n'avait été observée lors des visites réalisées en 2011 et 2015, des écaillages de parements et un éboulement le long d'une faille ont été constatés en 2016, ainsi que des mouvements du remblai près de l'entrée de la carrière (Kreziak & Cherkaoui, 2016). Ces dégradations semblent associées à l'épisode hydro-climatique extrême de juin 2016, marqué par de fortes précipitations et une crue du Loing d'occurrence supérieure à cent ans (Figure 6). Les observations visuelles indiquent que la crue n'a pas provoqué d'entrée d'eau dans la carrière (aucune trace de crue n'a été repérée), comme cela avait déjà été noté lors de l'effondrement de la carrière Beaulieu en 1910. En revanche, la rupture d'une maçonnerie à l'entrée de la carrière témoigne d'un déplacement du remblai dans les galeries (Figure 7).

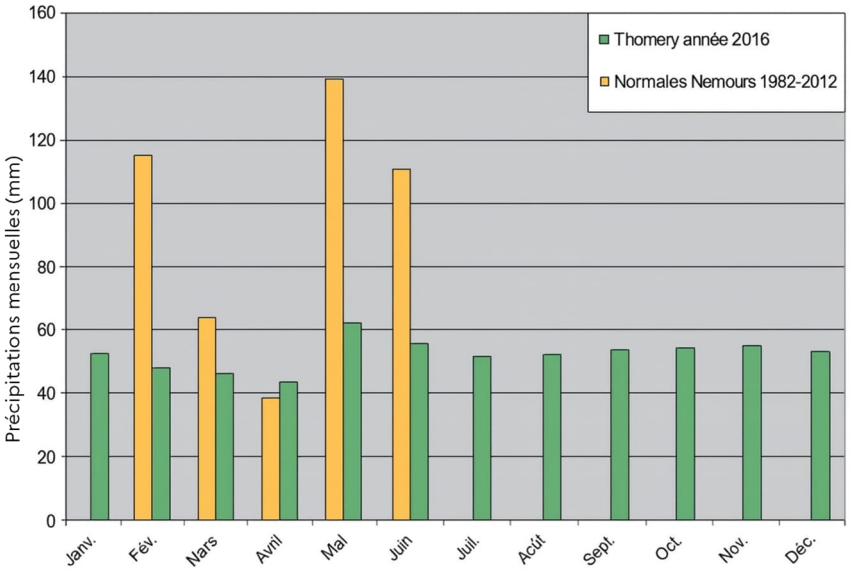


Figure 6 : Comparaison des précipitations à Nemours : normale 1982-2012 vs année 2016 d'après Conil et al. (2023)

L'assise de la carrière a probablement été affectée par les battements de la nappe phréatique, bien qu'aucune remontée d'eau par les anciennes fontaines de la carrière n'ait été constatée. De plus, des circulations d'eau auraient eu lieu via le réseau paléokarstique (Kreziak & Cherkaoui, 2016), suggérant que les infiltrations pluviales sur le plateau peuvent également influencer l'ouvrage.

Enfin, un éboulement de plusieurs mètres cubes a été observé au pied d'un plan de faille (Figure 7).

Figure 7 : Dégâts constatés dans la carrière de Royer à la suite des épisodes pluvieux exceptionnels de 2016 (Kreziak & Cherkaoui, 2016).

Compte tenu de ces observations, des signes d'évolution observés et des caractéristiques communes avec la carrière Beaulieu qui s'est effondrée en 1910, la carrière Royer constitue un site pertinent pour étudier le comportement à long terme d'une cavité en zone submersible et l'impact des variations climatiques sur ce type d'ouvrage.

2.2 Caractéristiques de la carrière

La carrière Royer a été exploitée au 19ème siècle, pour la production du « Blanc de Meudon », selon la méthode dite des chambres et piliers abandonnés. La carrière possède deux entrées, distantes de35 m l'une de l'autre (Figure 8), situées à la base d'un coteau de 25 m de hauteur (Conil et al., 2023). D'une manière générale, elle possède un faible taux de défruitement (inférieur à 45%) en dehors d'une zone au nord qui a un taux de défruitement approchant 75% (zone A des petits piliers près de l'Entrée 1, Figure 5). La section des principales galeries est de l'ordre de 10 m² en bordure de versant et de15 m² en fond d'exploitation avec des largeurs de 4 à 5 m. Les hauteurs apparentes des galeries voûtées varient de 2,1 m en bord de versant à 4,85 m en fond de carrière vers le Sud (Figure 9). La carrière est partiellement remblayée, une épaisseur de remblais, aux dimensions et aux caractéristiques historiquement mal connues, est présente au sol des galeries.

D'une manière générale, la carrière présente une fracturation très dense, difficile à représenter exhaustivement dans les relevés cartographiques. Cette intense fracturation affecte aussi bien les piliers que les toits des galeries, tandis que les remblais au sol masquent en grande partie celle affectant les parois. Plusieurs désordres liés au vieillissement de l'ouvrage souterrain sont observés : fissures mécaniques, chutes de blocs, fracturation des parements et dégradation des arêtes de piliers.

Plusieurs conduits karstiques débouchent également dans la carrière, ce qui suggère qu'une proportion significative des précipitations peut s'infiltrer rapidement via ces voies préférentielles, hydratant localement les parois et les piliers.

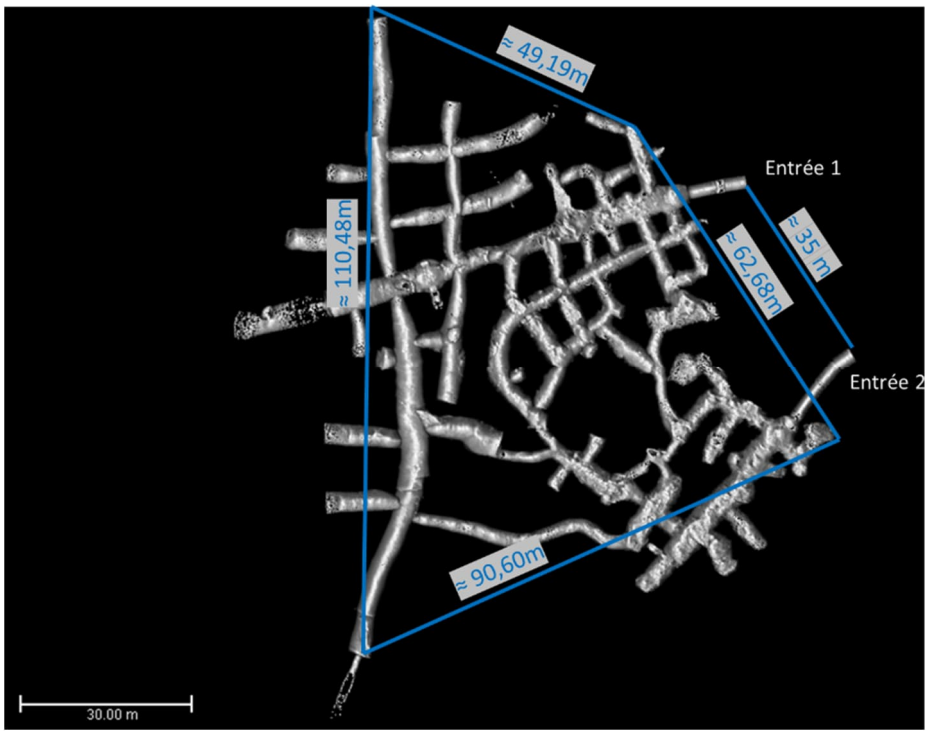


Figure 8 : Dimensions de la carrière Royer

Figure 9 : Hauteurs des galeries de la carrière Royer

2.3 Environnement géologique et hydrologique de la carrière

La zone étudiée se situe à une altitude comprise entre 70 et 80 m NGF, au pied des coteaux, sur la rive gauche du Loing, au pied des plateaux du Gâtinais qui culminent ici entre 100 et 110 m NGF. Dans le secteur d'étude, le Loing reçoit, sur sa rive gauche, les eaux du Fusain, formant localement une vaste plaine alluviale à fond plat et à faible pente. Le Loing s'écoule ici à une altitude d'environ 67 m NGF. Son débit moyen interannuel est de 15 m³/s, tandis que son débit maximal en période de crue atteint environ 300 m³/s, avec une hauteur d'eau qui dépasse alors 3 m (Conil et al., 2023).

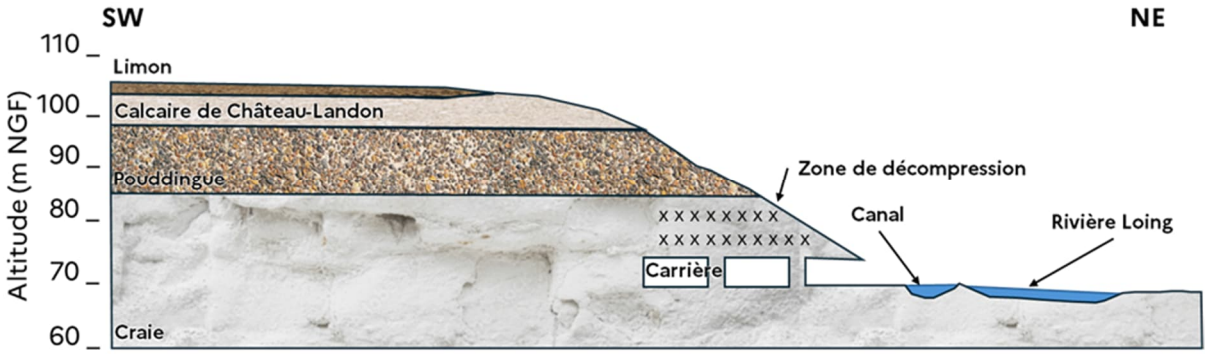


Figure 10 : Coupe schématique géologique de l'observatoire de Château Landon, d'après (Conil et al., 2023)

Le plateau du Gâtinais est constitué de formations sédimentaires d'âge tertiaire reposant sur la craie campanienne (c6), localement recouvertes de lœss du quaternaires (LP) (Figure 10). La craie affleure sur les versants et dans le fond des vallées, parfois sous forme massive avec des silex, parfois sous une forme plus meuble et friable : c'est sous ce dernier faciès qu'elle était autrefois exploitée dans les carrières sous le nom de Blanc de Meudon.

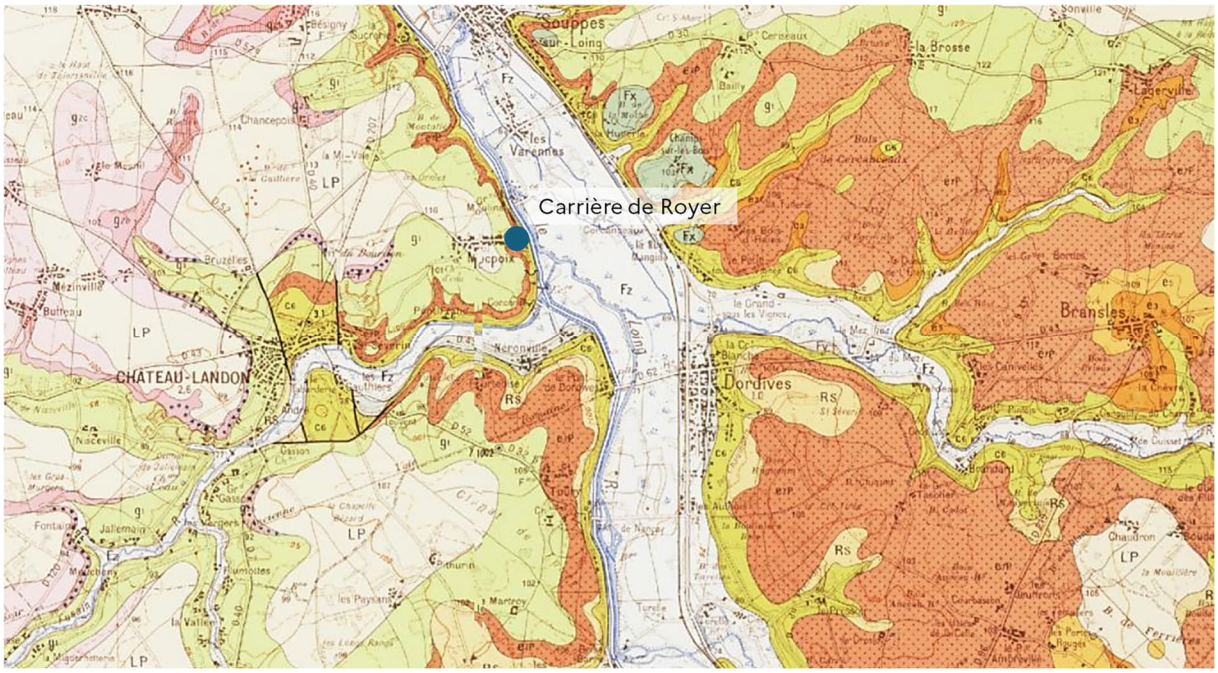


Figure 11 : Carte géologique des environs de Château-Landon (voir légendes dans le texte) (d'après Infoterre) (Conil et al., 2023)

Cette formation est surmontée de quelques mètres d'argile à silex (RS), puis de couches tertiaires, qui se succèdent de bas en haut (cf. Figure 10 et Figure 11) (Conil et al., 2023) :

- les Chailles ou poudingues de Nemours (e7P) du Priabonien, d'une épaisseur maximale de 15 m, constitués d'un conglomérat de galets de tailles et d'origines variées (silex de craie et « chailles » jurassiques) liés par une matrice argileuse maigre non plastique ; cette formation se rencontre notamment dans le remplissage de conduits karstiques de la craie, en particulier dans la carrière Royer ;
- le calcaire de Château-Landon (g1) du Ludien supérieur, épais de 12 à 15 m, formé de bancs massifs de calcaire marneux blanchâtre à localement gris, séparés par des lits marneux ou argileux verdâtres ;
- une couche de sables stampiens moyens (g2b) (également appelés rupéliens), d'épaisseur réduite au nord de Château-Landon ;
- le calcaire du Gâtinais (g2c) du Stampien supérieur, épais de 12 à 15 m, qui forme l'ossature des plateaux situés sur la rive gauche du Loing ; il s'agit d'un calcaire lacustre interstratifié de niveaux marneux.

Les vallées du Loing et du Fusain sont par ailleurs recouvertes d'alluvions récentes (Fz), constituées de 1 à 2 m de limons reposant sur 4 à 6 m de sables et de graviers.

Sur le plan hydrogéologique, l'aquifère principal est celui de la craie, parfois surmonté par l'aquifère calcaire sous les plateaux, et parfois par l'aquifère alluvial dans les vallées. Dans la vallée du Loing, la nappe de l'aquifère alluvial se situe très près de la surface (entre 1 et 2 m de profondeur) et est hydrauliquement connectée à l'aquifère crayeux sous-jacent. Les formations calcaires constituent un aquifère multicouche correspondant à l'extrémité orientale du vaste aquifère des « calcaires de Beauce », principalement alimenté par les précipitations s'infiltrant sur le plateau (Conil et al., 2023).

2.4 Caractéristique et épaisseur du remblai

Aucune information précise n'est disponible concernant la composition du remblai de la carrière. Néanmoins, dans le contexte présent, il est probable qu'il soit constitué de déchets d'extraction (matériaux non exploitables), de déblais de taille, voire de matériaux rapportés depuis la surface, comme cela se pratiquait à l'époque de l'exploitation. On sait également que les silex étaient fréquemment utilisés comme matériaux de remblai dans les carrières de Château-Landon (Royer, 1926).

Afin de caractériser l'épaisseur des remblais et la géométrie du mur de la carrière, le Cerema a mené une campagne pénétrométrique dynamique comportant 28 tests (Figure 12), Gaumet et al. (2021). Leur localisation est présentée sur la Figure 13.

Figure 12 : Essais pénétrométriques réalisés par le Cerema en mai 2021

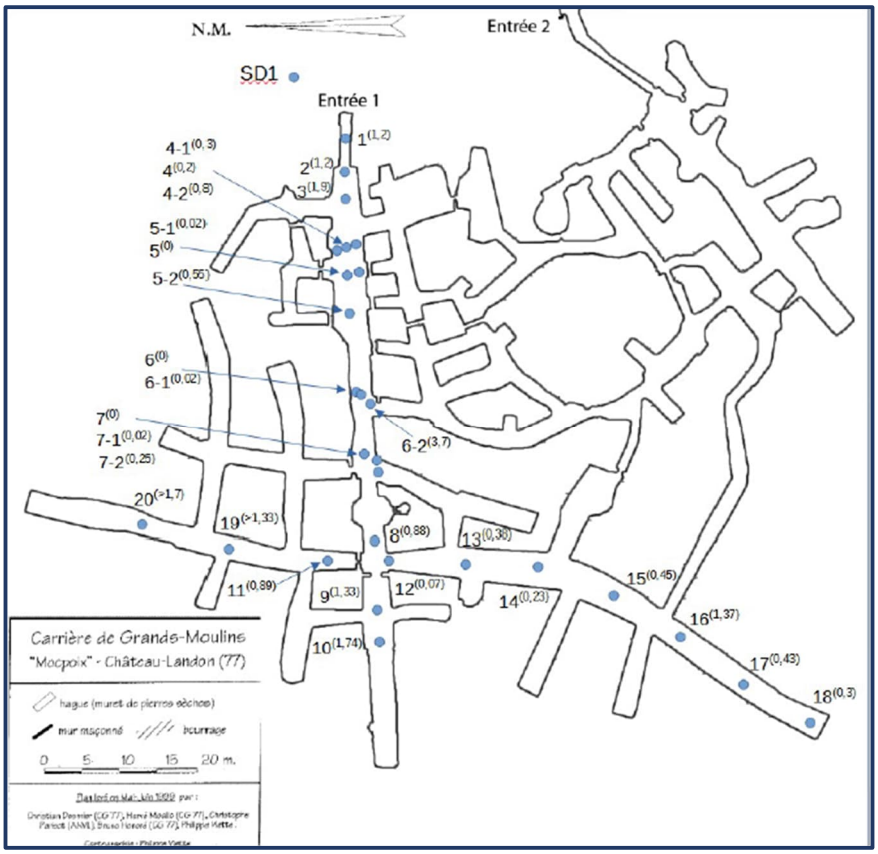


Figure 13 : Localisation des sondages et épaisseur estimée des remblais entre parenthèse, en mètre (Gaumet et al., 2021)

Les sondages, espacés de 5 à 10 m en moyenne, sont répartis d'une part le long de la galerie principale suivant l'axe de l'entrée reliant la zone A (petits piliers) à la zone B, et d'autre part le long de la galerie principale nord-sud située en fond de carrière.

Ces deux galeries présentent des largeurs relativement constantes, généralement comprises entre 4 et 5 m. La hauteur apparente des galeries (hors remblai) varie de 2,1 m à 3,18 m dans la galerie principale prolongeant l'entrée 1, et de 1,9 m à 4,85 m du nord vers le sud dans la galerie transversale située en fond de carrière. Depuis l'entrée jusqu'au croisement des deux galeries, le sol de la carrière présente une pente ascendante d'environ 5°, avant de s'horizontaliser en fond de cavage et vers le nord, puis de s'incliner légèrement vers le sud.

Pour l'interprétation des essais pénétrométriques, une valeur seuil de résistance de pointe, Qd[1] = 10 MPa, a été retenue afin de distinguer les sols compacts, interprétés comme étant en place, des sols plus tendres susceptibles de correspondre à des remblais ou à des zones discontinues (fractures) (Gaumet et al., 2021).

À l'entrée 1 de la carrière, les remblais présentent une épaisseur moyenne de 1,2 m, atteignant près de 2 m à +10 m de l'entrée (Figure 13). Cette lentille, faiblement compactée s'amincit progressivement pour disparaître vers +20 m, où la craie en place devient subaffleurante sous une couverture discontinue de remblais dont l'épaisseur varie de moins de 50 cm à environ +50 m. Dans ce secteur, une discontinuité verticale d'environ 3,7 m de longueur a été identifiée ; elle correspond à la prolongation, dans le mur, d'une faille observée en paroi et en toit.

L'épaisseur des remblais augmente de nouveau vers le fond de la carrière, atteignant 1,7 à 2,2 m dans les zones Nord et Ouest, tandis qu'elle demeure généralement inférieure à 50 cm dans la partie Sud.

La combinaison des mesures de hauteur apparente des galeries et de l'épaisseur des remblais permet d'estimer une hauteur totale d'excavation comprise entre 2,27 m et 4,39 m le long de l'axe de l'entrée, avec des valeurs maximales au-delà de +60 m. La pente du mur apparaît marquée dans les premiers mètres du creusement, puis tend à s'atténuer en fond d'exploitation.

Dans la galerie principale transversale, la hauteur d'excavation est d'environ 3,5 m à son intersection avec la galerie longitudinale ; elle augmente ensuite nettement vers le Nord et le Sud, atteignant localement plus de 4 m et jusqu'à 5,3 m dans la portion méridionale.

Ces premiers travaux montrent que le mur d'exploitation de la craie est très irrégulier et présente des pentes importantes pouvant favoriser les glissements de terrain en cas de rupture de piliers. Cette irrégularité s'observe directement dans la carrière, où le mur de la zone C est approximativement à l'altitude du toit des galeries de la zone A.

En l'absence de mesures dans les galeries proches de l'entrée 2, l'épaisseur du remblai dans ce secteur, situé à proximité de la zone C instrumentée, a été estimée à partir des observations disponibles. Cette partie de la carrière, peu exploitée, se caractérise par une densité de galeries nettement plus faible que celle observée à l'entrée 1. Dans cette dernière, l'épaisseur du remblai atteint en moyenne 1,2 m, avec des valeurs localement plus importantes, tandis que dans les zones périphériques elle demeure généralement inférieure à 0,5 m ou discontinue. Compte tenu de la faible densité de galeries et de l'absence d'indices d'exploitation intensive autour de l'entrée 2, il est probable que ce secteur ait servi principalement d'accès secondaire plutôt que de zone de dépôt. L'épaisseur du remblai y est donc vraisemblablement limitée, de l'ordre de 0,5 m, traduisant une accumulation restreinte de matériaux.

[1] Qd représente la résistance de pointe mesurée lors des essais pénétrométriques, reflétant la capacité du sol à résister à la pénétration et à supporter des charges.

3 Dispositif d'instrumentation

Plus de 50 capteurs sont actuellement déployés dans la carrière et à ses abords. L'instrumentation vise à suivre dans le temps l'évolution des conditions hydrogéologiques, climatiques et mécaniques du massif et à relier ces observations aux désordres constatés. Ils sont tous reliés au Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol (Cenaris), permettant, en quasi-temps réel, l'acquisition, la centralisation et le partage des données via la plateforme web e.cenaris (https://cenaris.ineris.fr).

Les principaux objectifs de ce dispositif instrumental sont :

- Mesurer en continu les sollicitations hydriques (variations de la nappe, infiltrations, humidité interne) ;
- Suivre les déformations (convergence, déplacement des piliers et du remblai, ouverture des fissures) pouvant constituer des précurseurs d'instabilité ;
- Détecter les événements discrets (craquements, chutes de blocs, écaillage) afin de compléter les mesures continues et d'affiner la compréhension de la cinématique des dégradations ;
- Évaluer l'impact de la chimie des eaux présentes dans les piliers sur leur stabilité à long terme ainsi que sa variation liée au changement climatique.

Ces mesures devraient permettre de qualifier et de quantifier l'impact du microclimat souterrain et des conditions climatiques extérieures sur les variations internes et la dégradation de la carrière. L'ensemble des données collectées pourra servi de base de référence pour le calage et la validation de modèles thermo-hydro-mécano-chimiques (THMC) applicables à d'autres carrières.

3.1 Cartographie du site et localisation des capteurs.

Les calculs numériques réalisés pour analyser les mécanismes susceptibles d'avoir conduit à l'effondrement de la carrière voisine de Beaulieu (Renaud et al., 2019), ont été réexploités dans le cadre de la présente étude pour le dimensionnement du dispositif expérimental. L'analyse de ces résultats a permis d'identifier les secteurs potentiellement les plus instables et de définir l'implantation optimale du dispositif d'instrumentation au sein de la carrière Royer.

Deux mécanismes principaux, susceptibles de favoriser l'apparition de désordres à la suite d'épisodes de fortes précipitations, ont été analysés (Al Heib et al., 2023) :

- le glissement le long de plans de faille parallèles au versant, situés à 40–50 m en retrait du coteau, sous l'effet de l'infiltration d'eau,
- la remontée de la nappe phréatique, susceptible de modifier rapidement les propriétés géomécaniques de la craie.

Les deux secteurs potentiellement instables sont appelés par la suite zones A et B. Un secteur est quant à lui qualifié de témoin car numériquement identifié comme stable (zone C). Sur cette base, un dispositif d'instrumentation a été défini de manière à assurer un suivi conjoint des conditions hydrogéologiques et des réponses géotechniques du massif.

Un des piliers de la carrière (zone A) a été sélectionné afin d'étudier son comportement vis-à-vis des variations saisonnières du niveau de nappe. Le choix de ce pilier s'est fait compte tenu de son faible diamètre et de sa proximité avec l'entrée de la carrière où la nappe alluviale est supposée moins profonde qu'au fond (Conil et al., 2023). La base couvre une surface proche d'un rectangle de 4 par 5 m (Figure 14), orientée à 10° près comme les points cardinaux (plus grande longueur dans l'axe Nord-Sud). Le toit de voûte des galeries limitrophes variant de 2,15 à 2,5 m suivant les faces, le volume total du pilier est estimé proche de 40 m³ (Gaumet et al., 2021).

Figure 14 : Pilier instrumenté dans la zone des petites piliers – Zone A

L'ensemble du dispositif d'instrumentation et sa localisation sont représentés de manière schématique à la Figure 15.

Figure 15 : Implantation des zones d'étude et du réseau de capteurs de l'observatoire de Château Landon – CIMx : microphones

3.2 Présentation détaillée de l'instrumentation déployée sur site

Afin d'assurer un suivi fiable et représentatif du massif, différents types de capteurs ont été installés. Leur sélection repose sur la nature des paramètres à mesurer, qu'ils soient hydriques ou mécaniques, sur le niveau de précision requis ainsi que sur les contraintes liées à leur mise en œuvre.

3.2.1 Suivi hydrogéologique

Le suivi hydrogéologique vise à caractériser les fluctuations de la nappe et les transferts d'eau dans la craie, afin d'évaluer leur influence sur le comportement mécanique du massif.

L'instrumentation comprend :

- 2 piézomètres (PZ1 et PZ2) : suivi du niveau, de la température et de la conductivité de la nappe en amont et en aval de la carrière ;
- 10 capteurs de teneur en eau : mesure du degré de saturation de la craie et suivi du front de saturation dans la paroi ;
- 6 capteurs de succion : mesure des transferts d'eau dans le massif ;
- 1 limnimètre : suivi du niveau du Loing à proximité du site.

3.2.1.1 Capteurs de teneur en eau

La teneur en eau volumique correspond à la fraction du volume total d'un sol occupée par l'eau. Elle s'exprime généralement en m³ d'eau par m³ de sol ou en pourcentage. Sa valeur varie entre zéro (sol complètement sec) et un maximum qui correspond à la porosité totale du sol, c'est-à-dire le volume total de pores pouvant être rempli d'eau lorsque le sol est saturé. En d'autres termes, la teneur en eau volumique ne peut jamais dépasser la porosité du sol, qui fixe la limite théorique de la quantité d'eau que le matériau peut contenir. Dans notre cas, sa valeur maximale attendue est de l'ordre de 44 % (valeur de la porosité mesurée sur échantillon, Pajiep Ngongang, 2024, Lafrance, 2016).

Pour suivre les variations de la teneur en eau volumique du massif, dix sondes Thetaprobe ont été installées dans les différentes zones d'observation (Figure 16 et Figure 17). Leur répartition est la suivante :

- Zone A : trois sondes placées à 70 cm de hauteur du mur (sol), respectivement à 5 cm, 20 cm et 50 cm de profondeur dans le pilier.
- Zone B : trois sondes également, dont la première à 70 cm de hauteur et 5 cm de profondeur sur le plan de faille ; les deux autres sont situées en paroi d'une galerie parallèle à celle du plan de faille, l'une à 30 cm de hauteur et 5 cm de profondeur, l'autre à 70 cm de hauteur et 31 cm de profondeur.
- Zone C : quatre sondes, dont une à 30 cm de hauteur et 5 cm de profondeur, deux autres à 70 cm de hauteur respectivement à 33 cm et 50 cm de profondeur en paroi de galerie, et la dernière implantée à 14 cm de profondeur dans le remblai.

Le principe de fonctionnement repose sur l'application, le long des électrodes, d'une onde haute fréquence de 100 MHz. La teneur en eau volumique est calculée à partir des propriétés diélectriques du milieu, déterminées par la différence entre l'onde émise et l'onde réfléchie par le sol ou le parement.

Figure 16 : Installation des capteurs de teneur en eau

Les essais en laboratoire indiquent que la porosité de la craie est d'environ 45 %, valeur correspondant à la teneur en eau volumique à saturation. Les sondes permettent de mesurer des teneurs comprises entre 0 et 45 %, avec une précision d'environ ±1 %.

Figure 17 : Capteur Thetaprobe (à gauche, source : agriexpo). Capteurs de teneur en eau dans le pilier (à droite)

3.2.1.2 Capteurs de succion

La succion d'un sol mesure la tendance de l'eau à rester retenue dans les pores du sol. Elle est liée à la force avec laquelle l'eau est attirée par les particules solides et s'exprime généralement en kPa ou en cm d'eau. Un sol saturé a une succion proche de zéro, car l'eau est libre de s'écouler. Au fur et à mesure que le sol se dessèche, la succion augmente, reflétant la difficulté croissante pour extraire l'eau des pores. En d'autres termes, la succion est la force qui retient l'eau dans le sol, et elle augmente à mesure que la teneur en eau diminue

Six capteurs de succion (type WATERMARK Model 200SS, Figure 18) ont été intégrés en 2020 au dispositif expérimental initial afin d'affiner l'analyse de la répartition de l'eau dans le massif.

Le principe de fonctionnement repose sur la mesure de la résistance électrique dans une matrice granulaire interne, hydrophile et en équilibre avec le sol environnant. Cette conception assure une calibration stable et reproductible, indépendante du sol d'installation, contrairement aux tensiomètres classiques. La gamme de mesure des capteurs s'étend de 0 à 239 kPa, ce qui convient généralement aux sols non saturés. Toutefois, dans le cas de roches fissurées comme la craie, la distribution des pores et des fissures peut entraîner des succions supérieures à cette plage ou conduire à des mesures

non représentatives. Les capteurs ont été installés à proximité des sondes de teneur en eau afin de croiser les données et de mieux caractériser les conditions hydriques. Comme pour les sondes volumétriques, leur mise en place a nécessité de grandes précautions, la fiabilité des mesures dépendant notamment d'un contact optimal entre le capteur et le massif. Malgré ces précautions, deux capteurs (situés en zone B 2a et en zone C) ont dû être réinstallés, leurs mesures étant sorties de la gamme opérationnelle, probablement en raison d'une entrée d'air dans les forages, néanmoins sans amélioration notable.

Remarque : après consultation du fournisseur, il apparaît que dans ce type de roche il est recommandé d'utiliser des tensiomètres haute pression ou des psychromètres, capables de mesurer des succions plus élevées et de s'adapter aux caractéristiques spécifiques des milieux rocheux. Un étalonnage spécifique à la roche sera réalisé lors de la prochaine campagne de terrain.

Figure 18 : Capteur de succion type WATERMARK Model 200SS (à gauche). Capteurs de succion dans le pilier (à droite)

Remarque : L'instrumentation simultanée d'un massif avec des capteurs de teneur en eau volumique et de succion permet une caractérisation complète de l'état hydrique du matériau. La teneur en eau volumique renseigne sur la quantité d'eau effectivement présente dans les pores, tandis que la succion traduit l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par la matrice du sol ou du matériau. La combinaison de ces deux mesures permet de reconstituer la courbe de rétention en eau, relation fondamentale pour la modélisation des transferts hydriques et pour l'évaluation des variations d'humidité en fonction des conditions climatiques ou de la gestion hydraulique.

De plus, la connaissance simultanée de la teneur en eau et de la succion est une donnée importante pour comprendre les dynamiques de drainage, d'infiltration et de redistribution de l'eau dans le massif. Elle offre également des informations critiques sur les propriétés mécaniques dépendantes de l'humidité, telles que le gonflement, le retrait ou la fissuration, qui ne peuvent pas être pleinement interprétées à partir des mesures de teneur en eau seules. L'instrumentation combinée permet d'obtenir une vision du comportement hydro-mécanique du massif.

3.2.1.3 Piézomètres et limnimètre

Deux forages piézométriques (Figure 19) ont été réalisés en juillet 2018 par le Cerema, les sondes ont ensuite été mises en place par l'Ineris et connectées au système d'acquisition par l'Ineris. Leur positionnement est le suivant :

- SD2, est situé à l'aval immédiat de la carrière, près de l'entrée ;
- SD1, est implanté à environ 300 m à l'amont, sur le plateau surplombant la carrière.

Leur objectif est de suivre l'évolution temporelle de la nappe de la craie.

Les tubages des deux forages sont en PVC de 75 mm de diamètre, avec un espace annulaire rempli de gravillon (6/10 mm) au droit des crépines et de billes d'argile au-dessus, protégés par des chaussettes en géotextile. En surface, les tubages sont recouverts d'un tubage métallique et d'une margelle bétonnée assurant la protection des sondes.

Les caractéristiques des forages sont les suivantes :

- Forage SD1 : creusé jusqu'à 42,1 m, équipé jusqu'à 36,5 m avec 27,5 m de tube plein et 9 m de tube crépiné. Il est instrumenté avec une sonde de pression (0–20 m, précision ±5 mm) et une sonde de température (-15 à 55 °C, précision ±0,5 °C). Lors de son installation, le niveau statique était de 32,40 m par rapport au sommet du tubage, correspondant à une hauteur d'eau de 3,60 m.
- Forage SD2 : d'une profondeur totale de 15,04 m, comprenant 12 m de tube plein et 3 m de tube crépiné. Il est équipé d'une sonde de pression (0–10 m, précision ±10 mm), d'une sonde de conductivité (0–300 mS/cm, précision ±1,5 mS/cm) et d'une sonde de température (-5 à 40 °C, précision ±0,25 °C). La sonde a été initialement positionnée à 14,3 m mais a été remontée à 9 m en raison de la montée de la nappe en période hivernale.

Enfin, un limnimètre a été installé directement dans le Loing fin 2021. Un limnimètre ou station limnimétrique est un équipement qui permet l'enregistrement et la transmission de la mesure de la hauteur d'eau dans un cours d'eau. (Figure 19). Suite à des coupures récurrentes d'acquisition des données en hiver à cause de l'ombre créée par la végétation environnant le limnimètre, celui-ci a été déplacé en octobre 2025 vers un endroit non végétalisé (Figure 30)

Figure 19 : Nettoyage de la sonde piézométrique SD2 (à gauche). Forage piézométrique SD1 (au milieu). Limnimètre dans le Loing (à droite)

3.2.2 Suivi géotechnique

Ce suivi a pour but d'identifier et de quantifier les déformations progressives du massif, de détecter des précurseurs d'instabilité et d'analyser la réponse mécanique de la craie aux sollicitations hydriques et climatiques. Il permet également de détecter, localiser et caractériser des évènements plus soudains (craquements, chutes de blocs) afin d'améliorer la compréhension de leur occurrence et de leur rôle dans l'évolution du massif.

L'instrumentation comprend :

- 5 extensomètres à fil : mesure des convergences de galerie (zones A et C) ;
- 2 extensomètres (convergence-mètre) à double ancrage : suivi des déplacements latéraux des piliers et des parois (zones A, B et C) ;
- 1 radar horizontal : suivi d'un plan de fracture en zone B ;
- 1 radar vertical : suivi des déplacements du remblai (zone C) ;
- 1 fissuromètre : suivi de l'évolution d'une fissure représentative en zone B ;
- 1 réseau acoustique de 4 microphones répartis dans la carrière.

Un relevé visuel de fracturation et des scans 3D sont réalisés régulièrement pour compléter ce suivi géotechnique instrumenté.

3.2.2.1 Extensomètres en forage

Les extensomètres comprennent chacun (Figure 20) :

- une tête de mesure équipée de capteurs de déplacement, sur laquelle les tiges sont fixées ;

- deux tiges de mesure, chacune reliée à un ancrage.

Les ancrages sont cimentés dans le massif. Les tiges, en fibre de verre, mesurent respectivement 65 cm et 130 cm de longueur.

Les extensomètres sont équipés de capteurs de déplacement potentiométriques offrant une plage de mesure de 50 mm et une précision de ±0,15 mm. Les capteurs ont été initialement positionnés à mi-course c'est-à-dire qu'ils mesurent des déplacements allant de -25 mm à + 25 mm.

Figure 20 : Extensomètre 2 points en forage (Source : Sisgeo) (à gauche). Extensomètre dans le pilier (à droite)

3.2.2.2 Extensomètres à fils

Cinq extensomètres à fil ont été installés dans les trois zones d'observation : deux en zone A, un en zone B et deux en zone C.

L'extensomètre à fil est conçu pour mesurer les variations de distance entre deux points d'ancrage distants. Il constitue un instrument particulièrement adapté pour quantifier avec précision et fiabilité la convergence entre deux parois de galerie. Dans les zones A et C, il permet de suivre simultanément la convergence horizontale de la galerie et le déplacement de la voûte.

Les extensomètres sont équipés de capteurs de déplacement potentiométriques offrant une plage de mesure de 50 mm et une précision de ±0,15 mm (cf. Tableau 9). Ils ont été initialement positionnés à mi-course, soit environ 25 mm.

3.2.2.3 Fissuromètre

Un fissuromètre a été installé en zone B afin de suivre l'évolution d'une des fractures de la carrière au niveau du parement (Figure 21).

Le fissuromètre est un capteur de déplacement potentiométrique offrant une plage de mesure de 25 mm et une précision de ±0,025 mm. Son principe de fonctionnement repose sur la mesure de l'écartement ou de la fermeture d'une fracture : il est fixé de part et d'autre de celle-ci (Figure 6).

Le capteur a été positionné à mi-course ils peuvent mesurer des déplacements de ± 12,5 mm, afin de permettre l'observation aussi bien d'une ouverture que d'une fermeture de la fissure. La mesure initiale enregistrée lors de l'installation était de 13,9 mm.

Figure 21 : Fissuromètre installé en zone B pour suivre l'évolution d'une fracture

3.2.2.4 Radars

Deux radars de type VEGAPULS 67 ont été installés dans la carrière :

- en zone B : afin de suivre l'évolution de la partie effondrée constatée en 2016. Le radar est disposé face à la paroi effondrée et fixé dans le parement opposé, à 3,7 m de distance.
- en zone C : fixé au toit de la galerie et orienté vers le sol pour mesurer les mouvements du remblai. Il est placé à 2,3 m du remblai.

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'impulsions micro-ondes très courtes vers le parement ou le remblai. Ces ondes sont réfléchies par la surface et réceptionnées par le système d'antennes. Le temps de propagation entre l'émission et la réception est proportionnel à la distance à la surface.

Chaque radar possède une gamme de mesure de 35 m et une précision de ±2 mm. L'angle d'investigation est de 10°. C'est donc une surface qui est investiguée et c'est la moyenne des distances mesurée dans la surface que l'on enregistre.

3.2.2.5 Capteurs acoustiques

La mise en place d'un réseau de capteurs acoustiques dans une carrière souterraine constitue une méthode avancée de suivi de la stabilité structurale (Nadim et al., 2013). L'acoustique passive permet de capter et d'analyser les signaux générés par les micro-fracturations, les déplacements internes du massif et les chutes de blocs. Ces données, enregistrées en continu, apportent une information complémentaire aux mesures géotechniques classiques et permettent une caractérisation dynamique des processus d'endommagement.

. L'analyse fréquentielle et temporelle des signaux permet de faire une classification des différents types d'événements (micro-fissuration, chute de blocs). Par triangulation des temps d'arrivée des ondes, il est possible de localiser l'origine des événements acoustiques et d'identifier les zones les plus actives.

Quatre sondes microphoniques SYTMIS-1DM-PVCX (Figure 15) ont été installées dans la carrière, espacées d'environ 25 m. Ces sondes omnidirectionnelles sont équipées de microphones Brüel & Kjaer 4188 associés à des préamplificateurs 2669C (bande passante : 16 Hz – 10 kHz ; sensibilité maximale : 10 V/Pa).

La haute sensibilité de ces sondes permet de détecter et d'enregistrer les sons et infrasons générés par la fracturation des parements rocheux ou la chute de blocs. Cette sensibilité autorise également la détection d'événements distants ou de très faible amplitude.

Les données acoustiques enrichissent les mesures de déplacement et les observations visuelles, en apportant une dimension temporelle et instantanée au suivi.

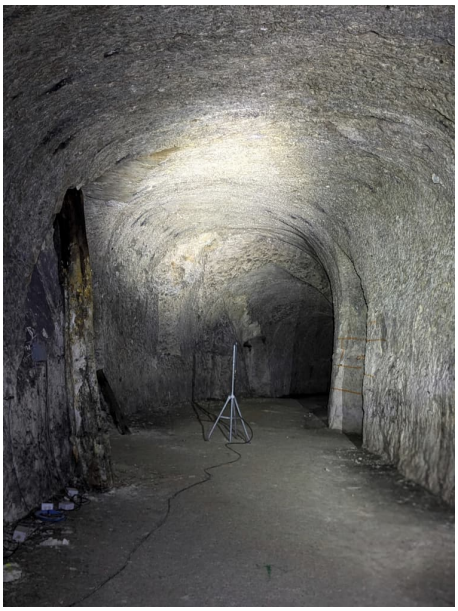


Figure 22 : Capteur acoustique sur pied dans la carrière

3.2.2.6 Levés de fracturation

Ces levés essentiellement visuels ne nécessitent pas d'instrument spécifique.

3.2.2.7 Nuages de points (par scanner laser terrestre)

L'appareil utilisé pour cette étude est un scanner laser terrestre FARO Focus3D X330 (Figure 23). D'une portée d'environ 300 m, il a été choisi pour son autonomie, sa légèreté et sa rapidité d'acquisition, avec un taux de scan proche de 900 000 points par seconde, ce qui permet de réduire significativement le temps de mesure sur site.

Figure 23 : Scanner laser 3D FARO Focus3D X330 utilisé pour les tests de surveillance

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un faisceau laser réfléchi par les surfaces rencontrées puis renvoyé vers l'appareil. La distance et les coordonnées de chaque point d'impact sont ainsi calculées, et la répétition de ces mesures sur 360° génère un nuage de points tridimensionnel.

Pour numériser une cavité de grande extension, plusieurs stations sont nécessaires. En effet, le scanner installé sur trépied ne couvre que l'environnement directement « visible » par le faisceau. Les zones masquées par des obstacles ou non accessibles depuis une position donnée doivent être relevées à partir d'autres stations. La multiplication des stations permet de réduire ces « zones d'ombre ». Le repositionnement et l'assemblage des stations sont réalisés automatiquement grâce à des repères normalisés, en l'occurrence des sphères de 139 mm de diamètre, visibles depuis plusieurs positions.

Le scanner laser 3D permet de produire une image tridimensionnelle de référence d'un espace à un instant donné. En répétant des acquisitions successives sur un même site, il devient possible de comparer les nuages de points obtenus et de détecter les écarts entre eux. Dans une carrière souterraine, par exemple, la chute d'un bloc du toit se traduit par une différence correspondant à son volume entre deux relevés. L'intérêt de cette méthode réside dans la densité des données collectées et la capacité à localiser avec précision tout événement, qu'il survienne au niveau du toit, des piliers ou d'autres structures.

3.2.3 Suivi des conditions climatiques internes et externes

La température et l'humidité relative constituent des paramètres environnementaux clés influençant le comportement des matériaux rocheux et des structures souterraines. Dans une carrière, ces facteurs peuvent provoquer des dilatations, des contractions ou des phénomènes de gonflement et de retrait localisés, pouvant affecter la stabilité de l'ouvrage.

Le suivi climatique vise à relier les variations du microclimat souterrain aux conditions météorologiques régionales et à évaluer leur rôle dans la dégradation du massif.

Les mesures sont assurées par :

- 4 capteurs d'humidité et de température installés dans les galeries ;
- 1 capteur de température extérieure placé à l'entrée de la carrière ;

Quatre stations climatiques, chacune constituée d'un capteur d'humidité et d'un capteur de température (Figure 24), ont été installées dans les différentes zones d'observation : une station en zone A, une en zone C, et une dans chacune des sous-zones 2a et 2b de la zone B. Un capteur de températures a été également à l'extérieur de la carrière au-dessus de l'entrée 1 (Figure 24).

Les capteurs d'humidité présentent une plage de mesure comprise entre 0 et 100 %, avec une précision de ±2 %. Les capteurs de température couvrent une plage de -40 à 65 °C, avec une précision de ±0,5 °C.

Figure 24 : Station climatique dans la carrière (à gauche). Capteur de température à l'extérieur au-dessus de l'entrée 1 (à droite).

3.3 Difficultés d'installation des capteurs dans la craie

Il convient de souligner les difficultés rencontrées lors de l'installation des capteurs, en raison de la faible résistance mécanique de la craie et de sa propension à se destructurer (mise en boue) sous l'action de la foration. Ce phénomène de liquéfaction locale altère la qualité des parois du forage et complique le scellement des instruments. Ces difficultés sont susceptibles d'introduire des incertitudes ou des biais dans les mesures. Ces effets doivent donc être intégrés à l'analyse et à l'interprétation des données.

3.3.1 Installation des capteurs de teneur en eau

Lors de l'installation des capteurs de teneur en eau, la précision des mesures a été compromise par l'enfouissement partiel des pointes dans le massif rocheux. Plusieurs capteurs installés en 2019 et 2020 affichaient des valeurs anormalement faibles, voire physiquement incohérentes. Pour confirmer que

l'installation était à l'origine de ces anomalies, des vérifications et des analyses ont été effectuées en laboratoire. Elles ont révélé que la valeur mesurée est directement proportionnelle à la longueur de la pointe en contact avec la roche. Ainsi, si seule une partie de la pointe est introduite, la mesure obtenue ne représente qu'une fraction de la valeur réelle.

Les capteurs de teneur en eau Thetaprobe ont été conçus pour des sols meubles, dans lesquels l'installation est relativement aisée. En revanche, dans le cas de roches, même peu dures comme la craie de Château-Landon, l'enfoncement complet des pointes est très difficile et risque d'endommager le capteur, en particulier lors d'une installation en profondeur, lorsque l'on frappe directement sur celui-ci.

Pour pallier ce problème, un gabarit spécifique a donc été conçu afin de pré-percer la roche. Inspiré du modèle fourni par le constructeur pour une installation en surface, ce gabarit se compose de plusieurs éléments (Figure 25) : un tube extérieur, le gabarit et une masse coulissante qui va permettre d'enfoncer le gabari. Il est également possible d'utiliser un marteau en ajoutant un embout « martyr ». Cet outil a permis d'installer l'ensemble des capteurs de teneur en eau en profondeur. Toutefois, l'utilisation du gabarit ne garantit pas que les pointes soient entièrement introduites dans le massif, en raison de son hétérogénéité (présence éventuelle de silex et variabilité de la dureté). Il peut donc exister un écart de quelques millimètres entre la profondeur visée et la profondeur réelle, ce qui constitue une incertitude à prendre en compte lors de l'interprétation des mesures.

L'espace annulaire est ensuite comblé et la sortie du forage bouchée pour empêcher toute entrée d'air Cette procédure, proposée par l'Ineris garantit la fiabilité et la reproductibilité des mesures.

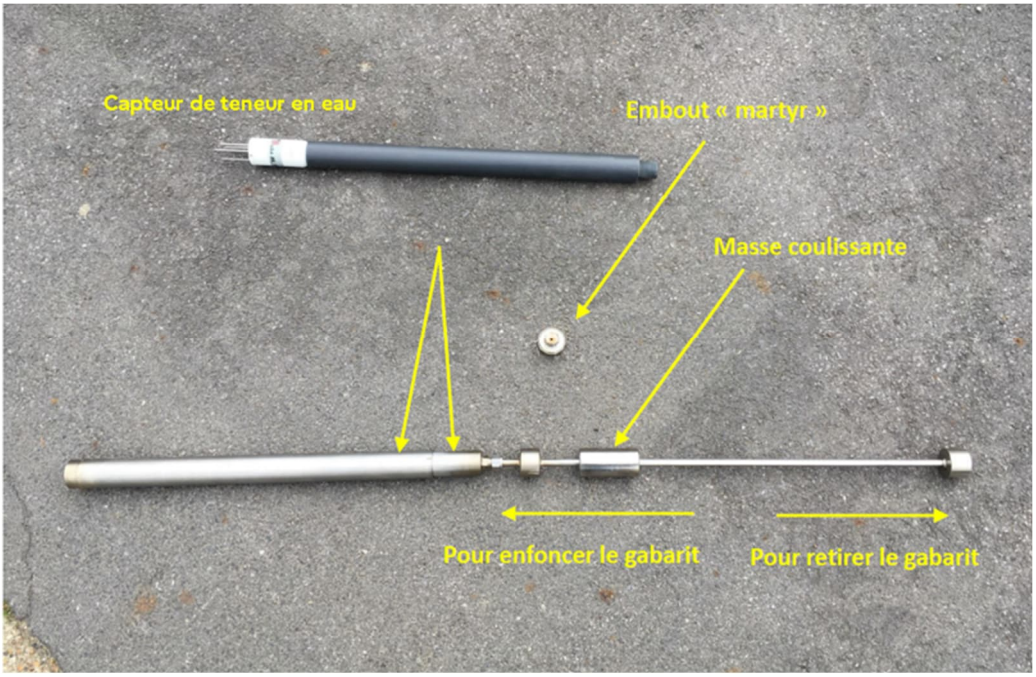


Figure 25 : Les différents éléments du gabarit fabriqué pour l'installation des capteurs de teneurs en eau

3.3.2 Perturbations liées à la foration du massif crayeux

Lors du percement à sec, la craie saturée présente un comportement fortement rhéofluidifiant : initialement cohésive au repos, elle se désagrège et se fluidifie (mise en boue) sous l'effet de faibles vibrations, lesquelles rompent les liaisons intergranulaires résiduelles dans la matrice saturée en eau. Ce mécanisme induit une chute rapide de la viscosité et transforme localement le matériau en une boue mobile, comme l'illustre la Figure 26. Cette particularité rend l'installation des capteurs délicates.

Néanmoins pour l'installation de certains capteurs (notamment ceux dédiés à la mesure de la teneur en eau et de la succion), cette propriété a pu être exploitée avantageusement : en ajoutant de l'eau, la boue devient plus liquide et peut être injectée dans l'espace annulaire entre le massif et le capteur,

assurant ainsi un scellement naturel et un contact optimal avec le milieu, condition indispensable à la fiabilité des mesures.

Figure 26 : Transformation de la craie en boue lors de la foration

3.4 Suivi, fonctionnement et maintenance de l'instrumentation

Une à deux visites annuelles sont programmées pour assurer la maintenance et le suivi de l'instrumentation. Ces visites sont généralement l'occasion pour le Cerema et l'Ineris de faire un point d'avancement. Plusieurs campagnes de scanner 3D de la carrière, effectuées par scanner laser, ont également été menées en 2016, 2021, 2022 (pilier instrumenté uniquement) et 2024.

L'observatoire fait par ailleurs l'objet de visites régulières, notamment de la part de chercheurs en mécanique des roches, qui le considèrent comme un outil expérimental de référence pour l'étude des processus de déformation et d'instabilité en milieu souterrain crayeux.

Le Tableau 1 présente les dates d'intervention depuis l'installation du dispositif, ainsi que les opérations associées.

Tableau 1 : Récapitulatif des visites effectuées sur l'observatoire pour la maintenance, le suivi et la surveillance du site depuis l'installation du dispositif.

Date d'intervention	Opérations	Organismes
Octobre 2019	Installation des premiers capteurs dans la carrière et mise en place des sondes piézométriques SD1 et SD2	Ineris
Juillet 2020	Visite de chercheurs dans le cadre du dépôt d'un projet ANR ; maintenance et installation de nouveaux capteurs (succion, teneur en eau) ; inspection géotechnique	ENPC, Université de Lille, INSA de Lyon, Cerema Rouen, Ineris, Cerema Île-de-France
Mai 2021	Campagne de forage pour échantillons dans le cadre de la thèse de Danielle Pajiep (Pajiep, 2016) ; installation de capteurs de teneur en eau en profondeur avec le nouvel outil ; campagne d'essais pénétrométriques ; inspection géotechnique ; scanner 3D	Ineris, Cerema Île-de-France, Université de Lille
Juin 2022	Maintenance ; inspection géotechnique ; scanner 3D du pilier	Ineris, Cerema
Juin 2023	Installation des bougies poreuses ; visite de la Direction générale de la prévention des risques du ministère en charge de l'écologie (DGPR)	Ineris, DGPR
Octobre 2023	Maintenance ; installation d'un capteur de succion ; tests des capteurs acoustiques (chute de poids) ; inspection géotechnique	Ineris, Cerema
Octobre 2024	Prélèvement d'eau ; maintenance ; inspection géotechnique ; localisation des emplacements des deux futurs piézomètres ; scanner 3D de la carrière pour comparaison avec les précédentes acquisitions	Ineris, Cerema
Juillet 2025	Prélèvement d'eau pour analyser la composition chimique	Ineris

Le système d'observation fait l'objet d'un suivi régulier. Les données sont examinées au minimum une fois par semaine, puis qualifiées ou écartées lorsqu'elles apparaissent aberrantes ou présentent des artefacts de mesure. En 2025, 96 % de l'instrumentation est opérationnelle. Ce taux est stable depuis le début de l'instrumentation tout en intégrant le renforcement instrumental au cours de ces années. Le taux de 100 % n'est pas atteint car les capteurs de succion, malgré leur réinstallation, ne fournissent toujours pas de données exploitables.

4 Premières analyses et interprétations des données

4.1 Méthodologie d'analyse des données : une approche exploratoire

Les six premières années de suivi de l'observatoire de Château-Landon ont généré un volume très important de données instrumentales.

Pour la majorité des capteurs, l'acquisition des mesures est réalisée avec une périodicité horaire. Dans le cadre de cette étude, une seule valeur par jour a été retenue, correspondant à la moyenne journalière des mesures. Selon le type de capteur, le jeu de données initial comprend ainsi entre 43 000 et 53 000 enregistrements à pas horaire.

Une analyse exhaustive de cet ensemble n'étant pas envisageable dans le cadre du présent rapport, les résultats présentés relèvent d'une première phase d'analyse exploratoire, destinée à être complétée ultérieurement.

L'objectif est d'identifier des tendances générales et des co-variations significatives entre les paramètres environnementaux et la réponse mécanique du massif, sans chercher à valider un modèle prédéfini.

Dans une approche exploratoire (sans présumer du type de corrélation (linéaire, quadratique, exponentielle, etc…), le coefficient de corrélation de Pearson[2] a été privilégié afin d'assurer une lecture homogène et comparable de relations linéaires entre variables. Chaque coefficient est associé à une p-value, permettant d'évaluer la significativité statistique des corrélations observées (seuil de 5 % retenu ici). Bien que le coefficient de Spearman[3], plus adapté aux relations monotones non linéaires, n'ait pas été retenu comme indicateur principal, une analyse ciblée utilisant cette méthode est présentée au paragraphe 4.4 afin de consolider les tendances identifiées par les corrélations Pearson.

La dimension temporelle a été prise en compte par des analyses de corrélation croisée, qui permettent d'intégrer des décalages allant jusqu'à un an afin de capter des réponses immédiates mais également différées, notamment en lien avec les cycles saisonniers.

Par la suite on présente les deux types d'analyses qui ont ainsi été réalisées : la première qui porte sur l'étude des corrélations entre des mesures de même nature, et la seconde qui repose sur une analyse croisée des différents paramètres mesurés, consistant à comparer les séries entre elles afin d'identifier des relations, des dépendances ou des décalages temporels entre les phénomènes observés.

4.2 Analyses temporelles (ou chroniques) par type de données

Les analyses présentées dans ce chapitre ont pour objectif d'examiner les corrélations et les interactions entre mesures d'un même type, réalisées sur l'ensemble du site ou par zones. Elles visent à mettre en évidence les tendances générales ainsi que les relations caractéristiques propres à chaque catégorie de mesure.

4.2.1 Températures et précipitations à la station de Nemours (77)

Les mesures de température et de précipitations utilisées pour le secteur d'étude sont celles de la station météorologique de Météo-France de Nemours. Elles offrent une vision globale du climat local, permettent de caractériser précisément les périodes de pluie et de sécheresse, et de mettre en relation les variations météorologiques avec le niveau de la nappe phréatique et le comportement de la carrière. Ces données constituent ainsi un référentiel externe pour contextualiser les observations et calibrer les modélisations de la carrière.

---

[2] Le coefficient de corrélation de Pearson est une mesure statistique qui indique la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables. Un résultat proche de 0 signifie qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les deux variables, une valeur proche de 1 identifie des relations fortes dans le même sens et des valeurs négatives, proches de -1, des relations fortes en sens inverses.

[3] Ce coefficient de Spearman permet d'évaluer si la relation entre deux variables peut être décrite par une fonction monotone. Il tend vers 1 en présence d'une forte tendance croissante entre les variables, et vers −1 dans le cas d'une forte tendance décroissante.

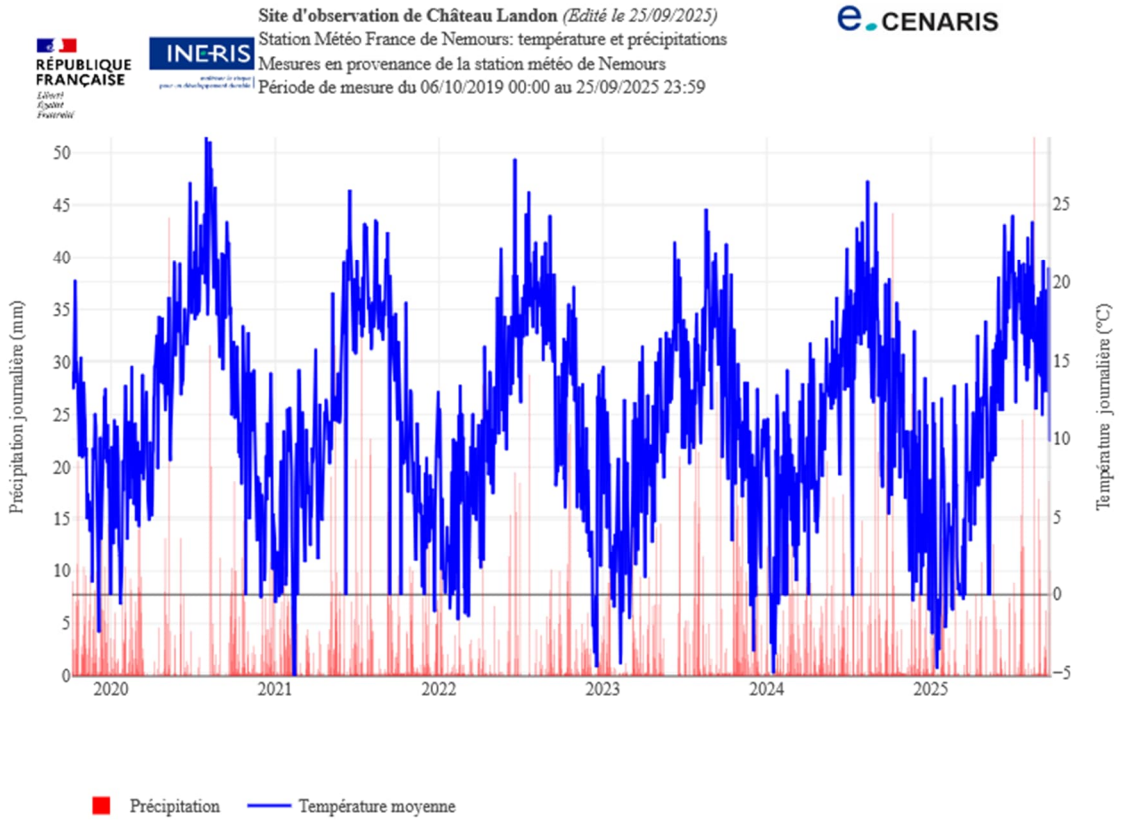


Figure 27 : Température et précipitation à la station Météo France de Nemours (77) située à 15 km de Château Landon

La Figure 27 présente l'évolution des températures moyennes et des précipitations journalières mesurées à la station météo de Nemours, située à 15 km de Château-Landon, sur la période 2019–2025. Les précipitations montrent une forte variabilité, avec des épisodes ponctuellement intenses, reflétant l'influence des conditions climatiques locales et des périodes de sécheresse. Les précipitations montrent une variabilité interannuelle marquée entre 2020 et 2025, autour d'une moyenne proche mais légèrement inférieure à la normale saisonnière de référence (690,3 mm/an, Météo-France). En 2020, les cumuls atteignent 666 mm, soit un total légèrement inférieur à la normale (Figure 28). L'année 2021 est nettement plus humide, avec 794 mm, traduisant un excédent d'environ 15 % par rapport à la moyenne climatologique. L'année 2022 se distingue ensuite par un déficit prononcé (508 mm, soit près de 25 % de moins que la normale), cohérent avec les conditions particulièrement sèches observées à l'échelle nationale. En 2023 et 2024, les précipitations repartent à la hausse (796 mm et 837 mm respectivement), témoignant de deux années excédentaires et d'une recharge hydrique significative. Les données partielles disponibles pour 2025 (505 mm cumulés à ce jour) laissent entrevoir une année globalement déficitaire si la tendance se maintient. L'analyse mensuelle met en évidence une saisonnalité classique : les mois d'hiver et d'automne concentrent l'essentiel des précipitations (souvent supérieures à 80–100 mm en novembre ou décembre), tandis que les mois printaniers et estivaux sont plus contrastés, alternant épisodes pluvieux intenses (mai 2021, juillet 2023) et périodes très sèches (troisième trimestre 2022, deuxième trimestre 2025) (Figure 28). Par comparaison aux normales mensuelles (de 49 à 67 mm selon les mois), les années 2021, 2023 et 2024 présentent plusieurs séquences excédentaires, alors que 2022 se caractérise par une déficience quasi généralisée sur tous les mois. Globalement, la période 2020–2025 illustre une alternance de phases sèches et humides, avec une variabilité typique du régime océanique atténué du Bassin Parisien.

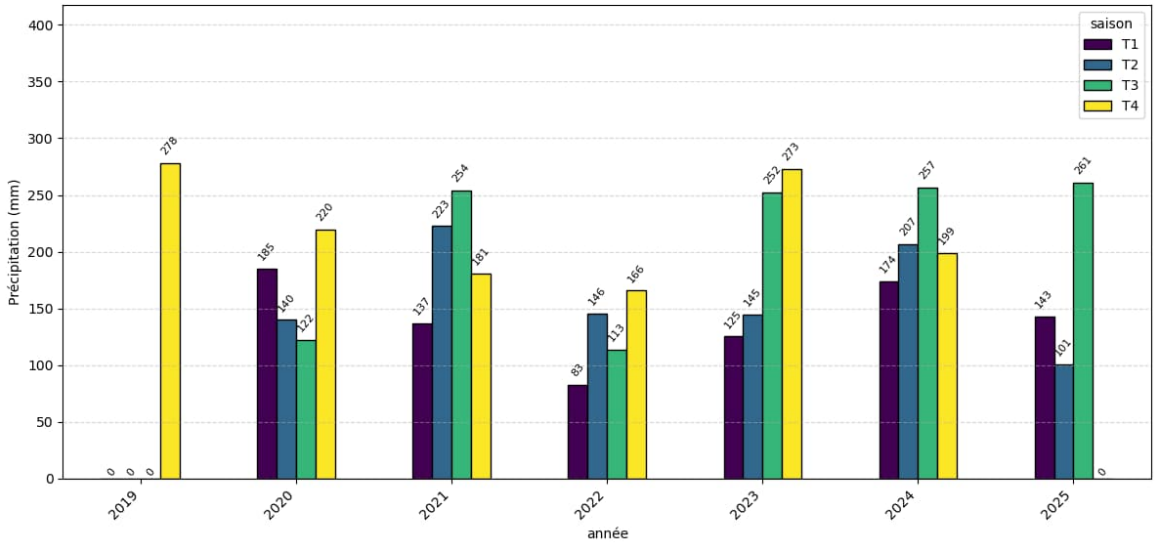


Figure 28 : Précipitations cumulées interannuelles par trimestre depuis 2019 (station de Nemours)

Les températures mesurées à la station météorologique de Nemours entre 2019 et 2025 montrent des variations interannuelles notables, bien que globalement cohérentes avec les normales saisonnières régionales fournies par Météo-France (température moyenne annuelle de référence : 12 °C). L'année 2020 se distingue par une température moyenne annuelle de 13,2 °C, soit +1,2 °C au-dessus de la normale (Figure 29). Cette anomalie positive s'explique par des températures élevées au printemps et durant l'été, avec des mois de juin à août présentant des moyennes proches ou supérieures à 20 °C, traduisant une période estivale particulièrement chaude. En 2021, la température moyenne annuelle atteint 11,4 °C, soit légèrement inférieure à la normale. Les températures mensuelles ont été contrastées : un premier semestre relativement frais, suivi d'un été modéré (juillet et août autour de 19 °C), sans épisode de chaleur marquée. L'année 2022 affiche une moyenne annuelle de 11,2 °C, également un peu inférieure à la normale. Toutefois, les mois d'été ont été chauds et secs, comme en témoigne la moyenne de 19 °C en juillet et août, contre une moyenne normale de 20 °C. L'hiver 2022 s'est montré plus froid que la moyenne, ce qui compense en partie les excès estivaux. En 2023, la température moyenne annuelle est de 10,8 °C, soit environ –1,2 °C sous la normale. L'année a été marquée par un printemps et un été moins chaud que la moyenne, avec des valeurs souvent inférieures aux normales mensuelles, notamment en juillet (12,7 °C contre 20,4 °C attendu) — ce qui suggère une anomalie de mesure ou un biais instrumental ponctuel à vérifier. En 2024, la moyenne annuelle de 10,7 °C confirme la tendance légèrement plus fraîche amorcée l'année précédente, malgré un été chaud (jusqu'à 18,8 °C en août). Globalement, sur la période 2019–2025, la station de Nemours présente une moyenne annuelle de 11,2 °C, soit légèrement inférieure à la normale régionale (12 °C).

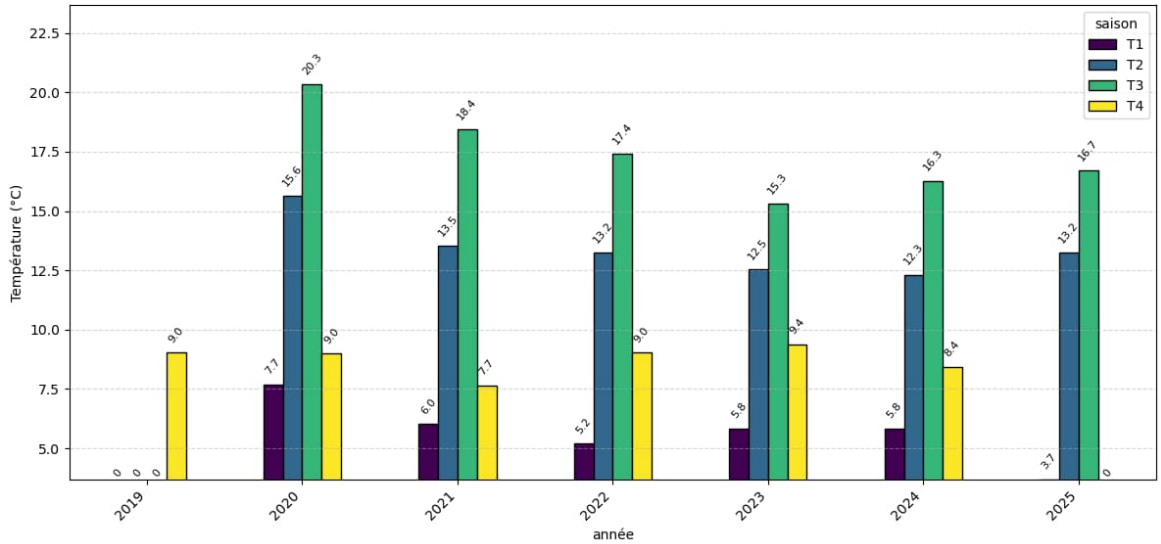


Figure 29 : Température moyenne interannuelle par saison depuis 2019 (station de Nemours)

4.2.2 Niveau de la nappe et de la rivière

La Figure 30 présente l'évolution des niveaux d'eau dans les deux piézomètres (SD1 et SD2) et dans le Loing ainsi que les niveaux d'alarme et d'ennoyage de la carrière. Les lignes pointillées indiquent respectivement le niveau d'alarme qui signifie que le niveau d'eau mesuré en SD2 est situé 1 m sous le niveau de la carrière (bleue) et le niveau d'ennoyage (rouge) de la carrière qui correspond au niveau du sol au droit de l'entrée (70.3 mNGF). L'absence de données sur la courbe du niveau du Loing pendant les périodes hivernales s'explique par l'ombre de la végétation empêchant le fonctionnement des panneaux solaires du limnimètre.

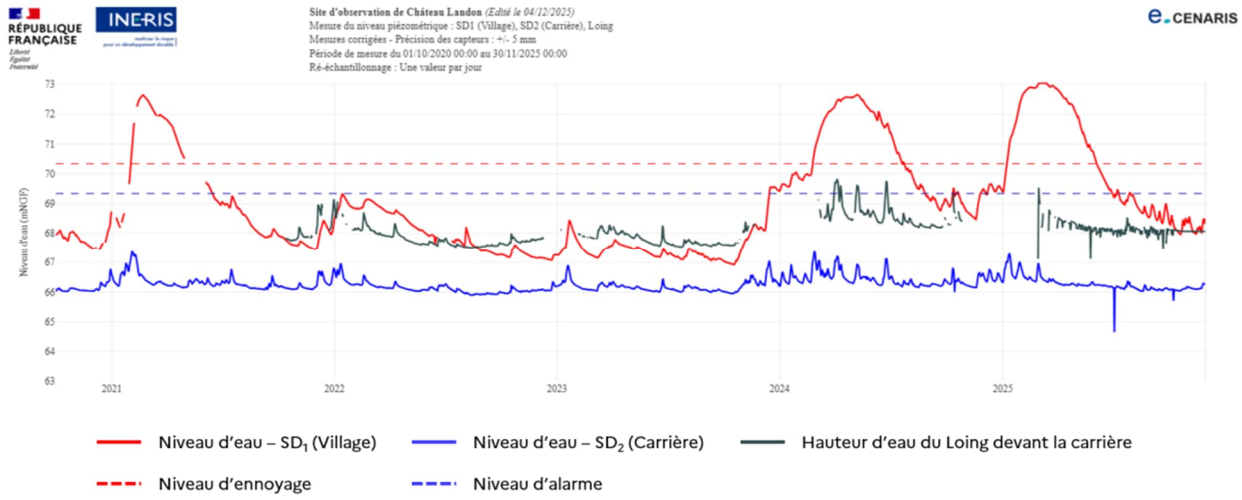


Figure 30 : Niveau de la nappe mesurée en amont (SD1 en rouge) et aval hydraulique (SD2 en bleu) de l'observatoire de Château Landon et niveau du Loing en gris sombre.

On constate la cyclicité des périodes de hautes et basses eaux des nappes ainsi que du Loing, avec des niveaux maximums sur les deux premiers trimestres des années, et des niveaux minimums sur le dernier trimestre. De plus, l'impact des périodes de sécheresse est particulièrement marqué en 2022 et 2023, sur les niveaux de la nappe mesurée en amont du site (SD1). En effet, les niveaux sont nettement plus bas, sur l'ensemble des deux années, qu'aux mêmes périodes les années précédentes (Figure 31). Nous pouvons aussi remarquer que le niveau de la nappe se trouve à environ 4 m sous la carrière en prenant comme repère le niveau de SD2.

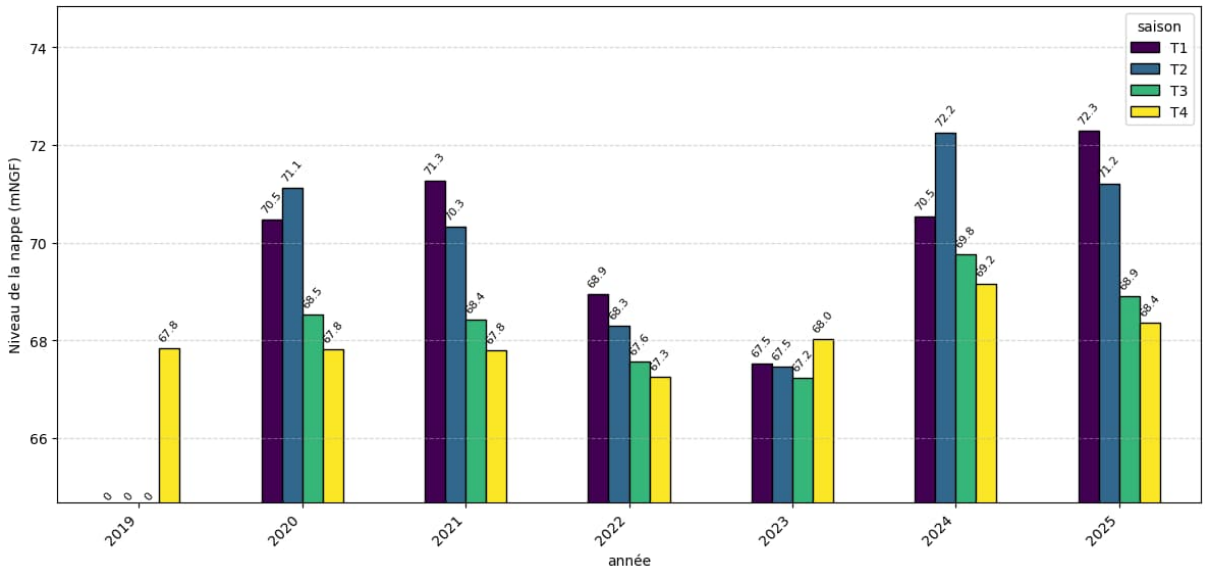


Figure 31 : Niveau moyen interannuel de la nappe dans le piézomètre SD1 par trimestre (T)

4.2.3 Température mesurée devant la carrière

La Figure 32 présente les températures mesurées devant la carrière au niveau de l'entrée 1. Les valeurs sont très similaires à celle enregistrées à la station de Nemours, avec un cycle saisonnier marqué, allant de valeurs négatives (régulièrement autour de 0°C en hiver) à des pics estivaux atteignant ou dépassant 25 ° C.

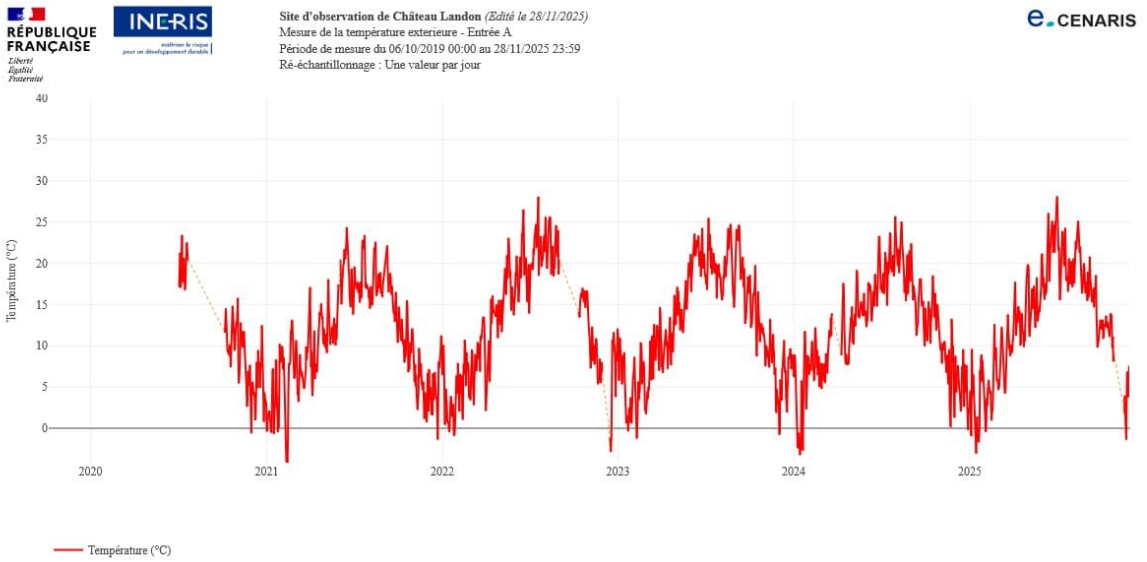


Figure 32 : Températures mesurées à l'extérieure de la carrière devant l'entrée 1

Les mesures de température réalisées devant l'entrée de la carrière de Château-Landon ont été comparées aux données de la station météorologique de Nemours à l'échelle trimestrielle (Figure 33). Les écarts ΔT (Site-Nemours) révèlent une variabilité à la fois saisonnière et interannuelle. Sur les premières années du suivi (2020-2021), les différences restent modérées, comprises entre -1,8 °C et +0,2 °C, ce qui suggère que le microclimat du site reste relativement proche des conditions régionales. À partir de 2022, les écarts deviennent systématiquement positifs, atteignant jusqu'à +4,8 °C au premier trimestre 2025, indiquant un réchauffement local plus marqué. Par ailleurs ces variations semblent corrélées à la saison, les plus fortes différences étant observées au printemps et en été, tandis que l'automne présente des écarts plus faibles.

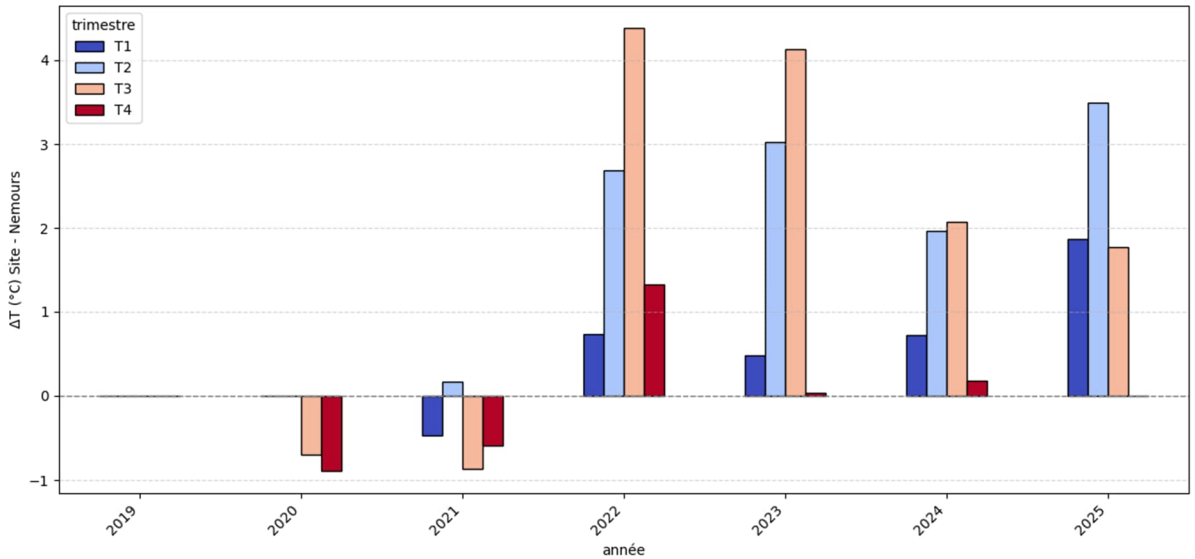


Figure 33 : Écarts de température entre la station de Nemours et le site de la carrière Royer

Bien que l'écart soit plus modéré les deux premières années du suivi (2020-2021) cette différence de température pourrait suggérer qu'un microclimat local, potentiellement lié à l'exposition du site ou à la

couverture végétale, peut moduler la température devant la carrière par rapport aux mesures régionales. Néanmoins, il ne faut pas exclure la possibilité d'une dérive instrumentale, qui sera vérifiée lors de la prochaine visite de maintenance.

4.2.4 Teneurs en eau volumiques

Dans ce chapitre, les comparaisons sont effectuées uniquement entre capteurs installés à une même profondeur, car la teneur en eau augmente naturellement avec la profondeur ; il est donc nécessaire d'utiliser des mesures prises au même niveau pour obtenir des résultats pertinents. Par conséquent, les mesures à 5 cm de profondeur ont été comparées pour les secteurs A, B et C et les mesures à 50 cm pour les secteurs A et C.

Mesures à 5 cm de profondeur

On constate dans un premier temps une différence d'amplitude des teneurs en eau : la zone B 2a et la zone B 2b sont plus faibles (respectivement 26 % et 22,5 %), tandis que les zones A et C présentent des teneurs plus élevées (30 % et 35 %) (Figure 34). Ces différences peuvent refléter une variabilité locale du massif, notamment en termes de porosité ou de capacité de stockage de l'eau. Elles peuvent toutefois également être influencées par la profondeur de la nappe : lorsque celle-ci est plus profonde, la zone non saturée est plus épaisse et la teneur en eau volumique mesurée tend généralement à être plus faible, en particulier dans les matériaux à faible capacité capillaire. Une troisième possibilité réside dans l'influence de la circulation d'air au sein de l'ouvrage, qui pourrait entraîner une désaturation plus marquée du massif en surface dans les zones A et B-2a, en fonction de son débit. Dans les zones C et B 2a, la teneur en eau ne semble pas s'être stabilisée et continue d'augmenter régulièrement depuis la mise en place des capteurs ce qui n'est pas le cas dans les deux autres zones.

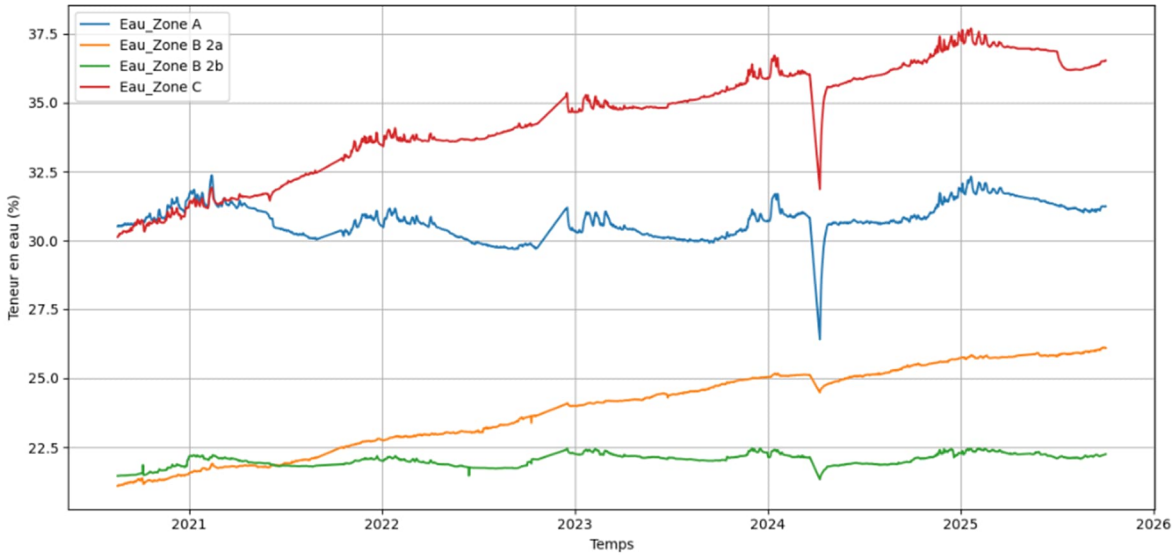


Figure 34 : Teneurs en eau à 5 cm, dans les différentes zones de l'observatoire

Les corrélations croisées réalisées mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale des réponses hydriques à 5 cm de profondeur, avec des coefficients compris entre 0,18 et 0,98 (une valeur de 1 correspondant à une corrélation parfaite). La corrélation la plus élevée est observée entre la zone B 2a et la zone C (0,98), indiquant une évolution quasi synchrone de la teneur en eau dans ces deux zones. La zone B 2b présente également des corrélations notables avec ses voisines (0,60 avec B 2a et 0,64 avec C). En revanche, la zone A se distingue par des corrélations plus faibles (≤ 0,54), suggérant un comportement hydrique relativement indépendant.

Enfin l'absence de décalage temporel significatif (lag[4] nul) indique que, lorsque les corrélations sont présentes, les variations se produisent simultanément entre les zones concernées.

[4] Le lag (décalage en anglais) est décalage temporel entre deux séries pour étudier leur corrélation à différents instants, il permet d'identifier des effets retardés ou des relations causales.

Mesures à 50 cm de profondeur

Les mesures de teneur en eau volumiques effectuées à 50 cm de profondeur dans les zones A et C montrent des comportements hydriques cohérents sur l'ensemble de la période 2021–2025 étudiée (Figure 35). La zone A présente des valeurs systématiquement plus élevées que la zone C, ce qui traduit probablement des différences locales dans les propriétés du massif (porosité, structure, capacité de stockage). Malgré cet écart de niveau moyen, les deux zones évoluent selon une dynamique similaire.

L'analyse temporelle met en évidence une augmentation progressive et régulière de la teneur en eau au fil des années, superposée à des fluctuations saisonnières de faible amplitude. Ce comportement, caractéristique d'un environnement souterrain à forte inertie hydrique, reflète une infiltration diffuse et un amortissement efficace des variations climatiques en surface.

L'anomalie ponctuelle observée début 2024 correspond à une coupure électrique ayant affecté le système d'enregistrement. Le retour immédiat aux valeurs nominales confirme qu'il s'agit d'un artefact de mesure dépourvu de signification hydrologique.

Les séries temporelles des teneurs en eau des zones A et C présentent une corrélation élevée et immédiate (r = 0,75, lag = 0 jour). Cette synchronisation des variations indique que les deux zones réagissent simultanément aux mêmes sollicitations hydrologiques, suggérant un comportement unifié du massif. La réponse lente mais homogène des deux zones montre que le milieu fonctionne comme un système hydrologique cohérent, où les transferts et les ajustements de teneur en eau s'effectuent de manière parallèle.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence :

- une dynamique hydrique du massif stable et structurée ;
- une inertie importante du massif souterrain, limitant les variations rapides ;
- une forte cohérence temporelle entre les zones A et C ;
- l'absence d'événements hydrologiques brusques sur la période étudiée.

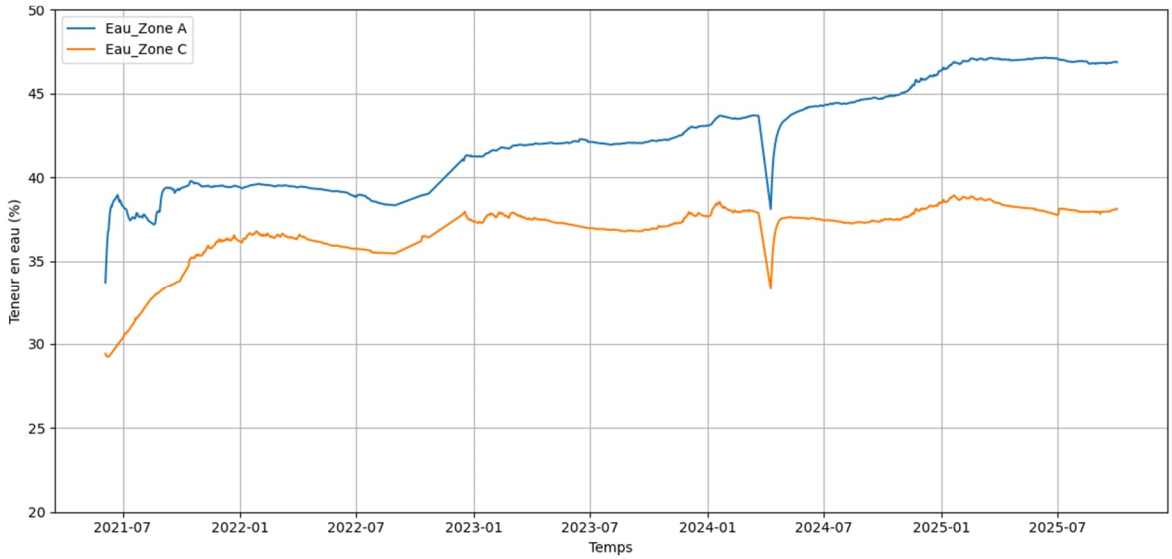


Figure 35 : Teneurs en eau à 50 cm, dans les zones A et C de l'observatoire de Château Landon

4.2.5 Succions

La Figure 36 présente les succions mesurées dans les zones A et B 2b. Comme attendu la succion mesurée dans la zone épidermique à 11 cm de profondeur est la plus importante en raison de la désaturation du milieu. En revanche on observe que la succion la plus faible se situe dans la zone B 2b pouvant suggérer que le milieu est plus saturé dans cette zone que dans la zone A. Les mesures de succion réalisées horizontalement en zone A montrent une forte cohérence spatiale, avec des corrélations élevées (0,87 à 0,93) entre capteurs implantés à différentes profondeurs et sans décalage temporel significatif. Cela indique une dynamique hydrique homogène à l'échelle locale, peu dépendante de la profondeur d'implantation. En revanche, les corrélations entre la zone A et la zone B

sont plus modérées (0,47 à 0,65), suggérant une variabilité latérale des conditions hydriques et un fonctionnement partiellement différencié entre les deux zones.

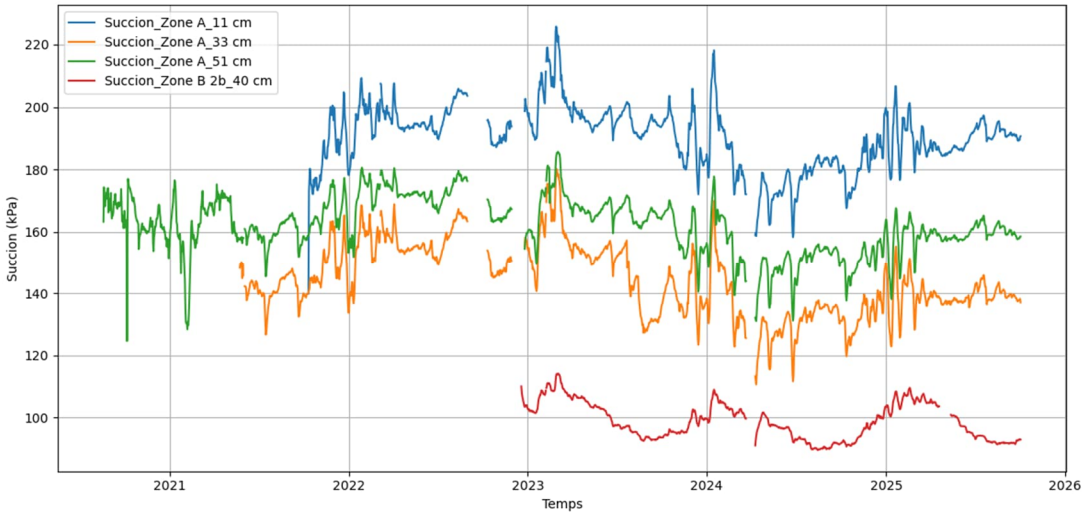


Figure 36 : Succions mesurées dans les zones A et B 2b à différentes profondeurs dans le massif

Comme indiqué précédemment dans les zones B 2a et C, les mesures de succion enregistrées dépassent la plage de fonctionnement des capteurs, ce qui suggère une absence de contact hydraulique efficace entre le capteur et le massif rocheux. En conséquence, les données acquises depuis le début de l'installation ne peuvent être considérées comme fiables. Malgré deux tentatives de réinstallation des capteurs, le dysfonctionnement persiste.

Le protocole d'installation consiste à forer un trou légèrement supérieur au diamètre du capteur, puis à combler l'espace annulaire à l'aide d'un coulis élaboré à partir de craie mélangée à de l'eau. Néanmoins il a été observé que ce coulis présente un temps de séchage rapide. Une fois durci, sa porosité très faible pourrait empêcher l'eau du massif de migrer jusqu'au capteur, compromettant ainsi la mesure. Des prélèvements ont été effectués lors de la dernière intervention d'octobre 2025 afin de caractériser la porosité du coulis en laboratoire. Si celle-ci s'avère insuffisante, il conviendra d'envisager l'utilisation d'un matériau de scellement plus perméable (de type coulis benthonique), permettant d'assurer un contact hydraulique optimal entre le capteur et le massif environnant.

Enfin rappelons que les capteurs de succion sont vraiment à la limite de leur précision, les variations sont peut-être trop faibles pour être captées. Pour rappelle la succion est nulle à saturation et égale à 200 k Pa lorsque le massif est désaturé.

4.2.6 Température et humidité relative

Températures

Les analyses montrent des comportements thermiques distincts entre les différentes zones instrumentées. La chronique temporelle sur six ans révèle une saisonnalité marquée mais avec des amplitudes été/hiver plus importante à l'extérieure alors que les zones internes présentent des variations beaucoup plus faibles, signe d'une forte inertie thermique propre aux milieux souterrains. Parmi celles-ci, la zone C apparaît comme la plus sensible aux fluctuations extérieures, avec des amplitudes hivernales pouvant dépasser 7 °C certaines années (Tableau 1), ce qui indique une connexion plus directe avec l'environnement extérieur, sa localisation proche de l'entrée 2 doit probablement jouer un rôle. Les zones B 2a et B 2b présentent des comportements intermédiaires et une forte cohérence entre elles, mais seule la Zone B 2a montre en 2025 une légère élévation du niveau thermique (Figure 37). Cette élévation pourrait s'expliquer par une modification locale des conditions climatiques dans cette portion de la galerie, par exemple une circulation d'air légèrement différente ou une variation de l'humidité relative. En effet, une humidité plus élevée peut limiter le refroidissement par évaporation et favoriser une légère hausse de température. Néanmoins, ces hypothèses sont difficiles à vérifier avec les capteurs d'humidité actuels en raison de leur précision limitée.

La zone A demeure la plus stable, présentant les amplitudes les plus faibles malgré sa proximité avec l'entrée 1. Les analyses de corrélations confirment une synchronisation quasi parfaite entre l'ensemble des zones internes suivies (corrélations de 0,85 à 0,98 avec un déphasage nul), traduisant une réponse

thermique homogène de l'ensemble du réseau souterrain. À l'inverse, les corrélations avec la température extérieure sont plus faibles et associées à des déphasages de plusieurs jours selon les secteurs, ce qui illustre la pénétration progressive des signaux thermiques extérieurs dans les galeries. L'ensemble de ces observations met en évidence un réseau thermique cohérent, mais hétérogène, dont la sensibilité varie selon la localisation, l'humidité dans la carrière et les échanges résiduels avec l'extérieur.

Tableau 2 : Récapitulatif des amplitudes maximales (hiver / été)

Zone	Amplitudes hiver (°C)	Amplitudes été (°C)	Observations générales
Zone A (2024-25)	2.38 ; 2.84	0.94 (2025)	Très stable, faible variabilité.
Zone B 2a	0.92 → 2.56, puis baisse à 1.53	1.23–1.89	Hausse progressive jusqu'en 2024, recul en 2025.
Zone B 2b	1.08 → pic à 3.15 (2021), puis 1.84 en 2025	1.35–1.87	Zone intermédiaire, pics plus marqués que B2a.
Zone C	4.87 → 7.65 (2021), puis 4.66	1.49–2.20	Zone la plus sensible aux variations internes.
Extérieur	11.7 → 17.3 (2021)	6.6 → 14.1 (2022)	Très forte variabilité naturelle, amplitudes ≈ 5–10× zones internes.

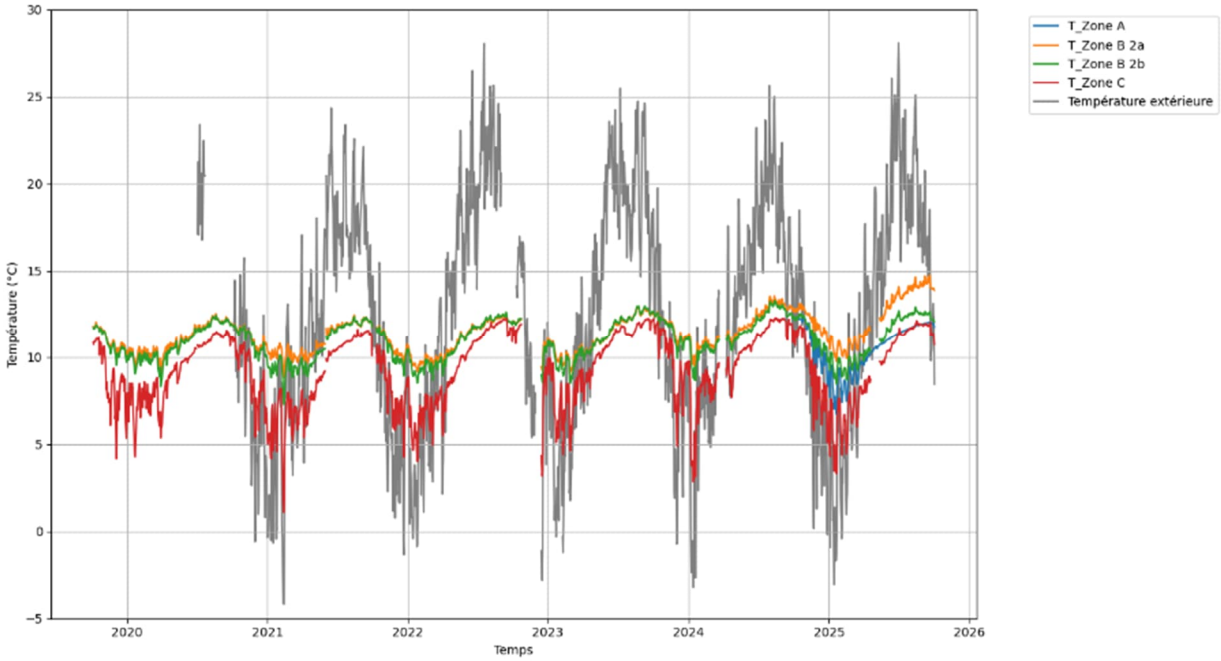


Figure 37 : Températures mesurées dans les différentes zones de l'observatoire et température mesurée à l'extérieure.

Humidité relative

La Figure 38 présente les humidités relatives mesurées dans les différentes zones de l'observatoire montre que l'humidité relative reste globalement très élevée (≈97-100 %) dans les zones A et B, avec une stabilité sur l'ensemble de la période. La zone C présente en revanche une plus grande variabilité, avec des baisses ponctuelles importantes, pouvant indiquer une sensibilité accrue aux variations locales de ventilation. Ces différences soulignent l'hétérogénéité du microclimat dans la galerie.

Les corrélations croisées entre les humidités relatives des différentes zones montrent des intensités variables, avec des coefficients allant de 0,14 à 0,83, traduisant une cohérence partielle entre les dynamiques hygrométriques locales. Les corrélations les plus élevées sont observées entre la zone A et la zone B 2b (0,83), ainsi qu'entre la zone B 2a et la zone B 2b (0,64), ce qui indique un comportement

relativement homogène au sein du secteur B. En revanche, la zone C présente des corrélations plus faibles avec les autres zones (≤ 0,34 avec les zones A et B), suggérant un régime hygrométrique distinct.

Globalement, ces résultats mettent en évidence une hétérogénéité spatiale des conditions hygrométriques, caractérisée par une forte cohérence interne dans le secteur B et un découplage partiel de la zone C, qui pourrait jouer un rôle spécifique dans la dynamique de transfert d'humidité du site. Ces conclusions doivent toutefois être interprétées avec prudence, car les capteurs actuellement en place ne semblent pas fournir une précision suffisante, notamment pour des humidités supérieures à 90 %. Au-delà desquelles, ils restituent difficilement les variations réelles.

Pour remédier à cette limitation, un capteur d'humidité de haute performance (spécialisé pour les environnements à forte humidité) sera installé dans la galerie en 2026. Spécifiquement conçu pour fournir des mesures stables et précises dans des environnements très humides (> 85 % HR) et exposés à des phénomènes de condensation sévères, cet équipement permettra de détecter de manière plus fiable les faibles variations d'humidité relative et d'améliorer significativement la qualité des analyses de corrélation (ou la pertinence des corrélations).Ce choix est justifié par une première installation pilote du capteur, réalisée en 2024 dans la carrière expérimentale et pédagogique de l'Ineris, à Saint-Maximin dans l'Oise. L'analyse des données enregistrées depuis cette date a confirmé que les faibles variations d'humidité y sont nettement mieux détectées qu'avec les instruments conventionnels (Figure 39).

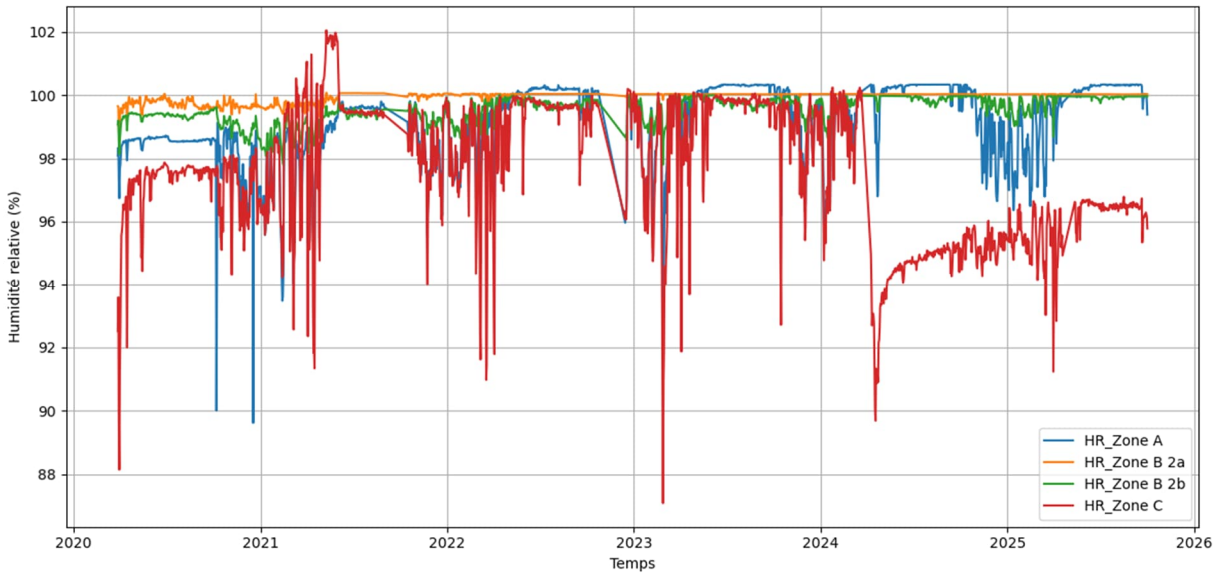


Figure 38 : Humidités relatives mesurées dans les différentes zones de l'observatoire

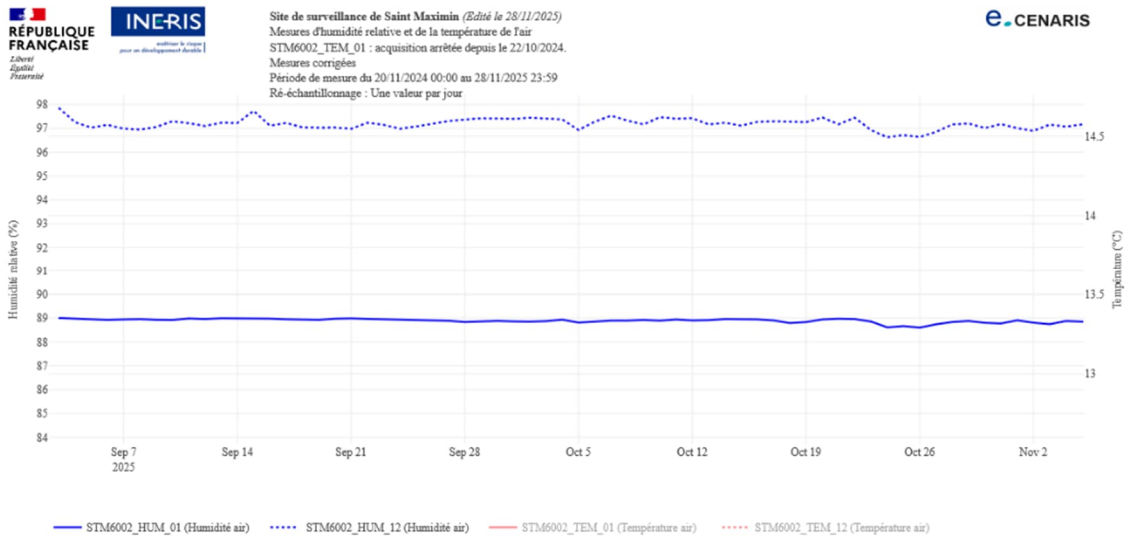


Figure 39 : Comparaison des mesures d'humidités relatives mesurées à l'aide d'un capteur conventionnel (ligne bleue continu) et d'un capteur haute performance (ligne bleu pointillée) – Carrière de Saint Maximin (60)

4.2.7 Déplacements extensométriques

Les mesures extensométriques permettent de mesurer les variations de distance entre deux points d'ancrage distants. L'interprétation des mesures extensométriques se fait de manière relative par rapport à la valeur initiale :

$$\Delta u = u_{mesuré} - u_{initial}$$

Avec u le déplacement mesuré en mm.

La convention de signe pour les extensomètres en forage est la suivante : une variation positive des mesures correspond à une extension du matériau, tandis qu'une variation négative traduit la compression du matériau. Cette convention est inversée pour les extensomètres à fils.

Extensomètres en forage

Les déplacements mesurés en forage sont présentés sur la Figure 40. Dans les trois zones instrumentées, les déplacements :

- sont limitées depuis le début du suivi : déplacements totaux compris entre 0,02 mm et -0,06 mm sur 6 ans selon les zones (pour rappel la précision du capteur est ±0.15 mm) ;
- semblent suivre des variations saisonnières (de température), caractérisées par des oscillations régulières et de faibles amplitudes.

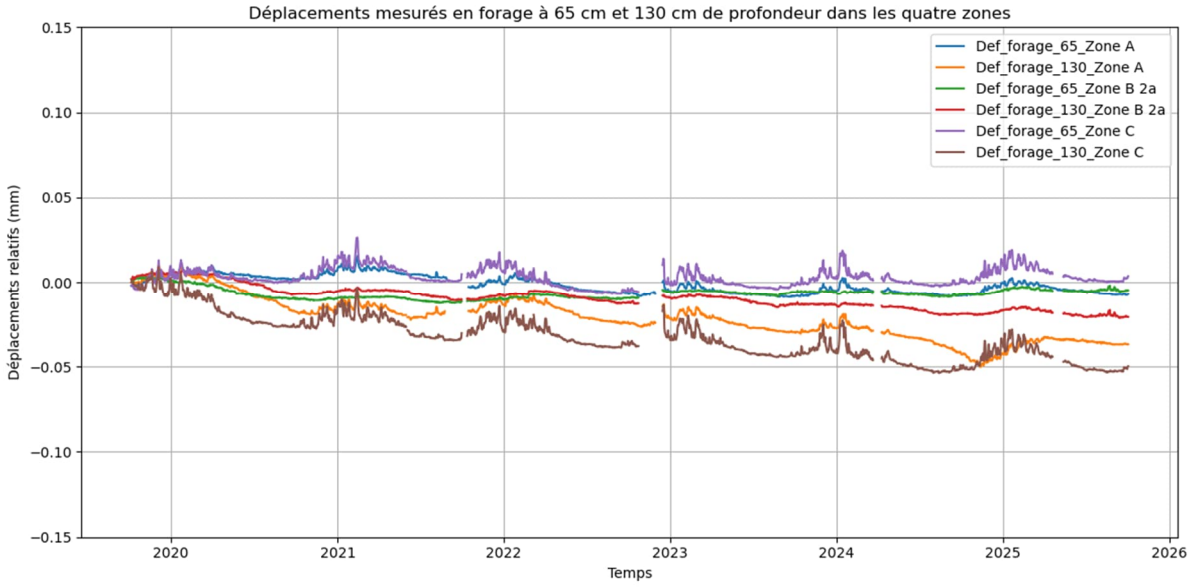


Figure 40 : Déplacements mesurés en forages, à 65 cm et 130 cm de profondeur, dans les différentes zones de l'observatoire

Ces variations saisonnières ne traduisent pas une déformation du massif, mais proviennent principalement de la dilatation thermique des capteurs eux-mêmes, sensible aux variations de température. Ce comportement instrumental masque partiellement la réponse mécanique réelle du massif et rend nécessaire la correction du signal.

La Figure 41 illustre cette démarche de correction sur les données de l'extensomètre à fil. Sur le signal brut (courbe jaune), les oscillations périodiques d'origine thermique sont bien visibles. Une analyse fréquentielle (FFT) a permis d'identifier un pic dominant à une période d'environ 365 jours, confirmant l'origine saisonnière du phénomène (Figure 42).

Un modèle sinusoïdal (courbe bleue) a alors été ajusté sur le signal afin de reproduire cette composante thermique. Enfin, la soustraction du modèle au signal brut a permis d'obtenir le signal corrigé (courbe noire).

Après correction, les amplitudes des oscillations se réduisent notablement. Les signaux corrigés présentent une évolution beaucoup plus stable dans le temps (Figure 43) ; les faibles fluctuations résiduelles peuvent être attribuées à des déformations mécaniques locales ou à du bruit de mesure. La tendance générale, proche de zéro, indique une stabilité mécanique dans l'ensemble des zones suivies. Les variations observées demeurent inférieures à la précision des capteurs (0,15 mm).

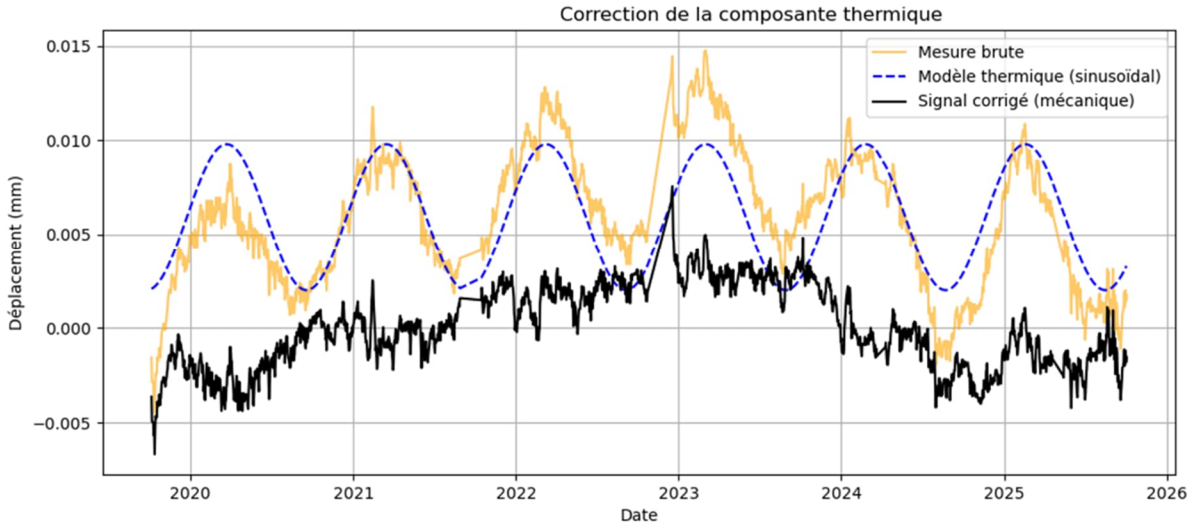


Figure 41 : Signal extensométrique enregistré avec un des extensomètres à fil en paroi (brut, modèle thermique et signal corrigé)

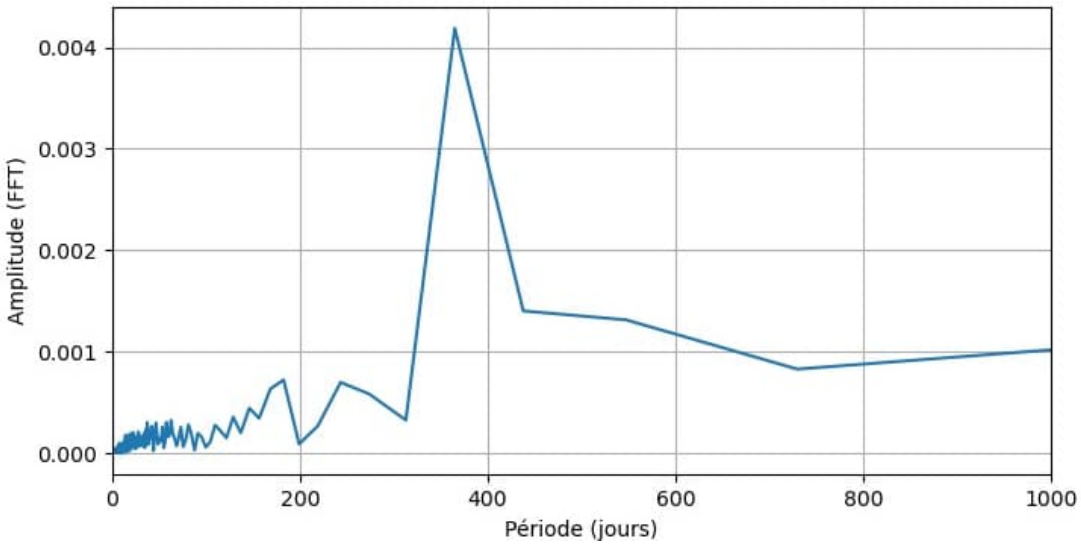


Figure 42 : Spectre de fréquence (FFT) du forage extensométrique à fil en paroi

Une analyse de corrélation croisée a néanmoins été menée entre les différentes zones sur les mesures extensométriques corrigées. Celle-ci met en évidence des comportements différenciés : des réponses simultanées sont observées au sein d'une même zone (avec des coefficients de corrélation compris entre 0,71 et 0,97), tandis que les corrélations entre zones demeurent faibles. Les corrélations élevées entre les profondeurs de 65 cm et 130 cm confirment que les extensomètres sont bien solidaires du terrain, tandis que la faible corrélation inter-zones souligne l'importance des hétérogénéités locales et confirme l'absence d'un mouvement global de l'ouvrage.

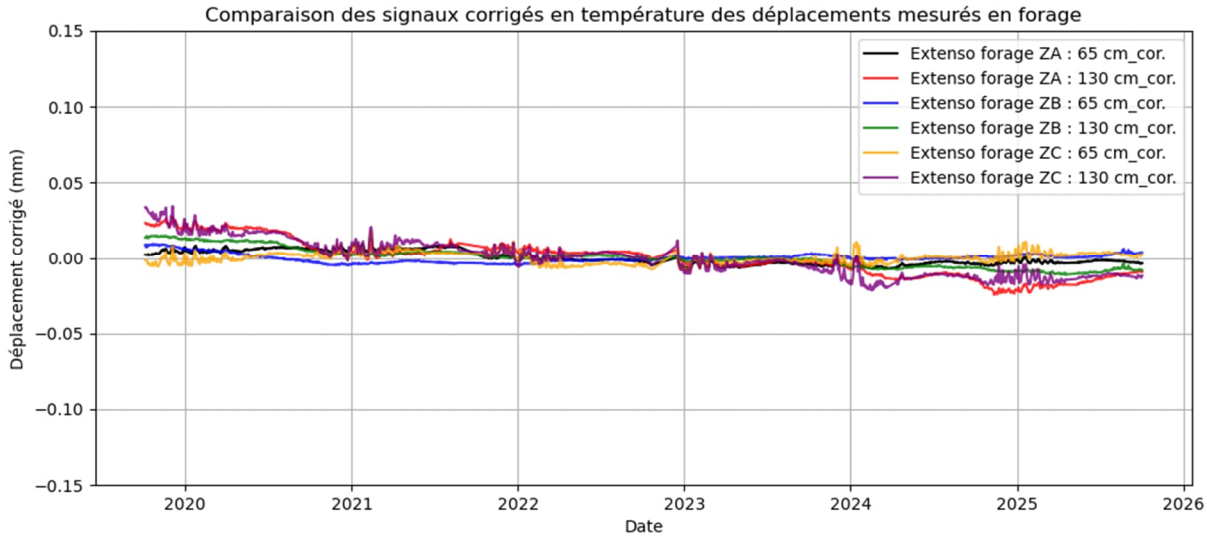


Figure 43 : Déplacements mesurés en forages à 65 cm et 130 cm de profondeur corrigées en température les différentes zones de l'observatoire

Extensomètre à fil

Comme pour les extensomètres en forage, une correction thermique a été appliquée aux données afin de corriger l'effet de la réponse thermique du capteur lui-même,

Les données corrigées des extensomètres à fil sont présentées sur la Figure 44. Les déplacements sont très faibles, bien que l'on puisse observer une légère tendance à l'augmentation de la distance entre les parois de la galerie dans la Zone C. Les amplitudes mesurées sont largement inférieures à la précision des capteurs (0,15 mm). Dans ce contexte, toute interprétation doit être faite avec prudence, les signaux pouvant être proches du bruit de mesure.

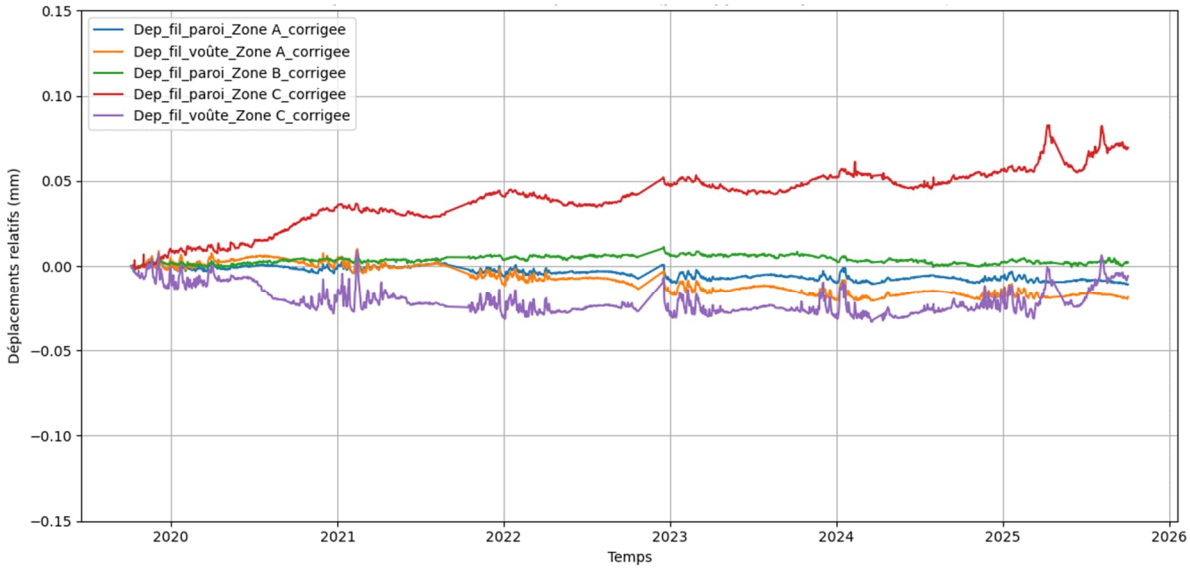


Figure 44 : Déplacements extensométriques à fil corrigés en température dans les différentes zones de l'observatoire de Château Landon

Malgré ces faibles amplitudes, l'analyse des corrélations entre les différentes zones fournit des indications qualitatives sur le comportement relatif des parois et de la voûte :

- Zone A : Les mouvements de la paroi et de la voûte sont fortement corrélés et synchrones (corrélation maximale ~0,95, lag 0 jours), indiquant une cohérence locale dans cette zone.

- Zones A et C : Certaines corrélations négatives avec un décalage d'environ 60 jours apparaissent entre les déplacements de la zone A et ceux de la zone C, pour les parois comme pour les voûtes. Cependant, compte tenu de la très faible amplitude des déplacements et de l'éloignement des zones, ces corrélations ne doivent pas être interprétées comme des interactions mécaniques réelles, mais plutôt comme des variations statistiques ou aléatoires au sein des mesures.
- Zone B : Les déplacements de la zone B présentent peu de corrélations avec les autres zones, indiquant une quasi-indépendance des mouvements par rapport aux zones A et C.
- Zone C : une corrélation négative faible (r = -0,36, lag = 60 jours) est observée entre les déplacements de la voûte et de la paroi. Cette relation est très modérée et décalée dans le temps, et, compte tenu des amplitudes extrêmement faibles des déplacements à prendre avec précaution.

En conclusion, bien que les déplacements absolus restent négligeables par rapport à la précision instrumentale, les analyses de corrélation confirment une cohérence locale dans la zone A et suggèrent des variations relatives faibles et aléatoires entre les zones éloignées. Ces résultats confirment que les zones sont mécaniquement indépendantes et qu'aucun déplacement local ni général de l'ouvrage n'est observé jusqu'à présent.

Vitesses de déplacement

Les vitesses de déplacement moyennes ont été calculées pour l'ensemble des extensomètres et les valeurs obtenues, ainsi que les déplacements prévisionnels à 1 an et à 10 ans, sont présentés dans le Tableau 3. Ces vitesses sont typiques des phénomènes de déformation lente, tels que le fluage. Projetée à 10 ans, l'amplitude des déplacements demeure très faible : les valeurs maximales restent de l'ordre du dixième de millimètre. Toutefois, c'est dans la zone C que les déplacements les plus importants sont enregistrés, ce qui indique que les sollicitations mécaniques y sont probablement plus élevées.

Tableau 3 : Vitesse de déplacements calculées dans les différentes zones de l'observatoire de Château Landon

Zone	Extensomètres	Vitesse moyenne (mm/an)	Déplacement cumulé depuis le début (mm)	Déplacement estimé sur 10 ans (mm)
Zone A	Extensomètre à fils (paroi)	-0,00364	-0,0105	-0,0364
	Extensomètre à fils (voûte)	-0,00557	-0,0193	-0,0557
	Extensomètre en forage p = 65 cm	-0,00141	-0,00536	-0,0141
	Extensomètre en forage p= 130 cm	-0,00800	-0,0369	-0,0800
Zone B	Extensomètre à fils (paroi)	-0,00017	0,00331	-0,0017
	Extensomètre en forage p = 65 cm	-0,00219	-0,00678	-0,0219
	Extensomètre en forage p= 130 cm	-0,00507	-0,0227	-0,0507
Zone C	Extensomètre à fils (paroi)	0,0124	0,0713	0,124
	Extensomètre à fils (voûte)	-0,00351	-0,0120	-0,0351
	Extensomètre en forage p = 65 cm	-0,00187	0,00559	-0,0187
	Extensomètre en forage p= 130 cm	-0,0120	-0,0497	-0,120

4.2.8 Déplacements radar

Les mesures radar (cf. Figure 45) dans la zone B 2a indiquent des déplacements importants systématiquement négatifs. Par ailleurs, la variation de 10 cm observée, correspondant à un apparent gonflement de la paroi, n'est pas corroborée par les mesures réalisées au laser mètre.

Le capteur VEGAPULS mesure la distance à la paroi par réflexion d'ondes radar. Toutefois, la présence de blocs ou d'irrégularités à proximité immédiate de la paroi peut altérer la mesure : le capteur enregistre alors le signal réfléchi par ces obstacles, entraînant une surestimation de la position du front. Il est donc essentiel de maintenir un champ de mesure dégagé afin de garantir la fiabilité et la représentativité des données acquises.

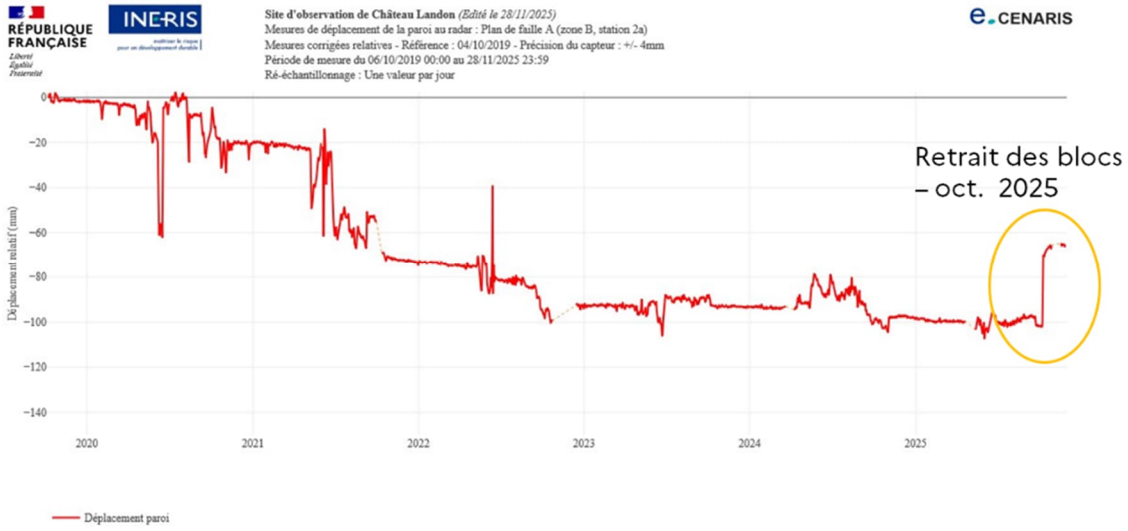


Figure 45 : Distances mesurées au radar depuis l'installation. Zoom sur octobre 2025.

Les hypothèses relatives à la propagation des ondes radar (Figure 46) suggèrent que ce phénomène pourrait être à l'origine de certaines anomalies de mesure, notamment la diminution observée en 2020. Afin de tester cette hypothèse, les blocs situés devant la paroi ont été retirés lors de la dernière intervention, réalisée en octobre 2025. Cette opération a conduit à une augmentation de la distance mesurée de 3 cm, conforme à l'effet attendu.

Figure 46 : Hypothèses de projection d'onde radar

La Figure 47 illustre es déplacements relatifs du remblai dans la zone C, mesurés par le radar positionné à la verticale de la voûte. En l'absence d'obstacle susceptible d'interférer avec le faisceau radar, les mesures sont considérées comme plus fiables que dans la zone B. Une valeur négative indique une

diminution de la distance entre la voûte et le remblai, traduisant un soulèvement du remblai, tandis qu'une valeur positive correspond à une augmentation de cette distance, révélant un tassement du remblai. Les mesures mettent en évidence une réponse cyclique du massif. L'amplitude des variations atteint environ –2 cm à +1 cm, traduisant des oscillations récurrentes sans tendance nette à un déplacement permanent, les valeurs demeurant globalement centrées autour de zéro.

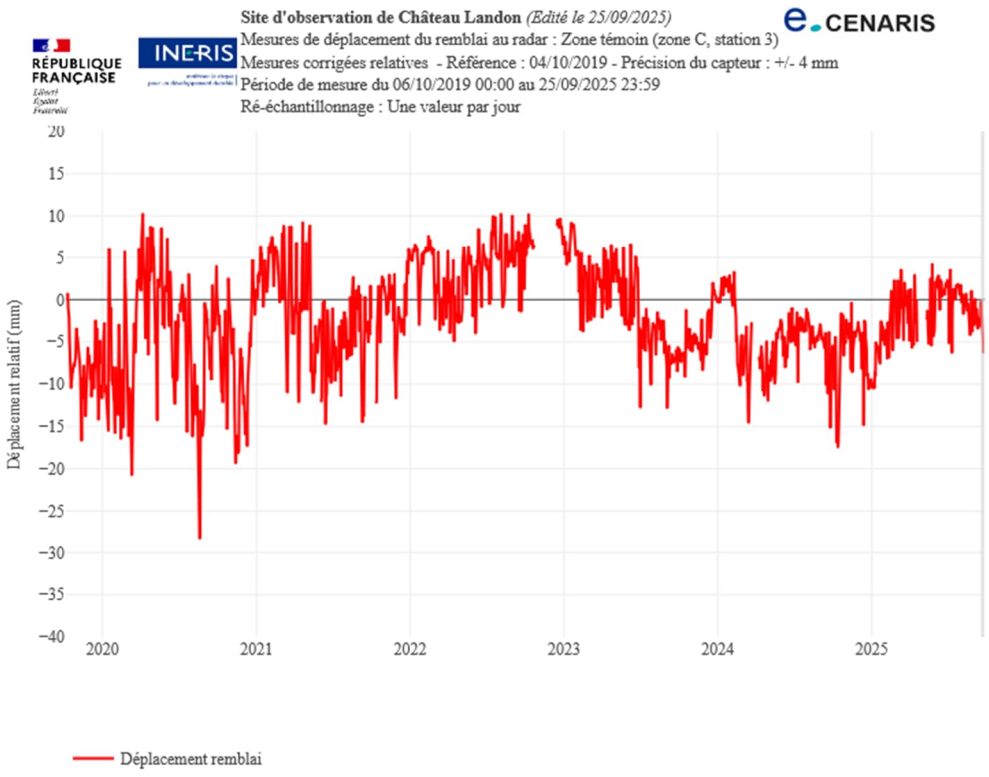


Figure 47 : Déplacements du remblai dans la zone C mesurés au radar

4.2.9 Fissuromètre

La Figure 48 présente le déplacement des lèvres de la fissure instrumentée dans la zone B 2b. Tout comme pour les mesures extensométriques on observe des fluctuations cycliques superposées, attribuables aux variations thermiques saisonnières dans la carrière qui induisent des dilatations compressions du capteur lui-même. Les mesures obtenues après correction de la température sont présentées en Figure 49. On observe une fermeture lente et progressive de la fissure depuis son installation, de l'ordre de 0,03 mm (on rappelle ici que la précision du capteur est de 0.025 mm). L'ajustement d'un modèle sinusoïdal révèle une amplitude de 0,005 mm et une période annuelle de 369 jours, correspondant à une oscillation saisonnière faible, vraisemblablement liée aux variations thermiques résiduelles ou hydriques du sol, encore perceptibles malgré la correction.

Sur l'ensemble de la période d'observation (environ 6 ans), la vitesse moyenne de fermeture est estimée à –0,0053 mm/an. Cette valeur très faible traduit un mouvement lent, probablement lié au glissement progressif du bloc situé à droite du capteur (Figure 21). Aucun mouvement brusque ni accélération notable n'est observé. Les mouvements enregistrés sont compatibles avec un réajustement mécanique à long terme plutôt qu'avec un glissement imminent ou instable. Si cette fermeture lente se maintient, elle resterait inférieure à 0,2 mm sur les 30 prochaines années. Les oscillations saisonnières, très faibles (0,005 mm), sont négligeables par rapport à la fermeture totale projetée et n'affectent quasiment pas la tendance à long terme.

Figure 48 : Écartement de fissure dans la zone B de l'observatoire de Château Landon

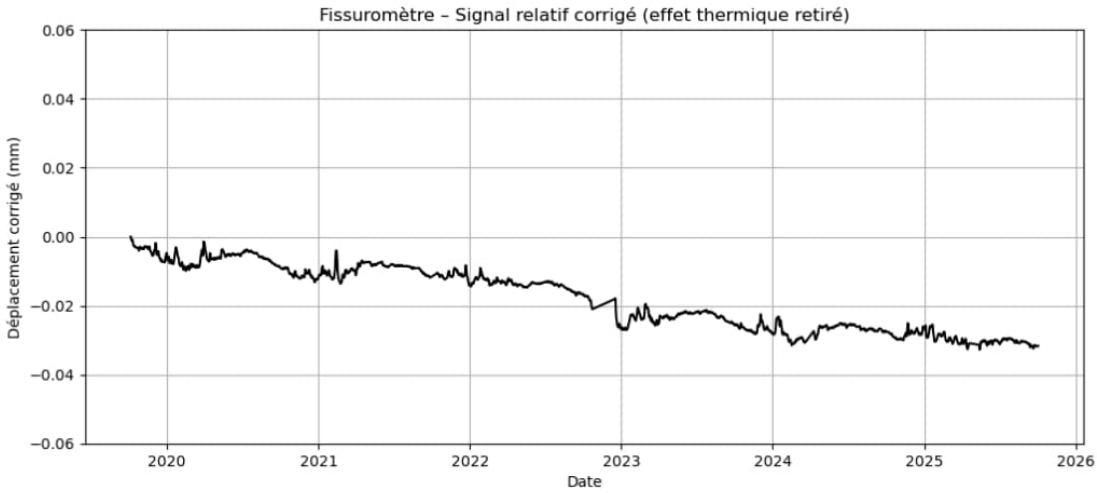


Figure 49 : Évolution de l'ouverture de la fracture dans la zone B 2b -mesures corrigées (effet thermique retiré)

4.2.10 Relevé de fracturation

Afin de mieux évaluer l'état de la carrière et son évolution, des inspections visuelles et des relevés de fracturation sont réalisés annuellement par le Cerema (Gaumet et al., 2021 ; Conil et al., 2023) depuis la mise en service de l'observatoire.

La caractérisation d'une cinquantaine de fractures (Figure 50) met en évidence des directions dominantes comprises entre N010 et N120, cohérentes avec l'orientation de la vallée du Loing en amont (N015) et celle de son affluent la Cléry (N100). Comme observé dans d'autres carrières de craie (Moiriat et al., 2005), cette orientation traduit l'influence de phénomènes de décompression associés à l'incision des vallées fluviales.

Plus des trois quarts des fractures sont des diaclases sans déplacement, majoritairement fermées. Les fractures à rejet correspondent à des failles normales présentant des ouvertures et rejets de quelques millimètres à quelques centimètres. À l'exception de rares fractures élargies par des processus de dissolution karstique, les autres sont ouvertes et soit sèches, soit remplies de sédiments argileux ou d'une veine siliceuse. Les pendages sont principalement forts (> 65°) à subverticaux.

Les données de fracturation ont été intégrées dans un SIG sur un plan ancien géoréférencé par le Cerema (Gaumet et al., 2021). La cartographie met en évidence plusieurs coins de piliers très fracturés ou en voie de ruine, ainsi que la présence de conduits karstiques (véritables chenaux de dissolution de 0,5 à 3 m de diamètre) ensuite comblés gravitairement par des éléments du Poudingue de Nemours, plus humide que la craie encaissante et localement associés à des réseaux racinaires développés depuis la surface. Ce réseau karstique, essentiellement vertical, présente également des ramifications horizontales au-dessus du mur de remblais, visibles au fond de la carrière et à proximité de l'Entrée 1.

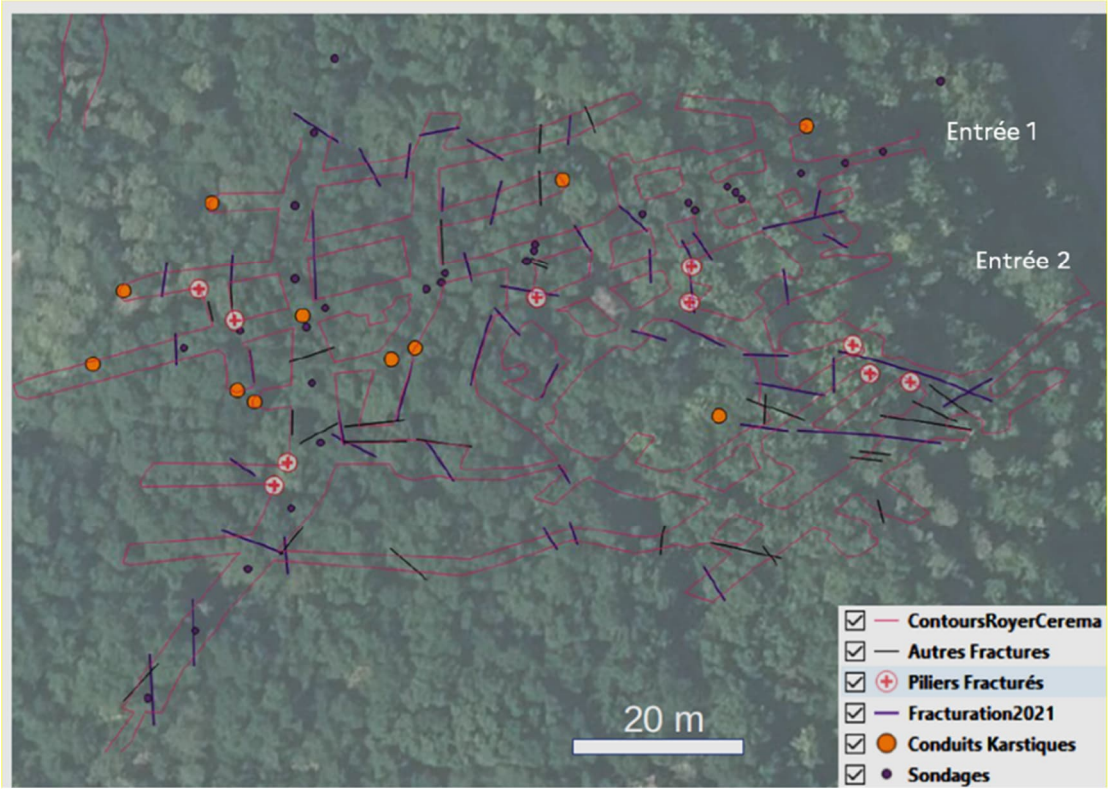


Figure 50 : Cartographie des données de fracturation dans la carrière Royer (Gaumet et al., 2021)

Le suivi de la fracturation est également réalisé sur le pilier instrumenté (cf § 4.3.1). Toutes les faces ont été photographiées et les discontinuités ont été relevées. Selon les faces, et la hauteur d'observation du pilier, la fréquence des discontinuités varie de 3 à 15 par mètre linéaire. Toutes faces confondues, une grande majorité des fractures ont des pendages supérieurs à 70° et des directions comprises entre N120 et N150. À noter que le pilier est traversé par trois fractures relevées lors de l'étude à l'échelle de la carrière, dont la fameuse diaclase ouverte à veine siliceuse référencée (Figure 51), orientée Est-Ouest et créant une discontinuité lithologique (silice dure versus craie tendre) de forte pente (72° vers le Nord).

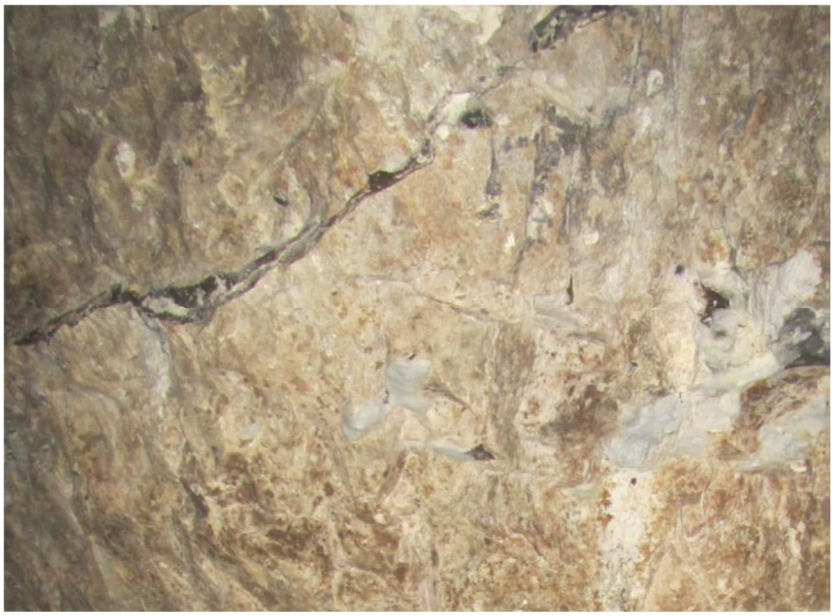


Figure 51 : Diaclase à veine siliceuse de direction N80 (pendage de 72° orienté Nord). Prise de vue depuis le coin Nord-Ouest du pilier (Gaumet et al., 2021).

4.2.11 Données acoustiques

Un dispositif complet constitué de 4 microphones a été installé dans la carrière. De nombreux signaux acoustiques sont régulièrement détectés au sein de l'observatoire depuis 2019 (Figure 52). Le nombre élevé d'événements enregistrés a rendu leur traitement et leur interprétation particulièrement complexes. Un travail d'analyse a donc été entrepris afin de ne conserver que les événements véritablement représentatifs de chutes de blocs issues du massif. Le principal défi de cette phase d'étude résidait ainsi dans l'interprétation des signaux afin de qualifier l'activité acoustique du site et d'identifier l'origine des événements détectés.

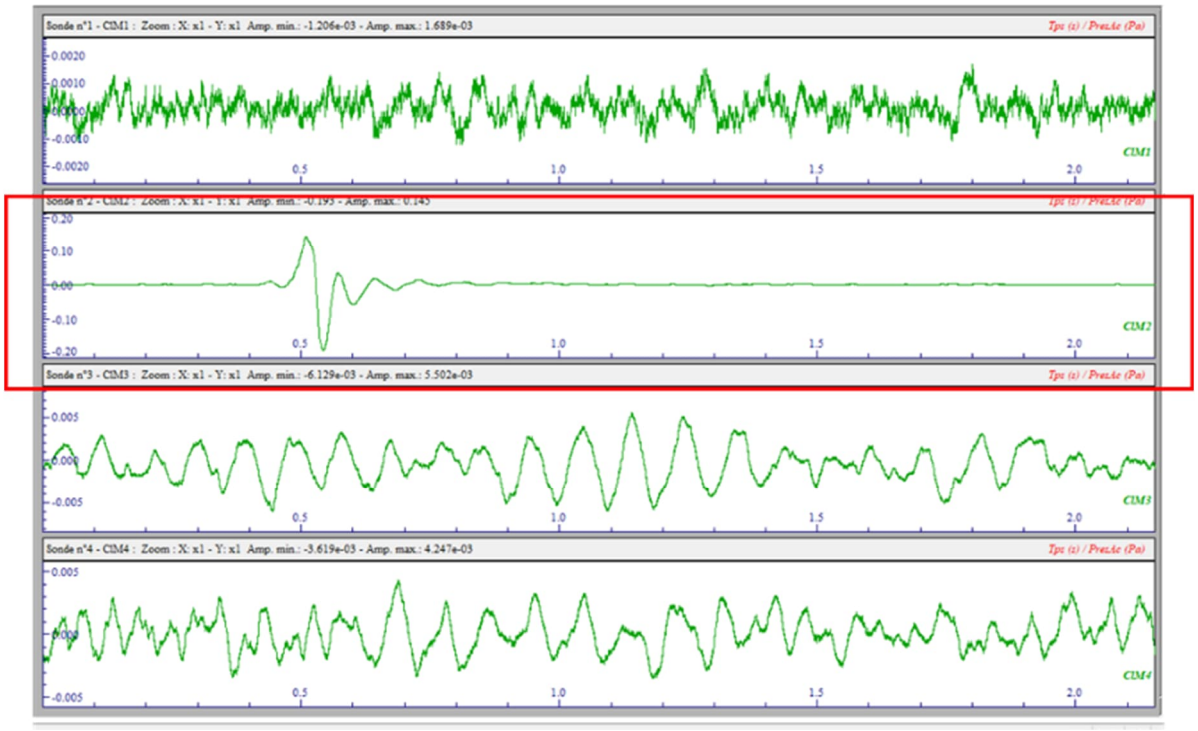


Figure 52 : Exemple de signal déclenchant sur le microphone CIM2

Une étude a été menée par l'Ineris (Conil et al., 2024) afin d'explorer l'utilisation de l'apprentissage automatique pour la classification automatique des signaux acoustiques.

Une première phase a consisté à classer les évènements enregistrés depuis 2019 en trois catégories principales :

- 181 événements de type « chute de blocs » : signaux acoustiques générés par des chutes de blocs, pouvant indiquer une instabilité. La taille des blocs n'est pas prise en compte mais dans la plupart des cas il s'agit de blocs centimétriques
- 200bruits « autres » : signaux provenant de sources non structurelles, telles que des activités anthropiques ou des interférences environnementales.
- 620 signaux d'autotest : tests quotidiens du système générés à distance par des impulsions électroniques sur les capteurs afin de vérifier leur bon fonctionnement. Ces signaux présentent une forme d'onde unique et servent de catégorie de contrôle pour le modèle de classification.

Ce schéma de classification a constitué la base de l'apprentissage supervisé, permettant le développement du modèle avec des catégories bien définies et étiquetées.

Pour faire face au niveau élevé de bruit de fond dans la carrière, un filtre passe-haut a été appliqué à chaque signal. Ce filtre élimine les basses fréquences, souvent associées au bruit ambiant, tout en conservant les fréquences spécifiques aux événements nécessaires à la classification. Cette étape de prétraitement a amélioré de manière significative la qualité des signaux, en particulier pour la catégorie «bruits autres », et a été particulièrement importante pour isoler les caractéristiques propres aux événements de chute de blocs.

Pour classifier efficacement les signaux, des caractéristiques spécifiques ont été extrait des signaux à partir des domaines temporel et fréquentiel. Le Tableau 4 résume les caractéristiques retenues.

Tableau 4 : Sélection des caractéristiques (d'après Drif et al., 2025)

Caractéristiques	Description
Pourcentage d'amplitudes dépassant un seuil de 20 000 unités	Permet de distinguer les signaux de chute de blocs, qui présentent un nombre plus élevé d'amplitudes dépassant le seuil.
Amplitude maximale / amplitude minimale	Les signaux de chute de blocs présentent une plage d'amplitude plus importante.
Rapport d'énergie de la bande utile du signal sur l'énergie totale	En général, les signaux de chute de blocs sont plus énergétiques dans la bande utile.
Nombre de passages par zéro sur une période spécifique (TTPZ)	Indique des caractéristiques telles que la fréquence, la périodicité ou la présence de bruit et d'artefacts.
Centre de gravité du spectre fréquentiel du signal	La visualisation des centres de gravité spectraux permet de distinguer les chutes de blocs des autres signaux.
Rapport signal/bruit	Évalue la qualité du signal.
Énergie moyenne du signal	Calculée comme la somme des amplitudes au carré divisée par le nombre total d'échantillons. Les signaux « autres » sont fortement atténués après application du filtre passe-haut, entraînant une réduction significative de l'énergie.
Symétrie horizontale du signal	Les signaux de chute de blocs présentent une symétrie élevée.
Symétrie verticale du signal	Les signaux « autres » présentent également une certaine symétrie.
Durée	Les signaux de chute de blocs sont courts.
Facteur de cohérence	Mesure la similarité entre deux signaux en fonction de la fréquence, indiquant si le signal est détecté par deux capteurs.
Facteur d'atténuation	Réduction de l'amplitude du signal lors de sa propagation entre deux microphones ; un bruit extérieur s'atténuera rapidement.

Une base de données a ensuite été créée, dans laquelle chaque ligne correspond à un événement et chaque colonne représente les caractéristiques décrites ci-dessus pour chacun des quatre microphones.

Le peu d'événements « chute de blocs » et « autres bruits » (en comparaison avec les « autotests ») a nécessité une augmentation des données (Drif et al., 2025) afin de constituer un jeu de données équilibré et robuste pour les trois catégories. Une combinaison de techniques a été employée pour étendre le jeu de données à environ 1500 événements, en privilégiant des transformations réalistes :

- Segmentation et ajustement d'amplitude : des segments spécifiques ont été extraits et les amplitudes ajustées par des facteurs aléatoires afin de simuler des variations.
- Ajout de bruit : un bruit gaussien a été ajouté aux signaux pour reproduire les variations environnementales.
- Tronquage : la queue du signal a été tronquée pour imiter de légères variations dans la durée naturelle du signal.

Ces signaux augmentés ont permis au modèle d'appliquer efficacement ses capacités de classification sur une gamme plus large de scénarios réalistes, améliorant ainsi de manière significative la fiabilité des résultats.

Quatre modèles de machine learning ont été testés (Drif et al., 2025) incluant la régression logistique (Hosmer et al., 2013), la forêt aléatoire (Random Forest, Breiman, 2001), le classificateur à vecteurs de support (SVC, Cortes & Vapnik, 1995) et XGBoost (Chen & Guestrin, 2016). L'application de ces techniques a permis d'atteindre une précision globale supérieure à 92 %, avec une performance particulièrement élevée pour la détection des chutes de blocs, atteignant un rappel proche de 98 %.

Ces travaux ont également montré que les signaux enregistrés par les microphones CIM3 et CIM4 étaient souvent de moindre qualité et que leur intégration dans le processus d'apprentissage n'améliorait pas les performances du modèle. En conséquence, ces deux microphones ont été démontés en octobre 2024 (Conil et al., 2024). Ces résultats fournissent désormais un cadre solide pour la surveillance acoustique en temps réel de l'observatoire. La mise en œuvre automatique de cette méthode permettra, à terme, une détection plus rapide et une analyse plus pertinente des événements survenant dans la carrière.

La poursuite de l'étude consistera à croiser les données acoustiques avec les variables climatiques, notamment les épisodes pluvieux et les périodes de sécheresse, afin de déterminer s'il existe un lien entre les chutes de blocs identifiées et les conditions climatiques externes.

4.2.12 Comparaison de nuages 3D

4.2.12.1 Méthodologie mise en œuvre sur site

Trois campagnes de mesures ont été réalisées dans la carrière de Château-Landon en 2016, 2021 et 2024. Néanmoins, le site ayant peu évolué, la comparaison n'a été effectuée qu'entre les relevés de 2016 et de 2024.

Afin d'assurer une surveillance fiable et précise, il est essentiel de comparer des nuages de points 3D obtenus dans des conditions identiques. Lors de la première campagne de 2016, 80 stations ont été implantées pour couvrir l'ensemble de la cavité, chacune repérée par un clou d'arpentage (Figure 53). Cette implantation a été respectée lors des campagnes suivantes de 2021 et 2024

Le repositionnement des stations entre deux campagnes (spatialement par rapport au clou d'arpentage mais également par rapport à la hauteur fixée du scanner) induit une erreur de positionnement et par conséquent une incertitude estimée à environ 5 cm.

Pour chaque campagne de mesure, une résolution identique a été appliquée à l'ensemble des stations afin de garantir une densité de points comparable entre les différentes périodes. La résolution retenue correspond à un point tous les 6 mm pour un repère situé à 10 m de l'appareil.

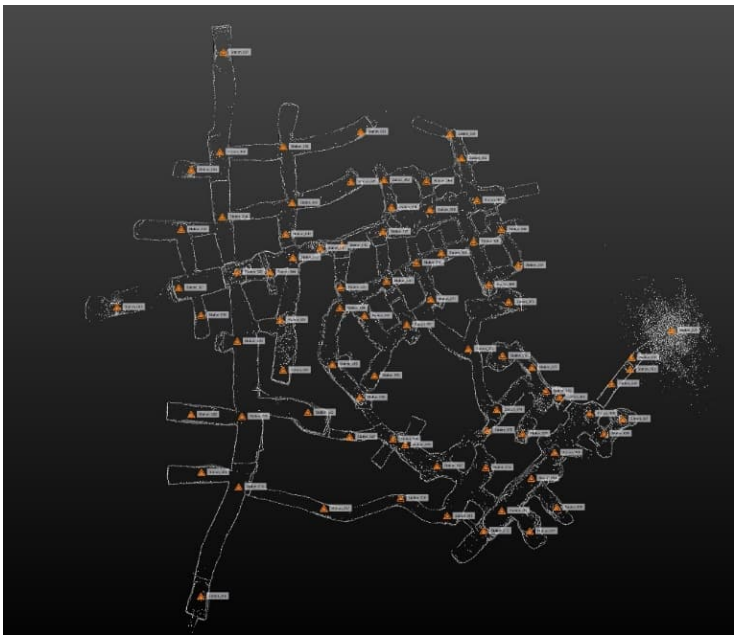


Figure 53 : Positionnement des 80 stations lors des campagnes de relevés scanner de l'observatoire de Château Landon

4.2.12.2 Traitement des données

Le traitement des données issues des campagnes de scanner laser constitue une étape essentielle pour transformer les acquisitions brutes en informations exploitables. Il repose sur deux phases principales : le prétraitement des stations (ou assemblage des stations) et la comparaison des nuages de points entre différentes périodes (Figure 54).

Lors de la première phase, les 80 stations relevées sur site ont été assemblées afin d'obtenir un nuage de points 3D unique de la carrière. Le logiciel utilisé (Trimble RealWorks) propose deux méthodes : le recalage à partir de cibles visibles par plusieurs stations, ou le recalage par nuages de points, qui consiste à superposer des zones identiques (par exemple l'angle d'un pilier). Cette seconde méthode, nécessitant un recouvrement important, a été retenue. L'erreur moyenne d'assemblage pour les différentes campagnes se situe entre 1 et 5 mm.

Pour la seconde phase les logiciels de traitement permet de comparer automatiquement deux nuages de points en calculant les distances entre chaque point. Pour cela, les nuages de 2016 et 2024 ont été assemblés comme « s'il s'agissait d'un seul », soit à partir des cibles, soit directement par recouvrement optimal des nuages. Dans cette phase, l'assemblage a généré une incertitude estimée à 5 mm.

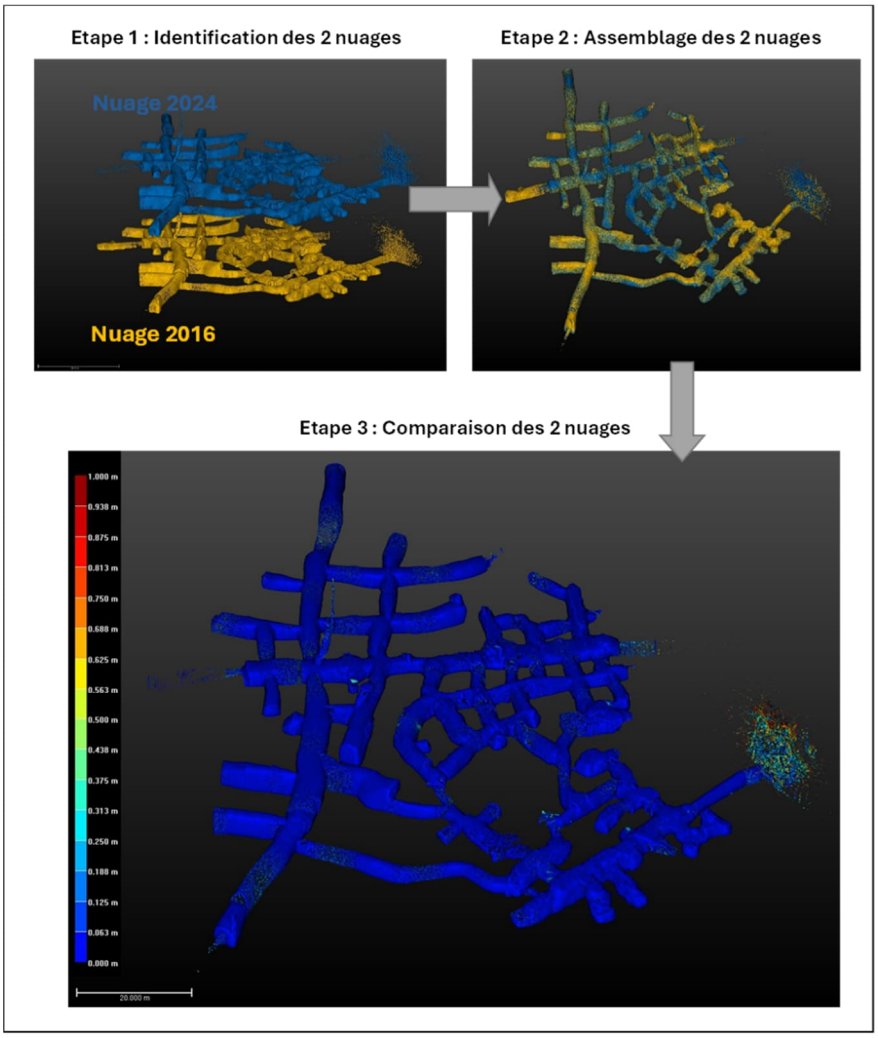


Figure 54 : Assemblage puis comparaison des nuages de points 2016 et 2024

4.2.12.3 Identification, évaluation et analyse des écarts détectés

Écart des nuages de points

L'analyse des écarts par la comparaison des nuages de points permet de distinguer les mouvements réels d'origine naturelle des écarts dits « parasites ». Le logiciel calcule automatiquement les distances entre les nuages comparés (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), ce qui fait apparaître l'ensemble d es différences. L'intervention d'un géotechnicien connaissant le site est indispensable pour interpréter ces écarts et identifier leur origine, qu'elle soit naturelle ou anthropique.

Les différentes étapes de traitement génèrent des incertitudes millimétriques qui se cumulent. Dans le cas de la carrière de Château-Landon, seuls les écarts supérieurs à 6 cm ont été retenus, les valeurs inférieures étant considérées comme liées aux incertitudes. Cette limite a été fixée en tenant compte des marges d'erreur : 1 à 5 mm pour le prétraitement, 5 mm pour l'assemblage des nuages et environ 5 cm pour le repositionnement du scanner.

Certains écarts parasites proviennent des zones d'ombre, liées à des différences de positionnement des stations entre campagnes. Une zone masquée par un obstacle lors d'un relevé peut être numérisée lors du suivant, générant artificiellement un écart lors de la comparaison.

Les écarts observés au sol sont souvent liés à des déplacements anthropiques (petits blocs déplacés par l'action humaine) et sont donc considérés comme parasites. Un écart visible uniquement au sol sans correspondance au toit ne traduit pas un mouvement naturel (Figure 55).

En revanche, les écarts identifiés au toit ou sur les parements ont plus de chances de correspondre à des mouvements naturels et sont privilégiés dans l'analyse.

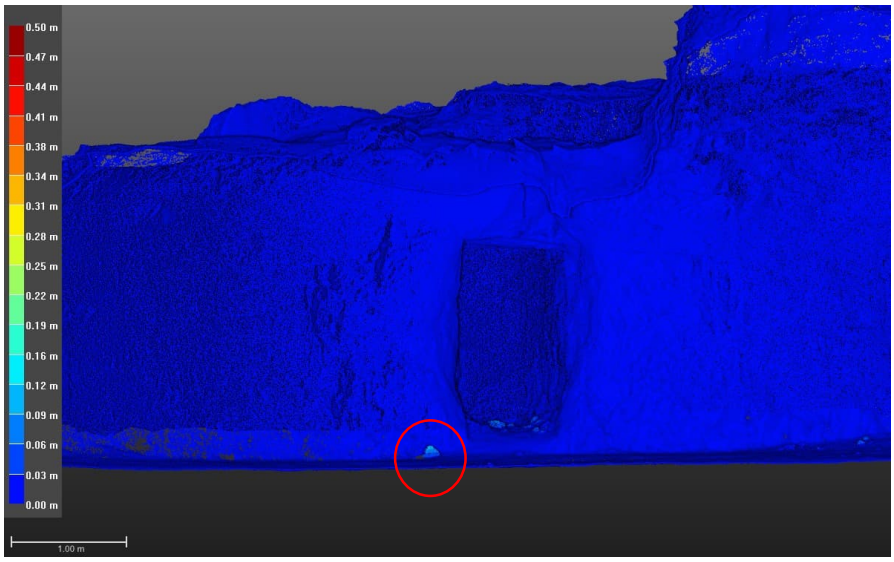


Figure 55 : Écarts *« parasites » localisés uniquement au sol*

Écart au droit des sections extensométriques

Afin de comparer ces résultats aux mesures de déplacement issues des extensomètres, deux sections ont été extraites des nuages de points acquis en 2016 et en 2025, au droit des sections instrumentées par extensomètres à fil dans les zones A et C. Pour ce faire, des profils verticaux et horizontaux ont été définis, mesurés, puis comparés entre les deux campagnes (Figure 56pour la zone A et Figure 57 pour la zone C).

Dans les deux cas, les écarts observés sont très faibles, de l'ordre de quelques cm pour la zone C et de quelques mm dans la zone A, et restent largement inférieurs à l'incertitude de mesure estimée à 5 cm, mentionnée précédemment. Néanmoins, ces résultats confirment les observations issues de l'instrumentation extensométrique et des mesures radar, le déplacement maximal mesuré au niveau du remblai étant de l'ordre de 3 cm.

Figure 56 : Section au droit des extensomètres à fils en zone A : 2016 (à gauche) et 2024 (à droite)

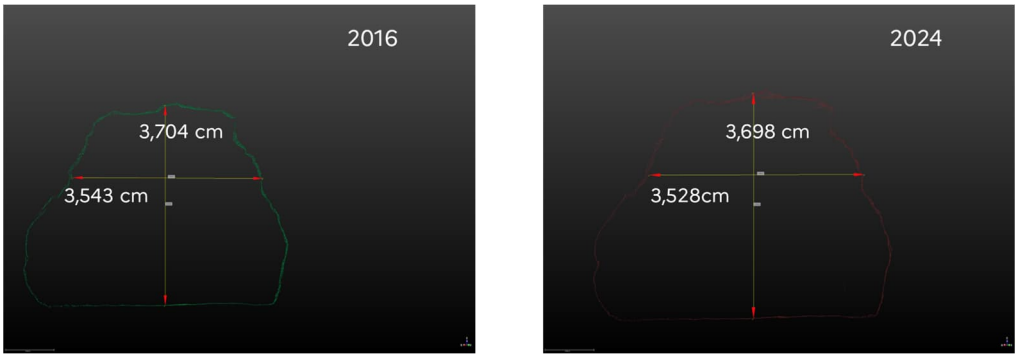


Figure 57 : Section au droit des extensomètres à fils en zone C : 2016 (à gauche) et 2024 (à droite)

L'analyse des écarts entre les nuages de points comparés a permis d'éliminer les différences parasites, ne conservant que celles traduisant une évolution réelle entre les deux périodes. Les écarts significatifs ainsi identifiés ont été qualifiés d'«anomalies». Les résultats indiquent que la carrière est restée globalement stable entre 2016 et 2024.

Une seule anomalie liée à une évolution géotechnique a été observée. Elle correspond à la chute d'une écaille de 14 cm dans une galerie, à proximité de la zone ayant connu un effondrement en 2016, après des précipitations importantes. L'emplacement initial de cette écaille sur le parement est encerclé en rouge sur la Figure 58.

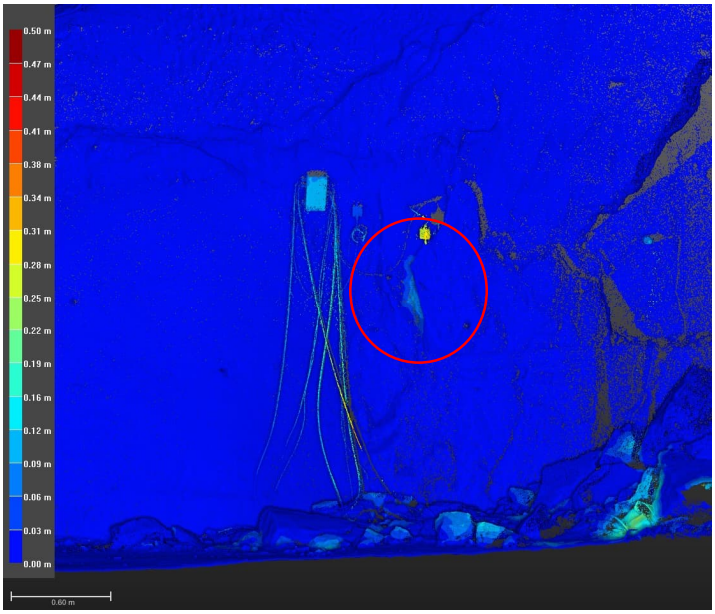


Figure 58 : Visualisation de la position initiale de l'écaille sur le parement (cercle rouge)

Les autres écarts observés ont été écartés de l'analyse, étant attribuables soit à l'installation des capteurs (absents lors de la première campagne en 2016), soit à des déplacements de blocs au sol d'origine anthropique.

Sur la base de ces observations, il est probable que les blocs détectés par le dispositif acoustique soient de taille inférieure à 6 cm, seuil minimal de détection par comparaison de scanners. La plupart de ces blocs proviennent vraisemblablement du puits débouchant en surface, sous lequel une bâche a été installée afin de visualiser toute chute de blocs (Figure 59).

Figure 59 : Bâche installée sous le puits

4.3 Analyse des corrélations par secteur (ou spatiale)

Dans ce chapitre les analyses portent sur l'ensemble des mesures collectées dans chaque zone spécifique (zones A, B 2a, B 2b, C, Figure 15). L'objectif est d'identifier la dynamique locale et les interactions entre phénomènes hydriques, mécaniques / géotechniques et climatiques au sein de chaque zone de la carrière. Cette approche a pour but tenter de relier les observations à la géométrie et aux conditions propres à chaque zone, pour avoir une compréhension plus fine des mécanismes de dégradation et de la variabilité spatiale des processus.

Rappelons que l'analyse cherche également à mettre en évidence les relations de corrélation deux à deux entre les différentes variables. En première approche, le coefficient de Pearson a été retenu pour ces investigations (cf § 4.1).

4.3.1 Zone A

Pour rappel, un pilier a été instrumenté à l'aide de capteurs destinés à mesurer simultanément les déformations, la teneur en eau et la succion, dans le but de suivre de manière continue son comportement hydromécanique. Il se situe dans la zone A. Les capteurs ont été positionnés à différentes profondeurs du pilier à 70 cm de hauteur pour les capteurs de teneur en eau et 40 cm pour les capteurs de succion, sur deux côtés du pilier. L'objectif est de capturer les variations locales et d'obtenir une vue globale de l'évolution du pilier. Un capteur de température et d'humidité permet également de suivre les variations climatiques dans la zone. L'ensemble des données collectées est analysé et discuté dans la section suivante.

Mesures des déplacements du massif

Une représentation schématique de la localisation des extensomètres est donnée en Figure 60.

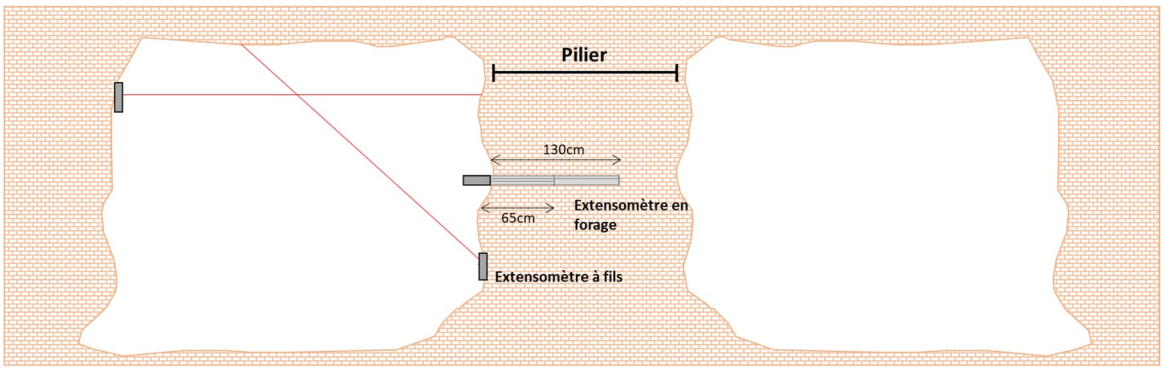


Figure 60 : Représentation schématique de la localisation des extensomètres dans la zone des petits piliers – Zone A

Les mesures enregistrées depuis l'installation des extensomètres dans la zone des petits piliers montrent des variations très faibles, bien inférieures à la précision du capteur (0,15 mm), qui traduit une absence de déformation significative des piliers. Cette constance suggère que les conditions de chargement n'ont pas évolué de manière notable.

Des analyses entre le niveau de la nappe dans le piézomètre SD2 et les mesures corrigées des quatre extensomètres ont néanmoins été réalisées, elles montrent l'existence de corrélations positives et statistiquement significatives. Les coefficients de corrélation de Pearson varient de 0.175 à 0.265, avec des p-values[5] très faibles (inférieures à 0.001), confirmant que les relations observées ne sont pas dues au hasard. Les décalages optimaux, compris entre 181 et 192 jours, indiquent un effet retard d'environ six mois entre les fluctuations du niveau de la nappe et les déformations mesurées. Ce décalage temporel traduit la réponse différée du massif à la propagation progressive des pressions interstitielles

[5] P-value : la p-value ou p-valeur ou probabilité critique, est la probabilité pour un modèle statistique donné sous l'hypothèse nulle d'obtenir une valeur au moins aussi extrême que celle observée. Une valeur très faible, classiquement inférieure à 0,005, indique que le résultat est statistiquement significatif et qu'il est très peu probable qu'il soit dû au hasard seul.

dans le massif. La Figure 61 illustre la réponse différenciée des extensomètres aux variations du niveau de la nappe, avec un effet retard d'environ 6 mois. L'extensomètre en forage à 65 cm présente la corrélation la plus forte (r = 0.265), suggérant une sensibilité plus marquée de l'extérieur du pilier aux variations du niveau d'eau. À 130 cm la corrélation est plus faible (r = 0.175), indiquant que les effets de la nappe sont atténués en profondeur. Les extensomètres à fil, installés sur la paroi et la voûte, présentent des comportements similaires (r ≈ 0.24), révélant une déformation plus homogène de la structure. L'augmentation du niveau de la nappe va induire une réduction des contraintes effectives et ainsi créer des relâchements de contraintes dans le massif. Enfin les différences de sensibilité entre les types de capteur s'expliquent principalement par leur position et leur profondeur d'ancrage. Les capteurs en forage traduisent des variations locales, tandis que les capteurs à fil reflètent davantage une réponse globale du massif instrumenté.

Rappelons toutefois que les déplacements enregistrés sont extrêmement faibles, inférieurs à 0.05 mm, soit largement en dessous de la précision des capteurs estimée à 0.15 mm. Cela signifie que, bien que les corrélations soient statistiquement robustes, les amplitudes mesurées sont négligeables du point de vue mécanique. Le battement de la nappe influence la tendance des mesures, mais sans générer de déformations significatives dans la zone instrumentée.

Ainsi dans la zone A le massif se trouve dans un état d'équilibre stable avec un très lent mécanisme d'écrasement (comme celui accompagnant le fluage d'un matériau) mais sans signe susceptible de compromettre la stabilité à court terme.

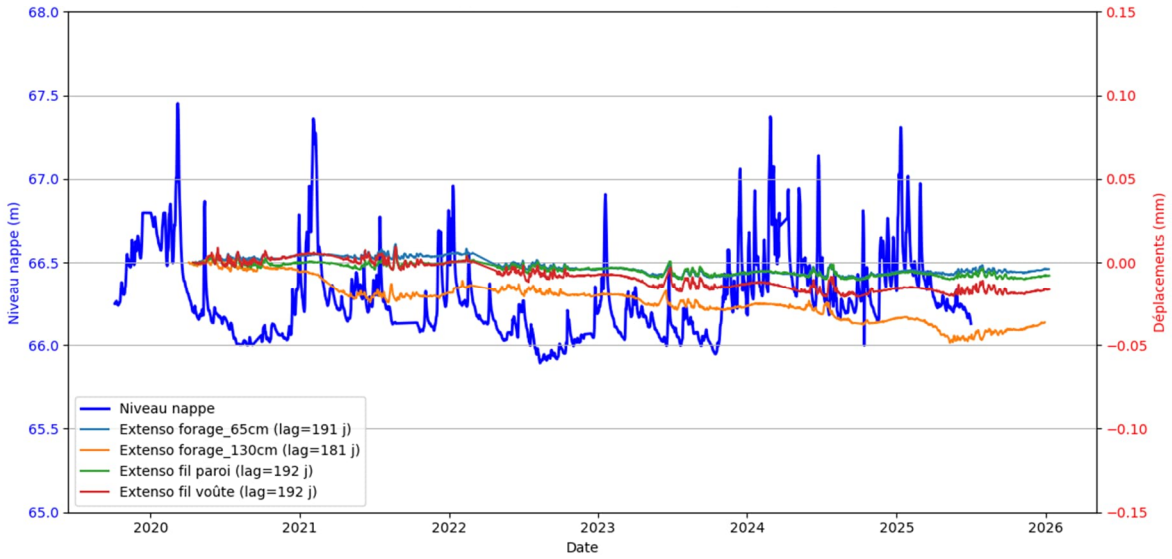


Figure 61 : Comparaison du niveau de la nappe alluviale (SD2) et des déplacements extensométriques avec leurs décalages temporels optimaux

Mesures de teneur en eau volumique et de succion

Les mesures de teneur en eau volumique sont présentées sur la Figure 62 depuis juin 2021. Date à laquelle les capteurs en profondeur ont été mis en place.

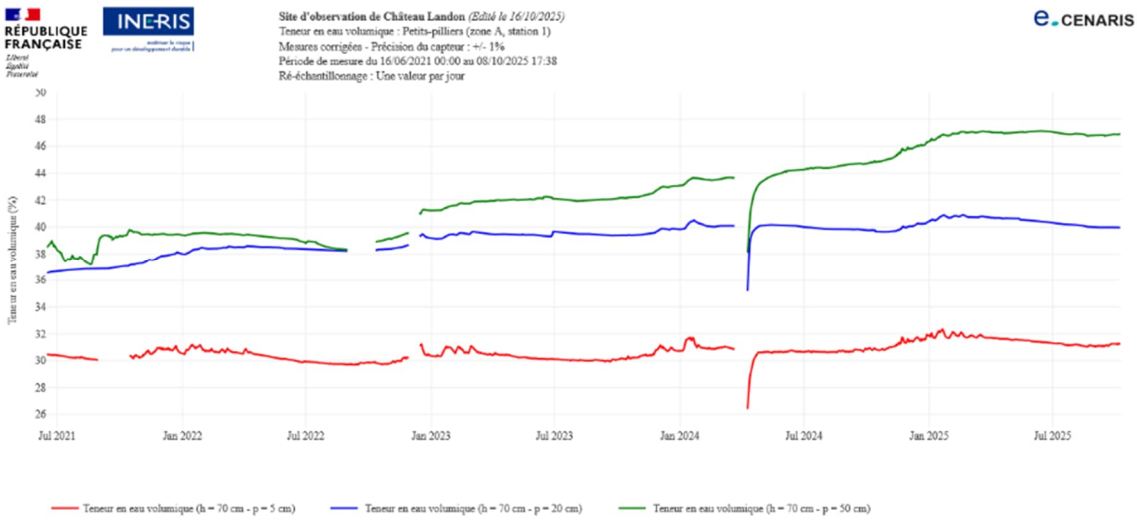


Figure 62 : Mesures de teneur en eau dans le pilier de la zone des petits piliers – Zone A

Comme indiqué précédemment les mesures de teneur en eau volumique ont été installées à la même hauteur à différentes distances horizontales de la paroi du pilier (5 cm, 20 cm et 50 cm) ce qui permet d'analyser les mécanismes de transfert d'eau en l'absence de gradient vertical.

Une analyse de corrélation de Pearson a été réalisée pour évaluer la relation linéaire entre le niveau de la nappe SD2 et les teneurs en eau. Les résultats montrent une corrélation positive modérée entre ces deux variables. La corrélation la plus importante est avec la teneur en eau à 5 cm (r=0,47). Dans les trois cas la p_value est inférieure à 0.005 indiquant que ces corrélations sont statistiquement significatives. L'intensité modérée suggère que d'autres facteurs, comme par exemple, les propriétés locales de la craie (comme la perméabilité ou la porosité), peuvent jouer également un rôle.

Une autre observation intéressante est que le capteur en périphérie du pilier réagit plus rapidement aux variations du niveau de la nappe que celui à 50 cm. Ainsi on montre qu'il faut 9 jours à la teneur en eau à 5 cm de profondeur pour réagir à une variation du niveau de la nappe alors qu'il faut respectivement 20 jours et 50 jours pour les capteurs situés à 20 et 50 cm.

La Figure 63 montre les résultats de l'analyse de corrélation croisée normalisée [6] entre le niveau de la nappe SD2 et la teneur en eau à 5 cm, elle met en évidence un décalage temporel maximal de 9 jours, pour lequel la corrélation atteint 0,52. Ce qui est cohérent avec les analyses de corrélation de Pearson.

[6] La corrélation croisée est une opération mathématique qui mesure la similarité entre deux signaux (ou deux séries de données) en fonction d'un décalage temporel appliqué à l'un d'eux.

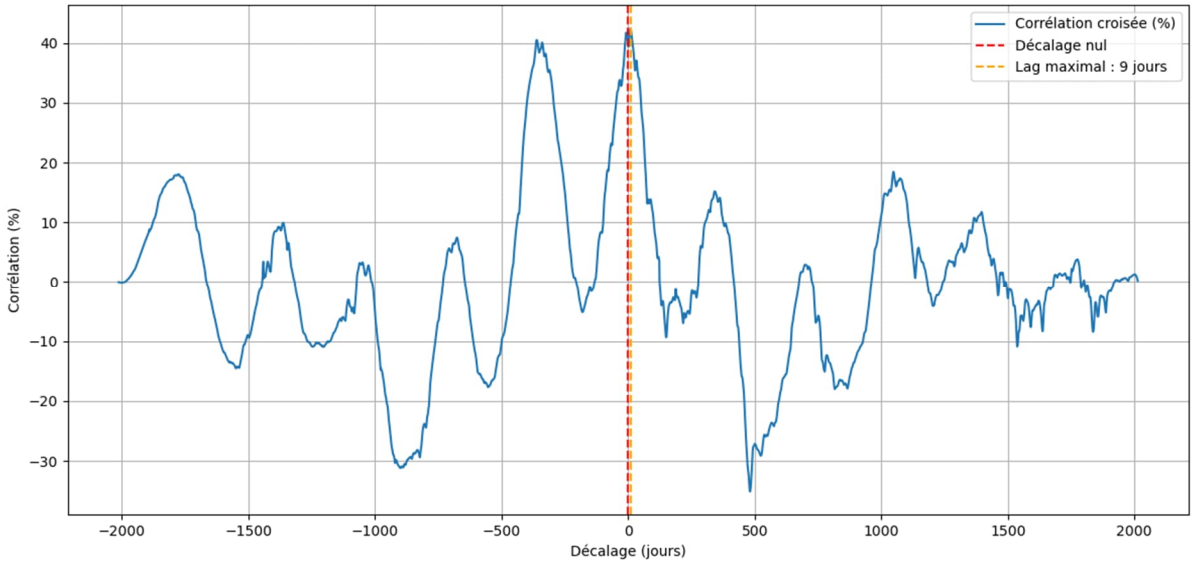


Figure 63 : Corrélation croisée normalisée entre le niveau de la nappe SD2 et la teneur en eau à 5 cm

Le même exercice a été réalisé avec l'humidité relative, les analyses de corrélation croisée montrent des décalages temporels significatifs. À 5 cm de profondeur, le lag maximal est de 138 jours avec une corrélation positive modérée (r = 0,32). Toutefois, la corrélation instantanée à lag = 0 est négative (r = -0,39). Cette relation inverse doit être interprétée avec prudence, car le capteur d'humidité relative utilisé présente une précision limitée, ce qui peut introduire des biais dans la mesure et expliquer en partie cette corrélation négative. À 20 cm, la corrélation instantanée est quasi nulle (r = 0,05), mais la corrélation croisée atteint un maximum à 95 jours (r = 0,37), ce qui suggère une réponse retardée plus nette. À 50 cm, la corrélation instantanée reste faible (r = 0,08) et la corrélation croisée maximale est observée à 96 jours (r = 0,22). Globalement, ces résultats indiquent que la dynamique des teneurs en eau volumiques est dépendante de la profondeur. Enfin, aucune corrélation significative avec les précipitations n'a pu être mise en évidence.

L'analyse des mesures de succion confirme ces résultats. Sur la Figure 64 qui présente les succions à différentes profondeurs dans le pilier 11 cm, 33 cm et 51 cm on observe que la succion est moins élevée à 11 cm qu'à 50 cm de profondeur dans le pilier. La succion est la capacité d'un matériau poreux à retenir l'eau par des forces capillaires, elle joue un rôle central dans la cinétique de l'eau dans un pilier. C'est la capillarité qui permet à l'eau de remonter depuis la nappe vers le pilier. La hauteur de cette remontée dépend de la taille des pores et de l'intensité de la succion. Dans les milieux non saturés, la succion est d'autant plus élevée que le matériau est sec. Ainsi, la périphérie du pilier, plus exposée à des conditions ambiantes (ventilation de la galerie, humidité de la galerie), présente une succion plus élevée que le centre dont la succion est plus faible et qui est potentiellement plus contraint. Ce gradient de succion va influencer directement les mouvements d'eau dans le massif.

Une autre observation est que les données de teneur en eau montrent une augmentation marquée au cours des deux dernières années (2023-2025). Cette tendance coïncide avec une hausse du niveau de la nappe SD2. Par ailleurs, les mesures indiquent une teneur en eau volumique à 50 cm dépassant la porosité théorique de la craie, ce qui suggère une sursaturation apparente. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène, notamment des erreurs de mesure (calibration des capteurs, condensation), la présence d'eau libre dans des micro-fissures ou des cavités, ou une hétérogénéité locale de la porosité de la craie. Une analyse plus poussée de la structure du pilier (par exemple, par carottage ou imagerie) seraient nécessaires pour confirmer ces hypothèses.

Malgré l'augmentation de la teneur en eau observée au cours des deux dernières années, aucune diminution nette de la succion n'a été enregistrée. Ce comportement peut résulter de plusieurs facteurs. D'une part, l'hétérogénéité de la craie qui pourrait conduire à une teneur en eau plus élevée localement sans modifier significativement la succion à l'échelle du capteur. D'autre part, une succion résiduelle peut persister si l'eau reste confinée dans des micro-pores, sans saturation complète du matériau. Enfin, les conditions de mesure elles-mêmes peuvent influer sur les résultats, en raison d'un positionnement des capteurs dans des zones moins saturées. Enfin rappelons que les capteurs de succion sont vraiment à la limite de leur précision, les variations sont peut-être trop faibles pour être captées.

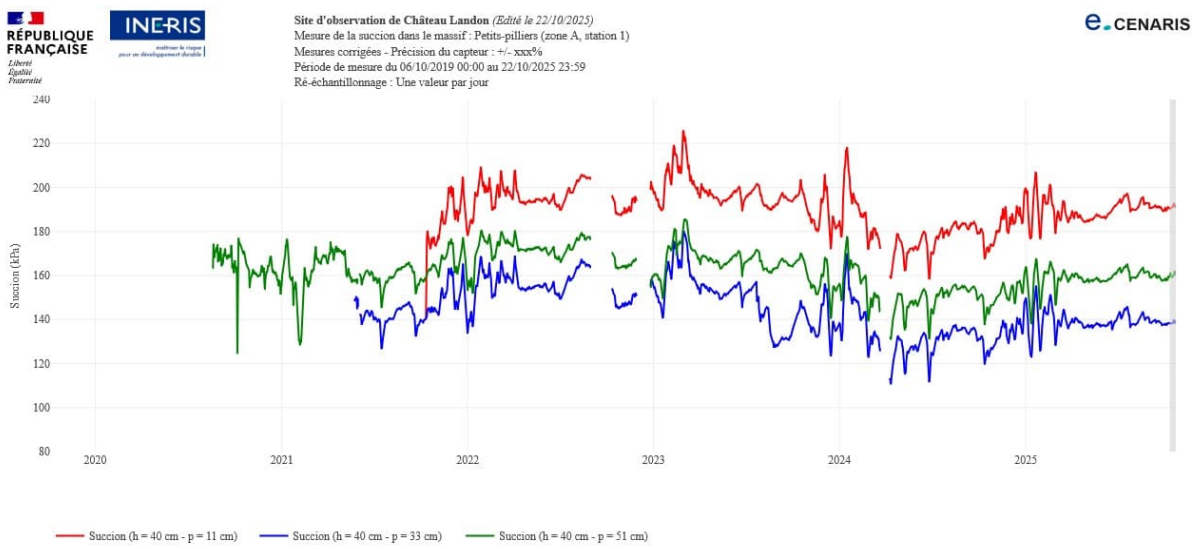


Figure 64 : Mesures de succions dans le pilier de la Zone A

Pour mieux quantifier l'influence des conditions ambiantes de la galerie sur la dynamique de l'eau, des analyses préliminaires de corrélation croisée entre l'humidité relative de l'air dans la zone A et la teneur en eau ont été réalisés, les résultats sont peu concluants, la corrélation est très faible (0,22) avec un important décalage (166 jours).

Le principal mécanisme à l'origine des variations de la teneur en eau est donc de nature capillaire.

4.3.2 Zone B

La zone B est divisée en deux parties : la zone dite du plan de faille (2a) et une deuxième zone, appelée 2b sur la Figure 15.

<u>Zone B 2a</u>

Dans la zone 2a, un capteur de teneur en eau et un capteur de succion ont été installés en paroi de galerie, à l'emplacement où un éboulement de plusieurs mètres cubes s'est produit en 2016 (Figure 65). Face à cette paroi, un radar permet de suivre ses déplacements ainsi qu'un extensomètre à fils par ailleurs un extensomètre en forage est également positionné depuis la galerie parallèle. Une représentation schématique des mesures de déformation est présentée à la Figure 66. Un capteur de température et d'humidité permet également de suivre les variations climatiques dans la zone. Comme pour la Zone A l'ensemble des données collectées a été analysé.

Figure 65 : Exemple de capteurs de température, de teneur en eau et de succion (de gauche à droite) en Zone B – 2a

Mesures de déformation du massif

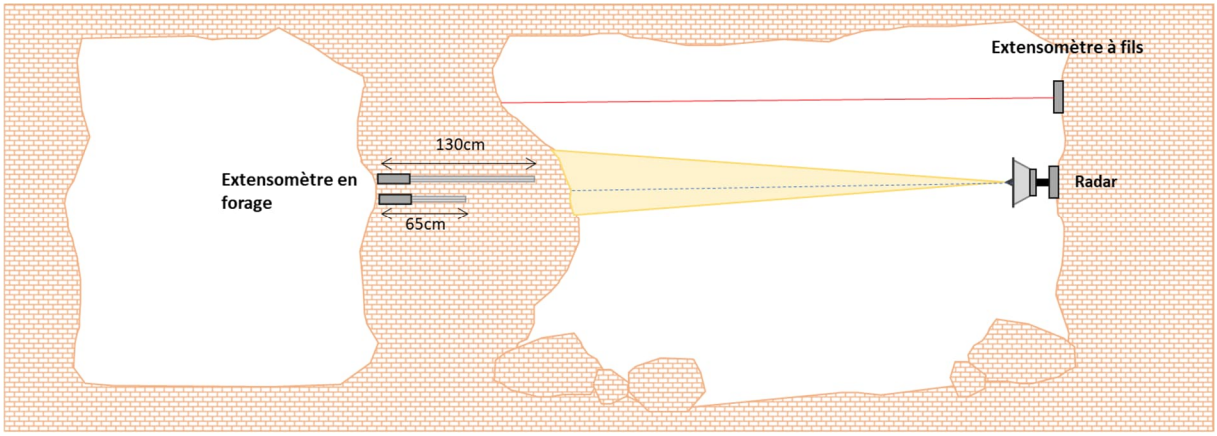


Figure 66 : Représentation schématique de la localisation des mesures de déplacements dans la zone B – Zone 2 a

Concernant les mesures extensométriques les mêmes observations que dans la zone A sont faites, une fois la correction en température effectuée. L'ensemble des mesures est proche de zéro, indiquant une stabilité mécanique du massif sur la période considérée.

Les analyses statistiques ne montrent pas de corrélation significative entre les variations du niveau d'eau et les déplacements enregistrés par le radar, ni sur l'ensemble de la période d'observation, ni lors des phases de recharge. Au regard des incertitudes associées aux mesures, telles que décrites au paragraphe 3.3, l'absence de corrélation ne permet pas de conclure à l'existence d'un lien direct entre ces variables.

Mesures de teneur en eau volumique

Le capteur de teneur en eau est installé à 5 cm de profondeur dans la paroi. Depuis son installation, la teneur en eau volumique présente une augmentation continue, passant de 19 % à 26 % (Figure 67). Comme dans la zone A, le massif demeure partiellement désaturé en paroi, au regard de la porosité totale mesurée sur échantillon (Pajiep et al., 2025 ; La France, 2016), estimée à 44 %. En revanche si on estime que la porosité est homogène dans les deux zones, il semble que la périphérie du massif est plus désaturé que dans la zone A.

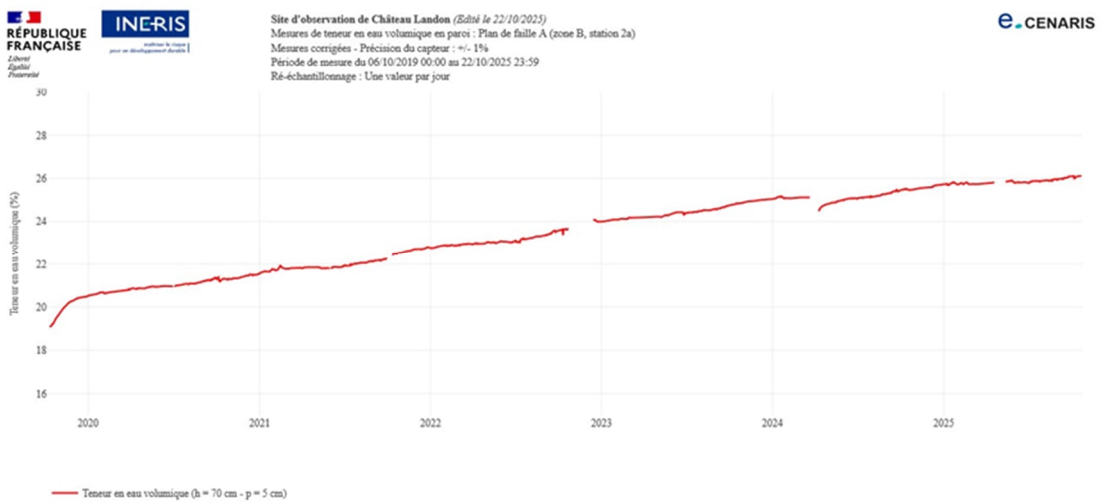


Figure 67 : Teneur en eau volumique à 5 cm de profondeur dans Zone B - 2a

Dans la zone B 2a, la teneur en eau volumique mesurée à 5 cm de profondeur présente une corrélation nettement plus forte avec l'humidité relative qu'avec le niveau de la nappe phréatique SD2. La corrélation maximale avec l'humidité relative atteint 0,71, avec un décalage temporel de 4 jours, tandis que la corrélation avec le niveau de la nappe demeure faible (0,22) et ne se manifeste qu'après un décalage très important de 283 jours. Ces résultats sont cohérents avec les analyses de corrélation croisée présentées au paragraphe 4.2.4, lesquelles indiquent que la teneur en eau à 5 cm de profondeur dans la zone B 2a n'est pas corrélée avec celle observée dans la zone A (corrélation = 0,18). Ainsi, contrairement à la zone A, ces observations confirment que la dynamique hydrique de la paroi dans la zone B 2a est indépendante de l'apport direct de la nappe phréatique et reflète principalement les variations d'humidité locale.

L'influence de la température dans la zone a également été regardée. Elle présente une corrélation modérée avec la teneur en eau à 5 cm ($r \approx 0.42$), avec un décalage d'environ 29 jours, indiquant que la teneur en eau réagit progressivement aux changements de température. Les variations saisonnières typiques entraînent de petites fluctuations de l'humidité (±0.8 %), tandis que la différence moyenne entre périodes les plus froides et les plus chaudes peut atteindre ±2.0 %. Ainsi comme l'illustre la Figure 68, la teneur en eau moyenne tend à croître légèrement avec la température, passant d'environ 22.5 % pour la classe « Froid » (8.8 °C à 10.5 °C) à près de 25 % pour la classe « Chaud » (12.1 °C à 14.8 °C). Précisons que les variations de teneur en eau observées ne proviennent probablement pas d'un effet thermique direct sur la rétention d'eau du matériau, mais d'un effet indirect de la température sur l'humidité relative ambiante, qui modifie à son tour les flux d'eau dans la zone superficielle du massif.

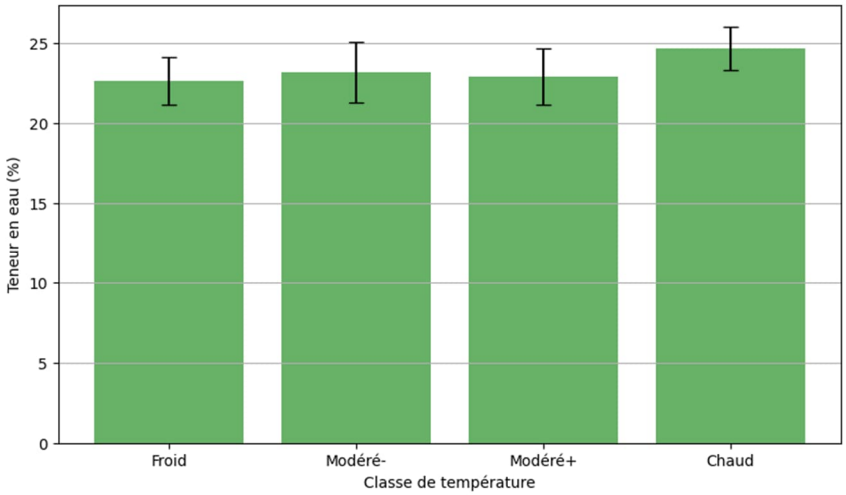


Figure 68 : Teneur en eau volumique moyenne à 5 cm dans le massif en Zone B 2a

<u>Zone B 2b</u>

Mesures de teneur en eau volumique et de succion

Les deux capteurs de teneurs en eau de la zone B 2b se situent respectivement à une hauteur de 30 cm et une profondeur de 5 cm et à une hauteur de 70 cm et une profondeur de 31 cm. Les données acquises depuis l'installation des capteurs sont présentées sur la Figure 69.

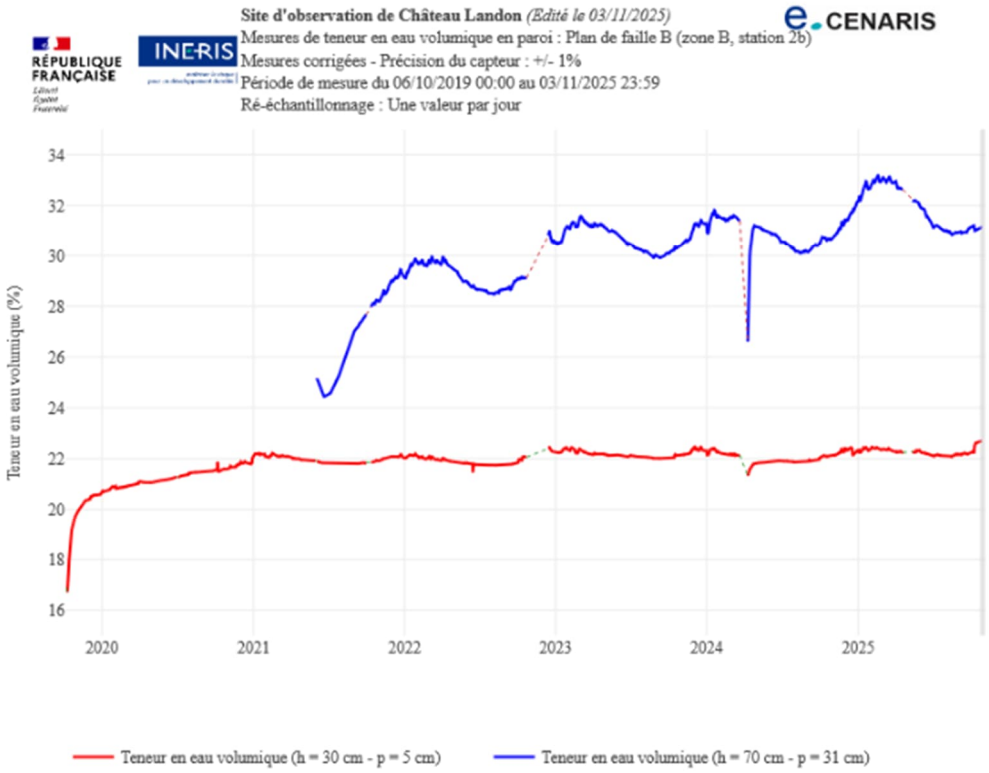


Figure 69 : Teneurs en eau à 5 cm et 30 cm de profondeur dans Zone B : zone 2a

Les résultats mettent en évidence des comportements différenciés selon la position des capteurs dans le massif.

À 5 cm de la paroi, la corrélation instantanée entre la teneur en eau et l'humidité relative (HR) est faible mais statistiquement significative ($r = 0{,}162$, $p = 1{,}09\times10^{-13}$). La corrélation croisée atteint un maximum de 0,46 après 167 jours, traduisant une réponse différée de la zone proche de la paroi aux variations

d'humidité atmosphérique. En revanche, la corrélation avec le niveau de nappe SD2 reste faible (r = –0,070, p = $1{,}69\times10^{-3}$) et n'atteint qu'un maximum modeste de 0,19 après 317 jours, ce qui indique une influence limitée du niveau de nappe sur cette zone. La zone B étant légèrement plus haute que l'entrée de la carrière (1 à 2 m), celle-ci est plus éloignée de la nappe que la zone A qui est plus proche de l'entrée, ce qui peut expliquer ainsi l'influence moindre de la nappe dans cette zone.

À 31 cm dans le massif, les liens sont plus marqués. La corrélation instantanée avec l'humidité relative est de r = 0,240 (p = $7{,}6\times10^{-21}$) et atteint 0,53 après un décalage de 130 jours, traduisant une réponse plus lente et amortie à l'humidité de l'air. La corrélation avec le niveau de nappe est plus forte (r = 0,302, p = $1{,}33\times10^{-30}$) avec un maximum de 0,46 après 318 jours, suggérant une influence progressive de la nappe à cette distance de la paroi. Cependant, après application des décalages optimaux, les corrélations de Pearson redeviennent faibles (r ≈ 0), ce qui montre que la dynamique observée ne peut être décrite par une simple relation linéaire avec retard.

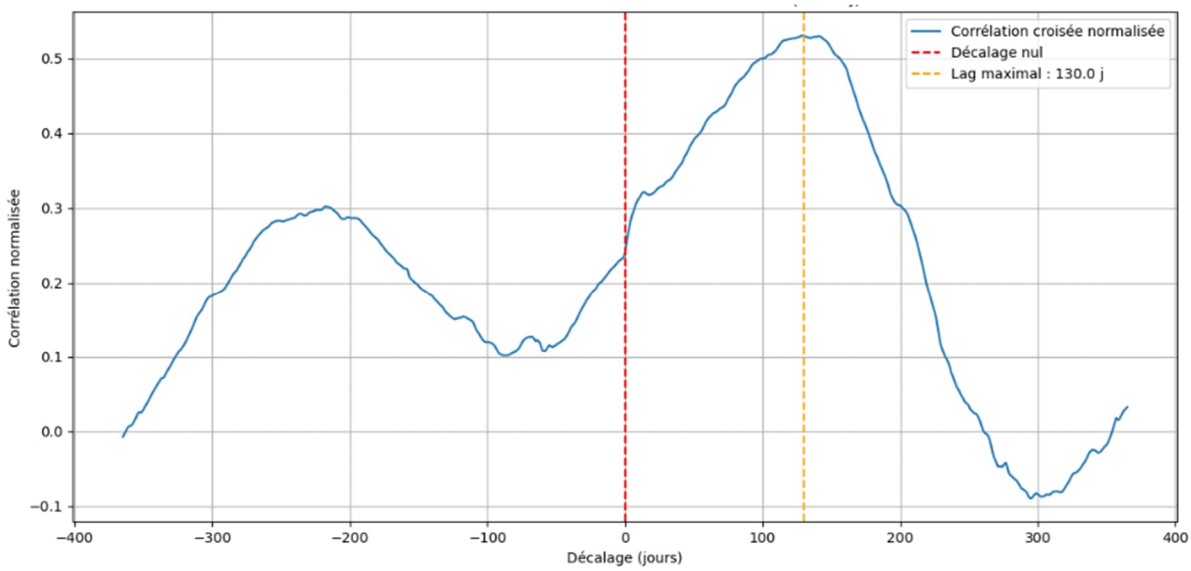


Figure 70 : Corrélation croisée normalisée entre l'humidité relative de la zone B 2b et la teneur en eau à 31 cm, avec un décalage maximal de 130 jours (ligne jaune) et un décalage nul (ligne rouge)

Dans l'ensemble, ces résultats indiquent une variation latérale dans la réponse hydrique du massif : la zone proche de la paroi réagit plus directement aux variations d'humidité atmosphérique, tandis que la zone située à 30 cm dans le massif présente une réponse plus amortie et davantage influencée, à long terme, par les fluctuations du niveau de nappe.

L'influence de la température dans la galerie a également été étudiée. Les résultats mettent en évidence une relation nette entre la température dans la galerie et la teneur en eau du massif, avec des comportements différenciés selon la distance à la paroi.

À 5 cm de la paroi, la corrélation instantanée entre la teneur en eau et la température est faible et négative (r = –0,064, p = $3{,}6\times10^{-3}$), indiquant qu'une hausse de température tend à s'accompagner d'une légère baisse de teneur en eau, en lien probable avec les échanges hygroscopiques rapides entre l'air et la surface du massif. La corrélation croisée atteint un maximum de 0,30 après un décalage de 168 jours, ce qui suggère une réponse retardée mais limitée de la zone proche de la paroi aux variations thermiques. Après application du décalage optimal, la corrélation de Pearson reste modeste (r = 0,122, p = $2{,}27\times10^{-8}$), confirmant une influence secondaire mais réelle de la température sur la teneur en eau superficielle. À 30 cm dans le massif, la relation est plus marquée. La corrélation instantanée est fortement négative (r = –0,307, p = $1{,}09\times10^{-33}$), montrant qu'une élévation de la température s'accompagne d'une diminution notable de la teneur en eau, reflet d'un assèchement progressif du massif. La corrélation croisée présente un maximum de 0,62 après un décalage de 162 jours, traduisant une inertie thermique et hydrique importante : la réponse du massif à l'évolution des conditions de température est lente et amortie. Après application du décalage optimal, la corrélation de Pearson demeure modérée mais significative (r = 0,211, p = $2{,}66\times10^{-16}$), indiquant qu'une part substantielle de la variabilité hydrique à cette distance de la paroi reste liée aux fluctuations thermiques.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la température exerce une influence croissante avec la profondeur dans le massif : la zone proche de la paroi réagit rapidement mais faiblement, tandis que la zone située à 30 cm manifeste une réponse plus retardée et plus marquée (Figure 71). Cette évolution traduit probablement une combinaison d'effets thermiques et hydriques : évaporation et condensation en surface, diffusion lente de la chaleur et redistribution progressive de l'eau dans le massif.

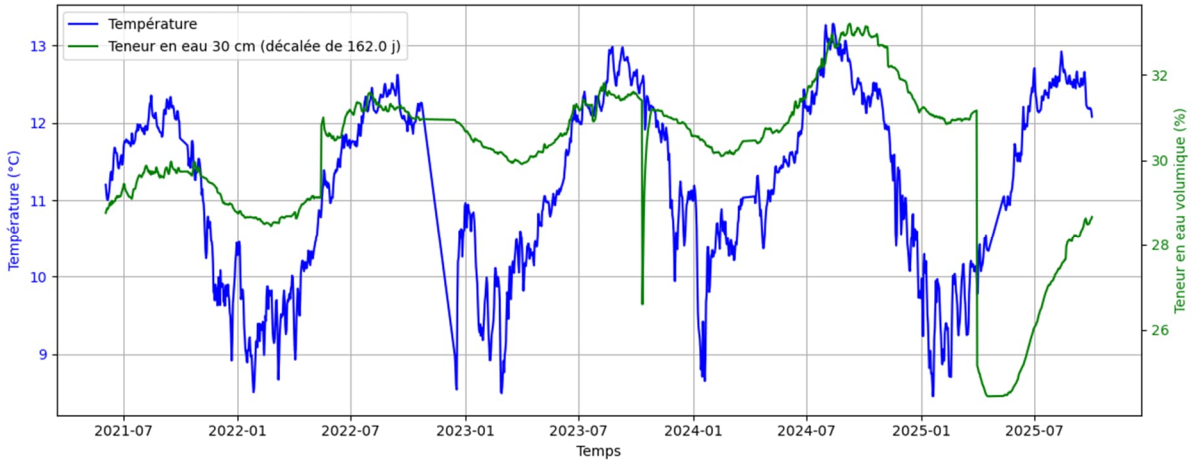


Figure 71 : Superposition temporelle de la température et de la teneur en eau à 30 cm de profondeur dans le massif

L'analyse des mesures de succion (Figure 72) confirme l'influence de la température observée sur la teneur en eau à 30 cm de profondeur. Les mesures in situ montrent que la succion et la teneur en eau suivent une relation inverse : une augmentation de la température conduit à une augmentation de la succion dans le massif. La corrélation instantanée montre une relation fortement négative (r = -0.931) entre température et succion, tandis qu'après un retard de 162 jours (Figure 72), la relation devient positive (r = 0.705). Cela confirme que les succions augmentent lorsque la teneur en eau diminue, avec un effet retardé lié à l'inertie thermique du massif.

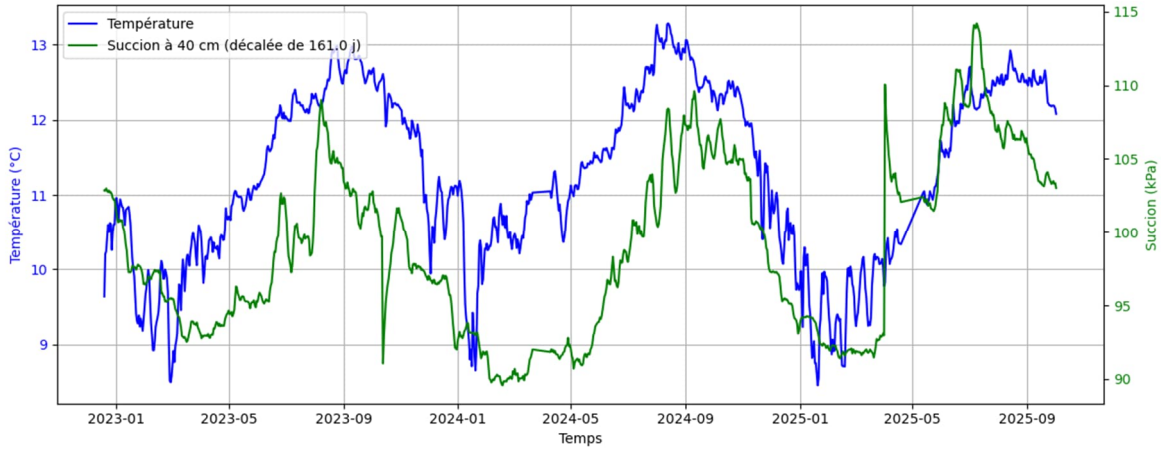


Figure 72 : Superposition temporelle de la température et de la succion à 40 cm de profondeur dans le massif

La comparaison entre le niveau de la nappe et la succion à 40 cm montre une relation inverse forte, mais avec un effet retardé d'environ 160 jours. Enfin on observe une corrélation inverse modérée est observée avec l'humidité relative dans la zone.

Évolution de la fissure

La fermeture de la fissure est immédiatement influencée par l'humidité relative dans la carrière (r = -0,62) (Figure 73) : plus l'humidité est faible, plus la fissure se ferme. Il n'existe pas de retard temporel détectable, donc l'effet de l'humidité est quasiment instantané sur la fissure. En revanche la corrélation entre les battements de la nappe et le déplacement des lèvres corrigé est plus modérée (r = 0,25) mais significative, l'introduction d'un décalage ne l'améliore pas, indiquant qu'aucun temps de réponse retardé du système n'est identifiable.

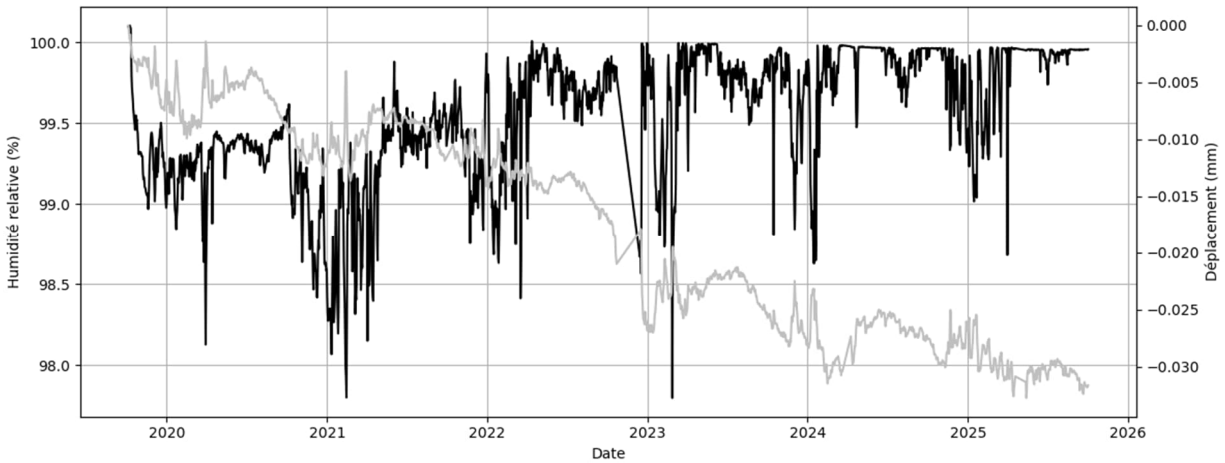


Figure 73 : Superposition temporelle de l'humidité relative et du déplacement (corrigé thermiquement) de la fracture dans la zone B-2b

4.3.3 Zone C

Dans la zone C, quatre capteurs de teneur en eau ont été installés : trois en paroi de la galerie et un dans le remblai. Un capteur de succion est également présent, mais ses mesures ne sont pas exploitables, probablement en raison d'une entrée d'air dans le forage.

Un radar permet de suivre les déplacements du remblai. Un extensomètre en forage mesure les déplacements à 65 cm et 130 cm de profondeur. Deux extensomètres à fils permettent de suivre les mouvements de la voûte et de la paroi. Une représentation schématique de la localisation des mesures de déformation dans la zone est présentée à la Figure 74.

Enfin, un capteur de température et d'humidité relative permet de suivre les variations climatiques dans la zone.

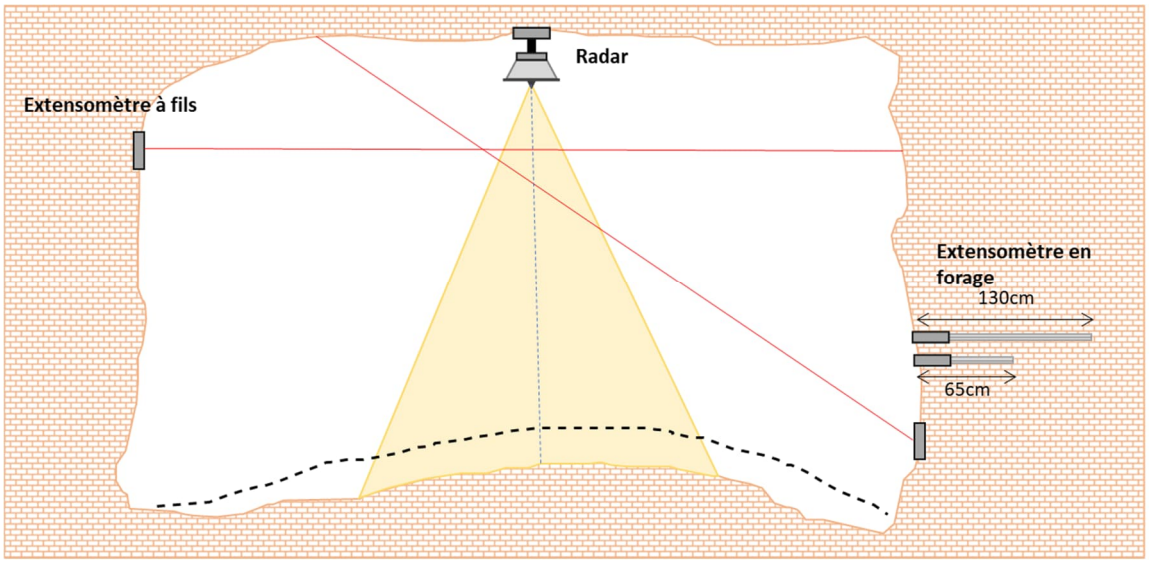


Figure 74 : Représentation schématiques de la localisation des extensomètres et de la mesure au radar dans la zone témoin – Zone C

Mesures de déplacements du massif

L'ensemble des mesures enregistrées depuis l'installation des extensomètres montrent que les déplacements observés sont faibles et inférieurs à la précision du capteur (0,15 mm). Après correction des fluctuations saisonnières, les valeurs restent faibles, mais des fluctuations persistent sur les courbes (Figure 75). L'analyse des relations avec les niveaux de nappe en SD2 et SD1 montre que le massif réagit différemment selon la profondeur et la position des capteurs. Les corrélations, modérées (0,2–0,45), varient selon le capteur et le piézomètre. La réponse est plus rapide pour SD2, proche de la carrière, que pour SD1, en amont. Certains déplacements se produisent avant toute variation du niveau de nappe, ce qui indique que ces mouvements sont probablement liés à des phénomènes locaux ou mécaniques, indépendants de la nappe.

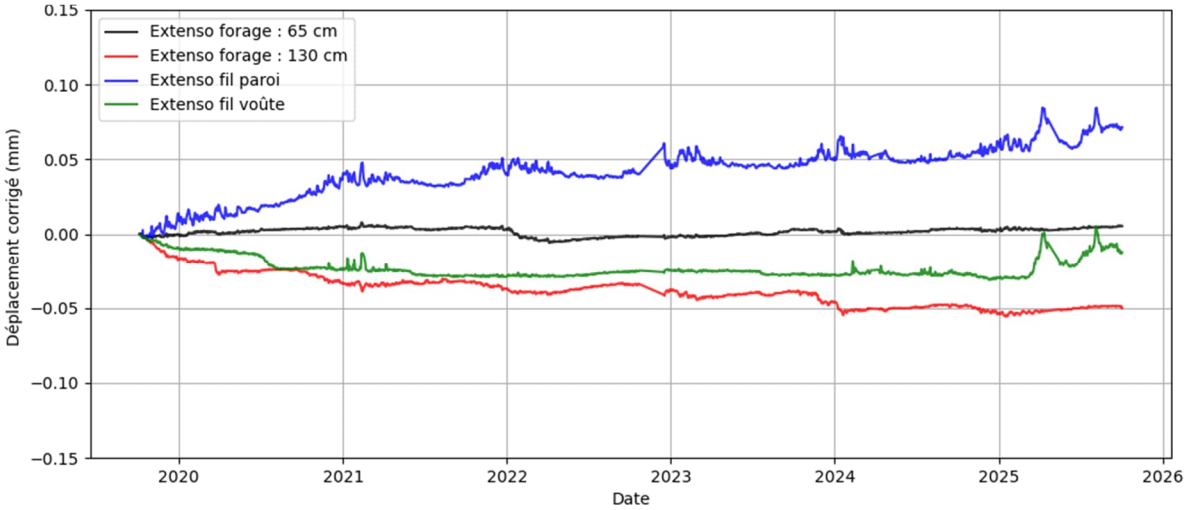


Figure 75 : Mesures de déplacements extensométriques après corrections avec la température dans la zone C

Déplacements radar

Les déplacements mesurés au radar ont été ventilés par saison, ils sont présentés en Figure 76. Le graphique présenté illustre ces déplacements exprimés en millimètres, selon quatre périodes saisonnières : hiver, printemps, été et automne. Les déplacements moyens interannuels varient fortement d'une année à l'autre. De 2019 à 2021, ils sont globalement négatifs. L'année 2022 marque une rupture avec des déplacements positifs toutes saisons confondues. En 2023-2024, le gonflement du remblai reprend, atteignant en 2024 les valeurs négatives les plus fortes de la série.

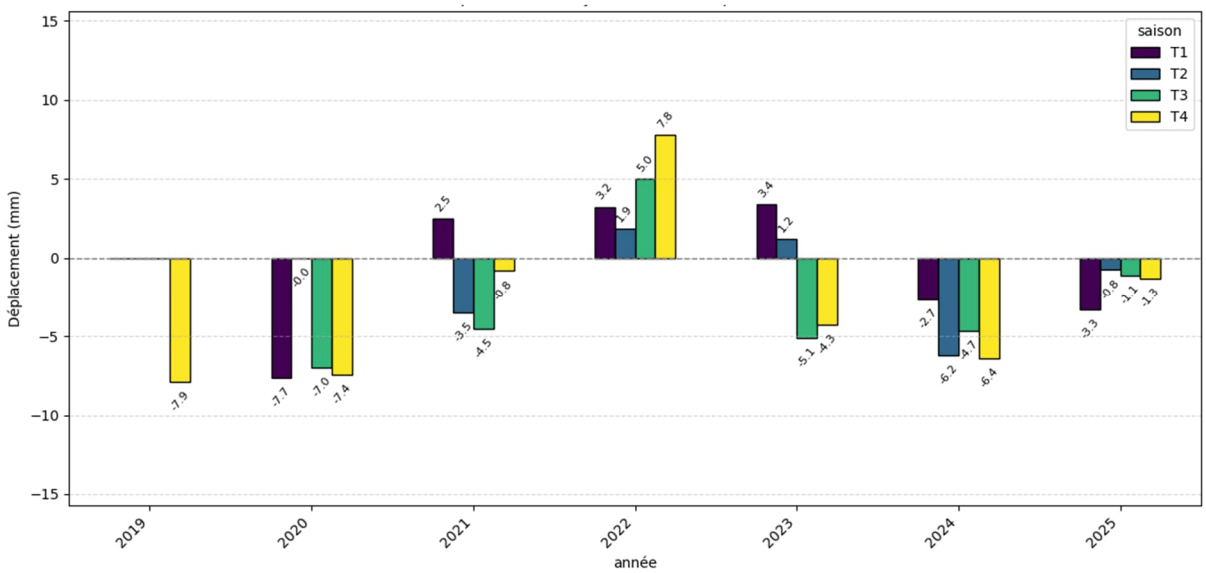


Figure 76 : Déplacements moyens interannuels par saison mesurés en zone C au radar

Les résultats obtenus sont cohérents avec une réponse du massif aux variations de pression interstitielle dues au battement de la nappe. Des années singulières confirment cette tendance : 2022, à faible battement de nappe, présente des déplacements positifs et/ou faibles ; 2024, où les niveaux sont les plus hauts enregistre des gonflements marqués et prolongés (Figure 31).

Les corrélations croisées entre les déplacements mesurés au radar et le niveau de la nappe en SD2 viennent corroborer les observations faites précédemment, avec un lag maximal de 60 jours montrant une corrélation négative modérée (-0,25), indiquant que les mouvements sont légèrement retardés par rapport aux variations du niveau de la nappe. Par ailleurs ils soulignent également la nécessité de disposer de mesures piézométriques représentatives de la zone étudiée pour affiner les analyses et mieux comprendre les mécanismes en jeu.

Mesures de teneur en eau volumique et de succion

Les teneurs en eau mesurées dans le massif à différentes profondeurs sont présentées sur la Figure 77. En Figure 78 on trouve celle mesurée dans le remblai à14 cm.

Les analyses de corrélation mettent en évidence une relation significative entre le niveau de la nappe SD2 et les teneurs en eau volumiques à différentes profondeurs. En surface (5 cm), la corrélation instantanée est positive et modérée (r = 0,38), avec un décalage optimal de 50 jours (r = 0,50), traduisant une réponse relativement rapide du massif aux variations de la nappe. À 33 cm, la corrélation instantanée reste positive (r = 0,32), mais le décalage maximal atteint 306 jours (r = 0,38), révélant une inertie importante et une influence retardée proche d'un cycle annuel. Enfin, à 50 cm, la corrélation instantanée est plus faible (r = 0,24), mais la corrélation croisée maximale est la plus élevée (r = 0,42) avec un décalage de 361 jours, ce qui suggère une mémoire hydrique forte et une réponse durable aux fluctuations de la nappe. Globalement, ces résultats montrent que la dynamique de la teneur en eau est directement liée au niveau de la nappe, avec une réponse rapide en surface et une réponse retardée mais plus marquée en profondeur, sur des échelles proches du cycle annuel.

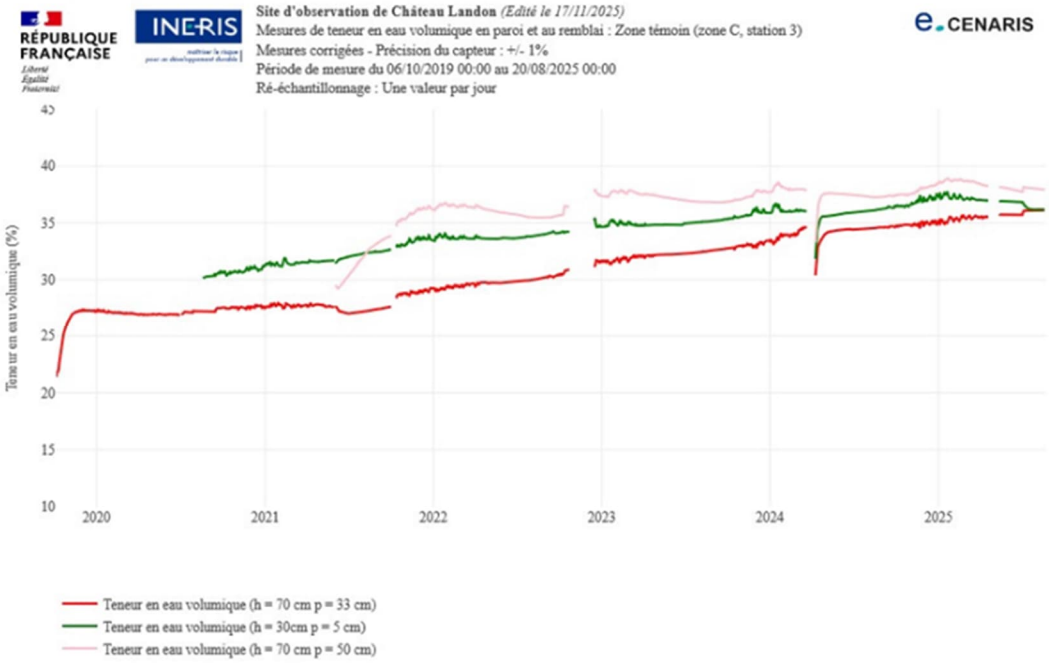


Figure 77 : Teneurs en eau volumiques mesurées dans le massif à différentes profondeurs dans la zone C

Les corrélations calculées entre l'humidité relative et la teneur en eau du massif à différentes profondeurs révèlent une dynamique globalement négative. En surface (5 cm), la corrélation instantanée est fortement négative (r = -0,56), traduisant une relation inverse significative entre les variations de l'humidité atmosphérique et la teneur en eau volumique du sol. Toutefois, la corrélation croisée maximale reste très faible (r = -0,04) et apparaît à un décalage artificiel de -365 jours, ce qui ne reflète pas une relation retardée robuste. À 33 cm, la corrélation instantanée est également négative mais plus faible (r = -0,17), tandis que la corrélation croisée maximale (r = 0,19) à -365 jours demeure modeste et peu significative. Enfin, à 50 cm, la corrélation instantanée est négative et modérée (r = -0,45), mais la corrélation croisée maximale reste très faible (r = -0,05) à -362 jours.

Globalement, ces résultats indiquent que la relation entre l'humidité relative et la teneur en eau du massif est dominée par une corrélation instantanée négative, particulièrement marquée en surface et en profondeur, tandis qu'aucune corrélation retardée solide n'est mise en évidence. Ces observations doivent être interprétées avec prudence, car les faibles valeurs de corrélation croisée aux lags extrêmes suggèrent davantage des artefacts statistiques liés au bornage des décalages qu'une véritable dynamique hydrologique. De plus, la précision limitée du capteur d'humidité relative peut accentuer ces biais et contribuer à la mise en évidence de corrélations négatives qui ne traduisent pas nécessairement un mécanisme physique robuste.

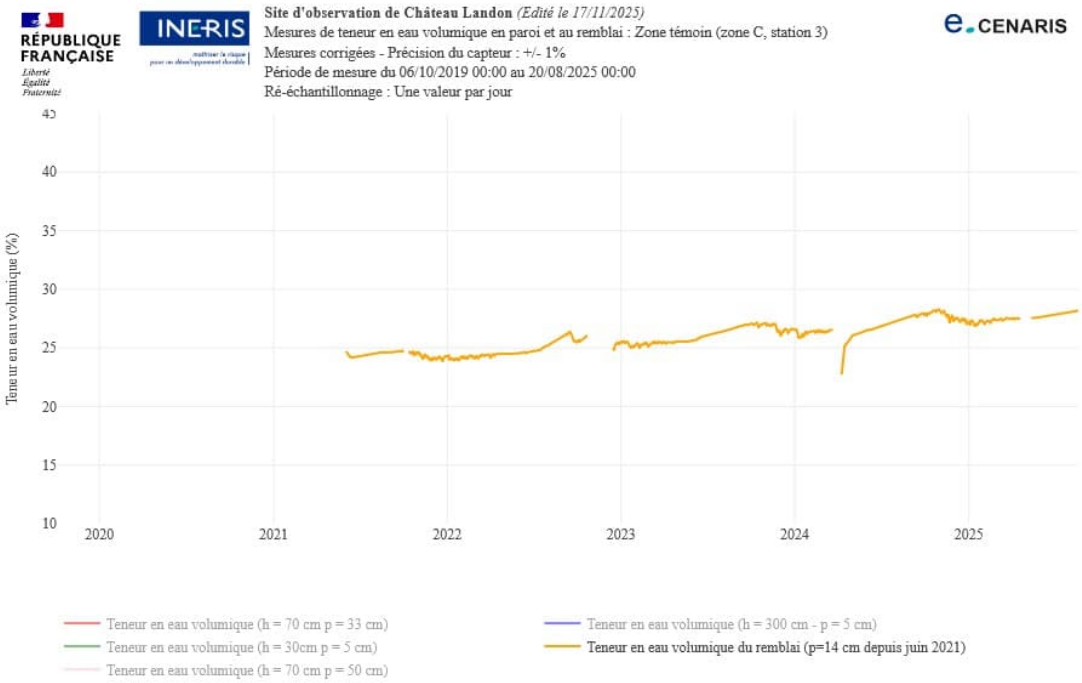


Figure 78 : Teneur en eau volumique mesurée dans le remblai de la zone C

Dans le remblai la teneur en eau est globalement inférieure ou proche de celle qui se situent à 5 cm de profondeur dans le massif ce qui signifie que le remblai est globalement plus sec que le massif même à 14 cm de profondeur. En effet bien qu'elle n'ait pas été mesurée dans le cadre de cette étude il est probable qu'à cette profondeur de 14 cm la porosité dans le remblai soit supérieure à celle du massif indiquant que le milieu est plus désaturé que le massif.

Les analyses de corrélation montrent que la teneur en eau du remblai est davantage contrôlée par l'humidité de l'air dans la carrière ($r \approx 0{,}51$) que par le niveau de la nappe ($r \approx -0{,}23$). Les teneurs en eau augmentent lorsque l'humidité dans la carrière est élevée, ce qui reflète l'influence des échanges d'eau entre le remblai et l'atmosphère souterraine (évaporation, condensation). La relation avec le niveau de la nappe apparaît plus faible et négative, suggérant un rôle secondaire du régime hydrogéologique.

4.4 Fonctionnement hydrogéologique du site

Afin de comprendre l'impact de l'eau sur la dégradation des propriétés mécaniques de la craie et les mécanismes de rupture de la carrière, il est nécessaire de caractériser le fonctionnement hydrogéologique du milieu dans lequel s'insère la carrière. Une telle caractérisation permet en effet de mieux appréhender les variations de la teneur en eau de la craie dans la carrière en identifiant les différentes sources d'arrivées d'eau ainsi que leur dynamique. En outre, une caractérisation fine de la composition chimique de l'eau pourrait permettre d'estimer son potentiel de dissolution vis-à-vis de la craie et, par conséquent, son impact possible sur la dégradation des piliers.

4.4.1 Sources potentielles des apports en eau de la carrière

La carrière Royer se situe à une altitude comprise entre 70 et 80 m NGF, sur la rive gauche du Loing, au pied des plateaux du Gâtinais qui culminent ici entre 100 et 110 m NGF (Figure 10 et Figure 79).

Le suivi des niveaux piézométriques réalisé sur les puits communaux du Pont Frault et de la Louvetière par le Cerema (Gaumet et al., 2021), sur les sondages SD1 et SD2 ainsi que le suivi du niveau du canal du Loing par le limnimètre met en lumière l'existence d'un niveau piézométrique bas au niveau de la carrière (Figure 79.b) En effet, les relevés piézométriques dans la nappe de la craie sous la plateau du Gâtinais montrent un écoulement vers les coteaux du plateau jusqu'à SD2 (niveau piézométrique à 66 m NGF), tandis que le niveau du Loing et du canal du Loing supérieurs (68 m NGF) révèlent une alimentation par le Loing de SD2.

Cela suggère une alimentation en eau par 3 sources possibles :

1) La nappe alluviale alimentée par le Loing et suivie par SD2,
2) Les eaux de la nappe de la craie suivie par SD1 provenant du plateau,
3) Les précipitations à l'aplomb direct de la carrière.

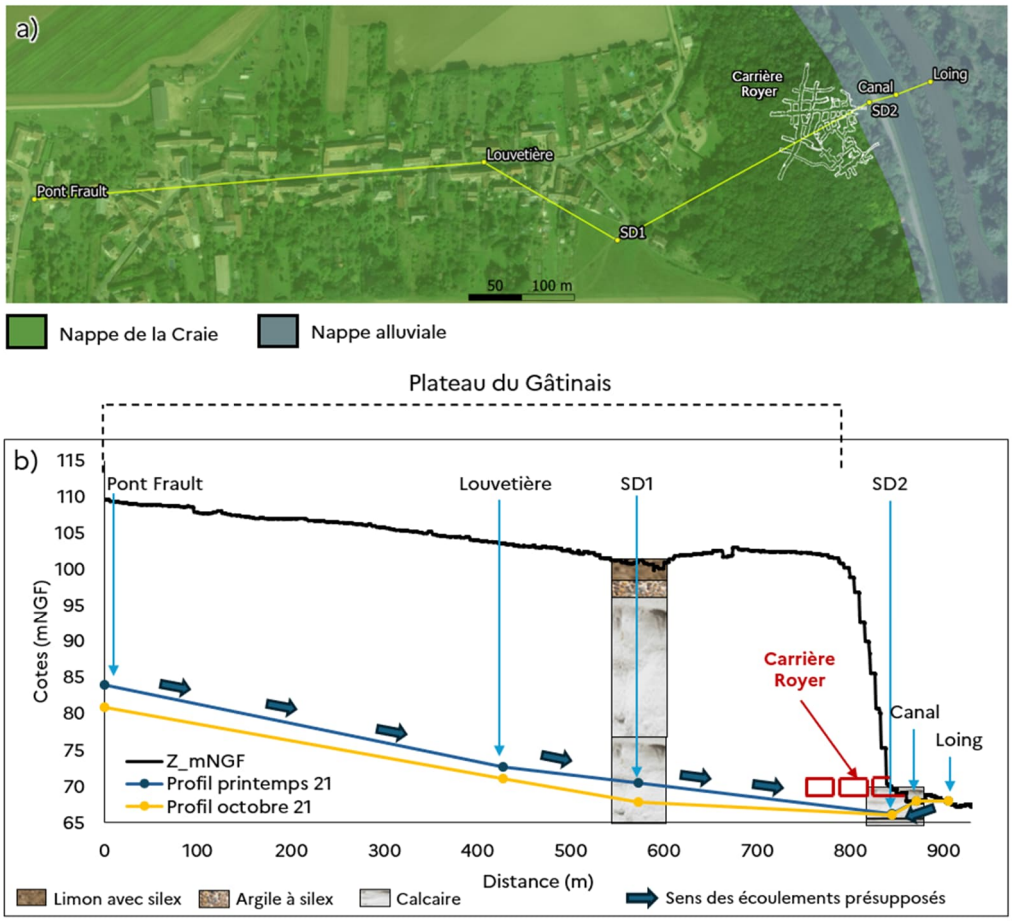


Figure 79 : a) Localisation des piézomètres SD1, SD2 par rapport à la carrière Royer, au canal du Loing et à la rivière du Loing. b) Coupe des niveaux piézométrique dans le massif au printemps 2021 (en bleu) et en automne 2021 (en jaune).

Afin de préciser cette hypothèse d'une alimentation de la carrière par ces trois sources, une analyse statistique de la corrélation a été réalisée entre :

- l'eau contenue dans le pilier instrumenté de la zone A représentée par la teneur d'eau volumique (en %) mesurée dans le pilier à 5, 20 et 50 cm de profondeur (w_5cm, w_20cm, w_50cm dans la matrice de corrélation de la Figure 80) ;
- les niveaux piézométriques de SD1 et SD2 (en m NGF) ;
- les quantités de précipitation (en mm) ;
- le niveau du Loing (en m NGF).

Pour rappel, chacune de ces variables est associée à un nombre d'échantillons compris entre 43 000 et 53 000 valeurs (à pas horaire), en fonction de la date d'installation du capteur depuis le début du suivi instrumenté de la carrière.

L'analyse de la matrice de corrélation (ici Spearman, cf. § 4.1) confirme l'existence d'une corrélation positive entre l'eau dans les piliers et les niveaux d'eau dans SD1 et SD2 avec une corrélation légèrement plus forte pour SD1. Cette corrélation est maximale pour la teneur en eau la moins profonde, prise à 5 cm (Figure 80, encadré vert). Une explication possible est que la partie superficielle du pilier est la plus sensible aux fluctuations de la teneur en eau, car elle est exposée aux phénomènes d'évaporation lors des périodes de faible saturation des piliers. Cette zone présente donc une succion plus élevée, favorisant les mouvements capillaires (voir chapitre 4.3.1).

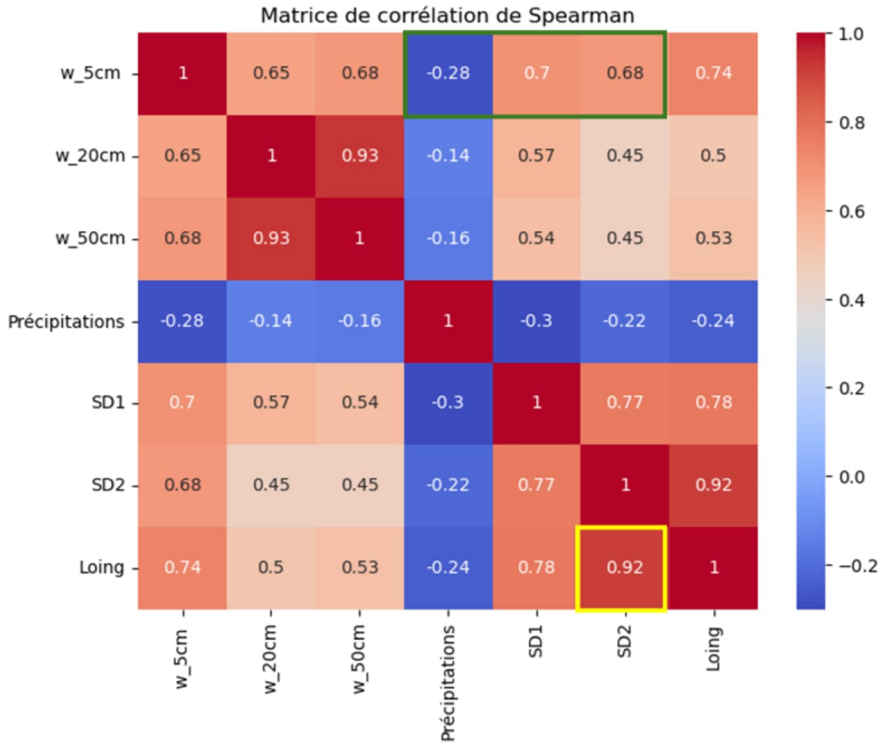


Figure 80 : Matrice de corrélation de Spearman entre les teneurs en eau dans les piliers à 5 cm (w_5cm), 20 cm (w_20cm), 50 cm (w_50cm) de profondeur, les précipitations, le niveau piézométrique de SD1, de SD2 et le niveau du Loing.

La matrice de corrélation permet également de souligner la très forte corrélation positive de SD2 avec le Loing (0.92) confirmant la forte influence du Loing sur la nappe alluviale (Figure 80, encadré jaune).

En revanche, le calcul du coefficient de Spearman entre les précipitations et la teneur en eau dans le milieu révèle une corrélation statistique négative moins forte de l'ordre de -0.3. Cela semble indiquer que les précipitations n'interagissent pas de manière simple et monotone avec la modification de la teneur en eau dans les piliers.

Cette première analyse statistique permet ainsi de confirmer l'hypothèse de l'existence d'au moins deux sources d'apports en eau dans les piliers par la nappe de la craie représentée par SD1 et la nappe alluviale influencée par le Loing et représentée par SD2. L'influence directe des précipitations ne peut quant à elle, être validée avec autant de certitude avec une telle approche statistique. En effet, les

précipitations peuvent tout de même impacter de manière indirecte la teneur en eau en influençant les cycles de recharges de la nappe de la craie et la nappe alluviale.

4.4.1.1 Caractérisation de la recharge de la nappe de la craie

L'alimentation de la nappe par les eaux de pluie dépend de plusieurs facteurs comme la topographie, la perméabilité des terrains, la saturation des sols ainsi que les phénomènes d'évapotranspiration (Fu et al., 2019; Nolan et al., 2007). Ces facteurs influencent le temps de réponse entre l'occurrence d'un épisode pluvieux et le moment où le niveau de la nappe va effectivement varier. De plus, ils impactent aussi la quantité seuil de pluie nécessaire pour observer une variation du niveau de la nappe.

Ainsi, afin de caractériser au mieux la recharge de la nappe de la craie par les précipitations, le coefficient de corrélation de Spearman entre ces deux variables est calculé pour différentes configurations. Ces configurations visent à estimer le temps de réponse entre le moment où un phénomène pluvieux apparait et le moment où la nappe réagit, ainsi que le volume seuil de précipitation permettant d'observer une variation du niveau de la nappe. Elles sont obtenues en faisant varier deux paramètres :

- le déphasage entre la chronique des précipitations et la série temporelle du niveau de la nappe,
- le nombre de jours de pluie cumulée permettant d'étudier l'impact du volume d'eau sur la réponse de la nappe.

À partir du calcul du coefficient de Spearman pour l'ensemble de ces configurations, une carte de corrélation est établie permettant de visualiser l'évolution de la corrélation en fonction du déphasage et du nombre de jour de cumul de précipitation (Figure 81). Les zones sans valeurs sur la carte sont les configurations pour lesquelles le calcul du coefficient n'est pas statistiquement significatif (p-value < 0,05). Ces données sont donc écartées de l'interprétation. Le tracé des lignes d'iso-corrélation sur la carte permet de visualiser les configurations donnant une corrélation maximale, c'est-à-dire les plus proches de 1 (NB : il n'y a pas de valeur négatives, signifiant que recharge de la nappe de la craie et précipitations évoluent dans le même sens), à partir desquelles, le déphasage et le volume seuil de précipitation peuvent être estimés.

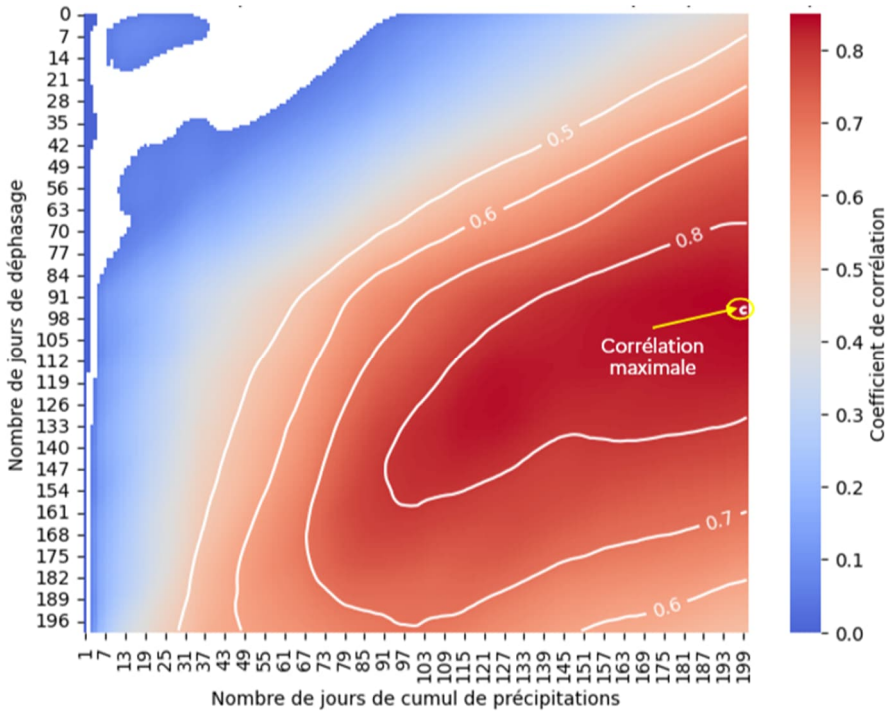


Figure 81 : Carte de corrélation de Spearman entre SD1 et le cumul de précipitation déphasé. Seules les données statistiquement significatives relativement au seuil de 5% (p-value < 0,05) sont représentées sur la carte

Dans le cas de la nappe de la craie, la corrélation est maximale (0,85) pour un déphasage de 95 jours et un nombre de jour de cumul de 199 jours. Toutefois, l'étude de la ligne d'iso-corrélation à 0,8 montre l'existence d'une plage de configurations donnant une corrélation proche de la corrélation maximale.

Ainsi afin de prendre en compte la variabilité de configurations fortement corrélées et compte tenu que cette approche statistique simple ne permet d'obtenir des informations que sur l'ordre de grandeur des phénomènes mis en jeux, l'analyse des résultats est réalisée pour l'ensemble des configurations donnant une corrélation supérieure à 0.8. Une telle approche permet ainsi de mieux refléter la variabilité du milieu étudié.

La variable « Nombre de jours de cumul de précipitation » utilisée pour réaliser les cartes de corrélation (Figure 81 et Figure 85), correspond physiquement à un volume de pluie obtenu à partir du cumul de la pluie pour un nombre de jours donné. Ce volume de pluie varie pour un même nombre de jours cumulés suivant le moment dans l'année où ce cumul est calculé. Ainsi en toute logique, un cumul de pluie de 50 jours regroupant les pluies de septembre à novembre correspondant aux maximums de précipitations dans le secteur donnera un volume d'eau supérieur à un cumul de 50 jours regroupant les pluies de mars à mai correspondant au minimum de précipitation (Figure 28). On peut alors obtenir la chronique de la hauteur d'eau cumulée des précipitations que l'on peut visualiser avec la variation du niveau de la nappe de la craie déphasée (Figure 82).

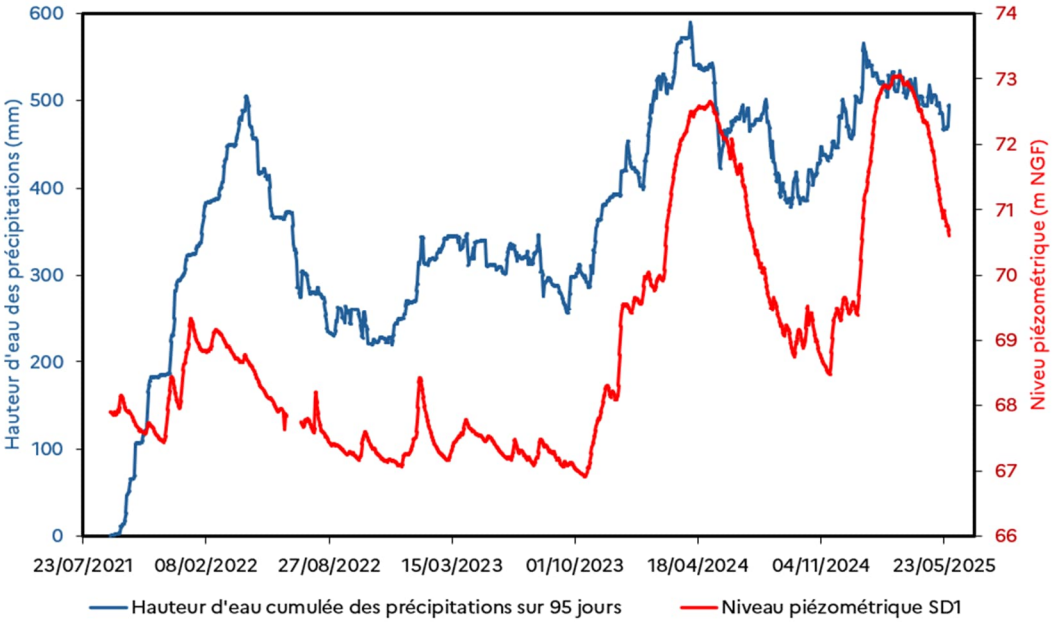


Figure 82 : Évolution du niveau de la nappe de la craie et de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour la configuration donnant la corrélation maximale : précipitations cumulées sur 95 jours et déphasage de 199 jours.

Si on applique ce raisonnement à l'ensemble des configurations donnant une corrélation supérieure à 0,8, et que l'on trace l'évolution du niveau de la nappe de la craie en fonction de la hauteur d'eau cumulée des précipitations pour chaque configuration, on peut alors étudier les variations de cette distribution (Figure 83). Cette étude met en lumière l'existence d'un volume seuil de précipitation autour de 150 à 200 mm de pluie cumulé en dessous duquel le niveau de la nappe semble indépendant du volume de précipitation.

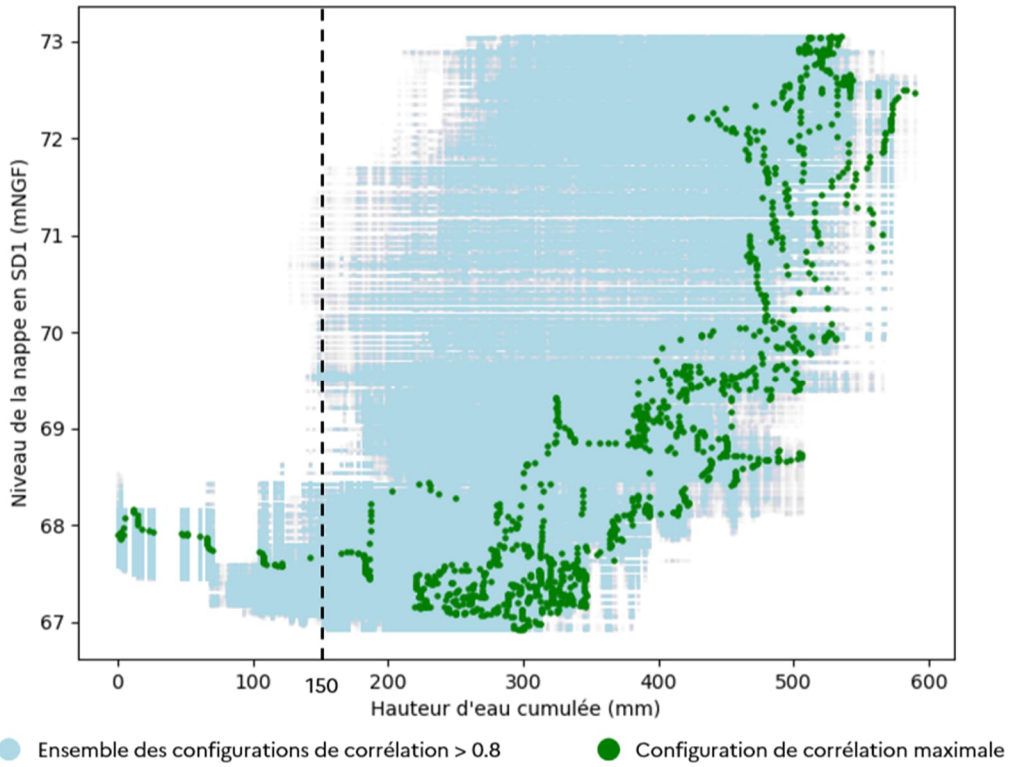


Figure 83 : Variations du niveau de la nappe de la craie en fonction de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour toute configuration donnant une corrélation de Spearman supérieure à 0.8.

Si l'on s'attache maintenant à étudier le déphasage des configurations donnant une corrélation supérieure à 0.8 on remarque que celui-ci varie entre 70 et 160 jours (Figure 81). Ce déphasage (lag) correspond au temps de réponse entre l'apparition d'un épisode pluvieux et l'observation d'une variation du niveau de la nappe.

En couplant l'information sur la hauteur d'eau seuil à atteindre pour observer une variation du niveau de la nappe avec le temps de réponse nécessaire pour observer cette variation, on peut en déduire qu'il faudrait un ou plusieurs épisodes pluvieux délivrant en cumulé au moins 150 à 200 mm d'eau pour observer une réponse de la nappe 70 à 160 jours plus tard.

Ce retard peut être interprété comme le temps de trajet de l'eau dans les terrains avant qu'elle atteigne la nappe Il peut être discuté vis-à-vis de la conductivité équivalente du milieu. En effet, l'étude de la coupe de sondage de SD1 permet d'obtenir la composition des sols traversés par l'eau pour atteindre la nappe de la craie, ainsi que leurs caractéristiques hydrogéologiques à partir des fiches d'entités hydrogéologiques de la BDLISA ((Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères)[7] (Tableau 5).

Tableau 5 : Paramètres hydrogéologiques des couches surplombant la nappe de la Craie au niveau de SD1

Couche sondage	Épaisseur couche sondage (m)	K_min (m/s)	K_max (m/s)	Code entité BDLISA appairée
Limon à silex	2.5	1.00E-06	1.00E-05	119AE
Argile à silex	2	1.00E-06	1.00E-05	119AE
Craie	19.5	1.00E-06	1.00E-04	121AR
Craie	8	1.00E-06	1.00E-04	121AR

[7] La BDLISA (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) est un référentiel cartographique du Système d'Information sur l'Eau. Cette base de données classe le sous-sol en entités hydrogéologiques qui sont décrites selon différentes propriétés. Accueil | BDLISA

À partir de ces caractéristiques et de la loi de Darcy, il est alors possible de définir une conductivité équivalente K_{eq} à un milieu multicouche, où chaque couche *i* possède une conductivité K_i et une épaisseur e_i de la manière suivante dans le cas d'un écoulement perpendiculaire aux couches :

$$K_{eq} = \frac{\sum e_i}{\sum \left(\frac{e_i}{K_i}\right)}$$

Les caractéristiques de conductivités étant données à l'échelle régionale dans les fiches de la BDLISA, une gamme de conductivité est donnée pour chaque couche (Tableau 5) afin d'étudier les gammes de variation de la conductivité équivalente du milieu et de la comparer ensuite avec les temps de trajet de l'eau pour atteindre la nappe estimée par l'approche par corrélation. En effet le temps de trajet de l'eau t_{eau} peut être estimé à partir de la loi de Darcy de la manière suivante :

$$t_{eau} = \frac{i * P_{nappe}}{K_{eq}}$$

Avec :

- i le gradient hydraulique qui, dans le cas d'un écoulement purement gravitaire vaut 1 m/m
- P_{nappe} la profondeur de la nappe (m)
- K_{eq} la conductivité hydraulique équivalente du milieu (m/s)

Il est ainsi possible d'associer pour chaque conductivité équivalente calculée à partir des paramètres hydrogéologiques du sol, un temps de trajet de la pluie pour atteindre la nappe de la craie (Figure 84). Ainsi cette dernière varie entre 10^{-6} m/s et $4{,}4.10^{-5}$ m/s, ce qui donne un temps de trajet pouvant varier entre 8 jours et 370 jours. Les valeurs estimées de temps de trajet de la pluie à partir de l'étude de la corrélation de 70 jours à 160 jours sont donc cohérentes avec les paramètres hydrogéologiques du sol et semblent apporter un plus grand degré de précision avec un intervalle de variation plus restreint. De tels temps de trajets impliqueraient une conductivité équivalente du milieu variant entre $2{,}3.10^{-6}$ m/s et $5{,}3.10^{-6}$ m/s.

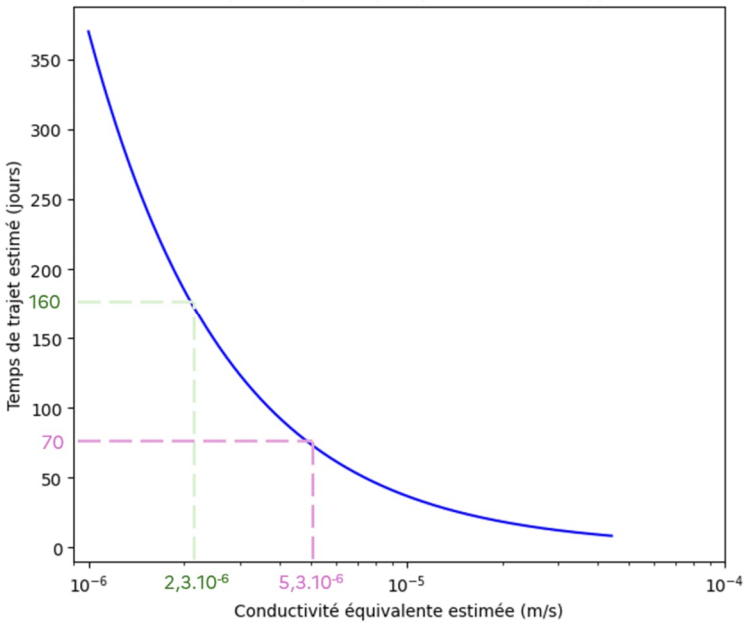


Figure 84 : Évolution du temps de trajet théorique de la pluie pour atteindre la nappe de la craie, calculé à partir de l'estimation de la conductivité équivalente des terrains recouvrant la nappe. En vert et en rose, bornes supérieures et inférieures déduites des temps trajets estimés à partir de l'analyse de la corrélation

4.4.1.2 Caractérisation de la recharge de la nappe alluviale

En reprenant la même démarche que pour l'étude de la recharge de la nappe de la Craie, la carte des corrélations entre l'eau de pluie et le niveau piézométrique de la nappe alluviale représentée par SD2 montre une corrélation maximale (0,78) obtenue pour un déphasage de 86 jours et un cumul de précipitation de 129 jours (Figure 85.a). L'étude des configurations donnant une corrélation supérieure

à 0,75 révèle une plage de variation du déphasage entre 70 jours et 98 jours. Un tel temps de trajet, s'il reste dans le même ordre de grandeur que ceux estimés à partir de la conductivité équivalente, est toutefois 2 fois supérieur au temps maximal estimé à partir des paramètres hydrogéologiques du sol (Figure 85.b). Il n'y a à ce jour pas assez de connaissance sur ces paramètres et sur les potentiels phénomènes de rétention de l'eau dans les couches superficielles à l'aplomb de SD2 pour pouvoir expliquer une telle différence.

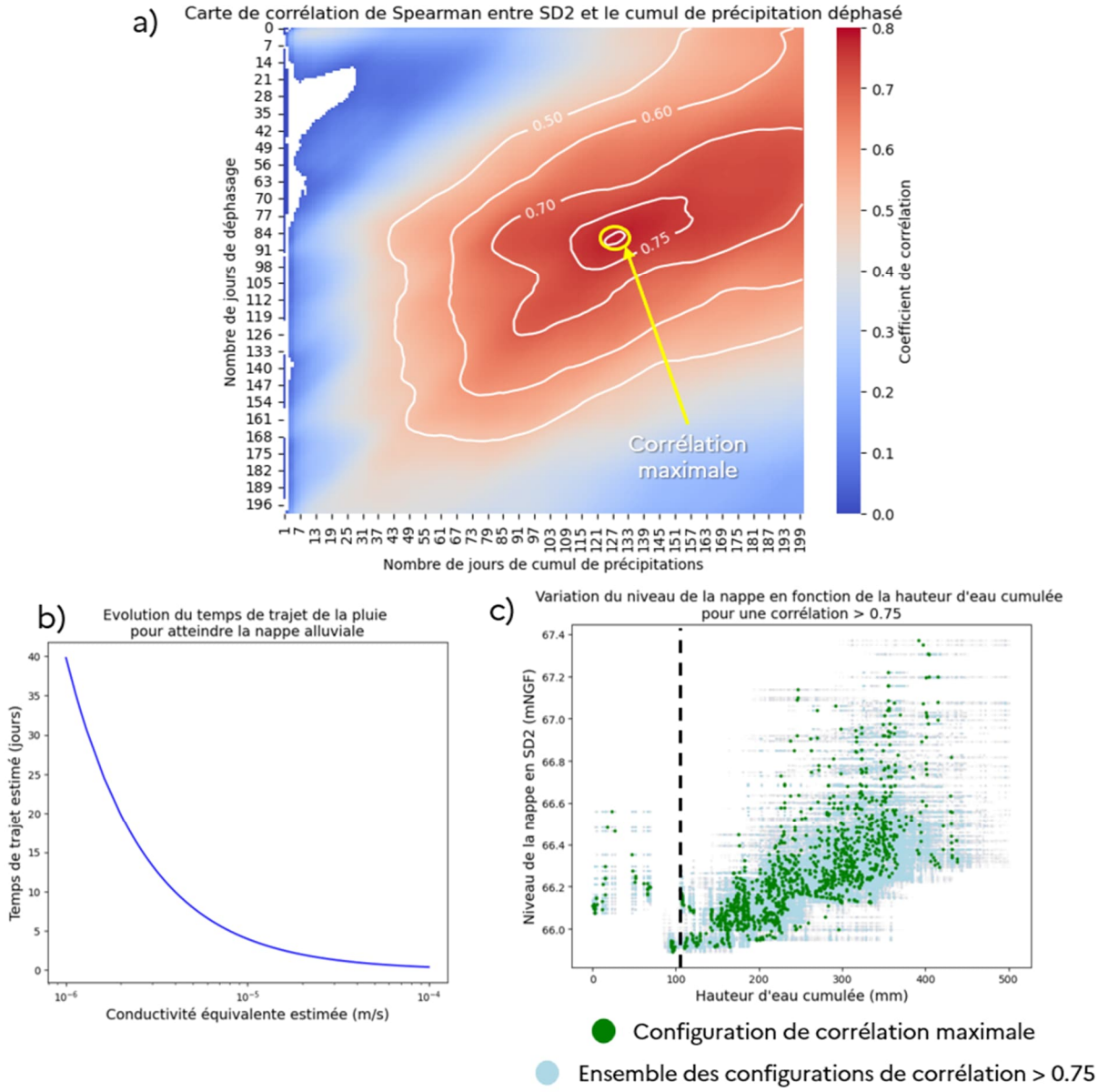


Figure 85 : a) Carte des corrélations de Spearman entre SD2 et le cumul des précipitations déphasé. Seules les valeurs statistiquement significatives relativement au seuil de 5% (p_value < 0,05) sont représentées. b) Évolution du temps de trajet théorique de la pluie pour atteindre la nappe alluviale estimé à partir de la conductivité équivalente du recouvrement. c) Variations du niveau de la nappe alluviale en fonction de la hauteur d'eau cumulée de précipitations pour toute configuration donnant une corrélation de Spearman supérieure à 0.75

Tout comme pour la nappe de la craie, il semblerait que pour des précipitations cumulées inférieures à 100 mm, la nappe alluviale ne varie pas, indiquant là encore un volume seuil à atteindre pour avoir une réponse statistiquement significative de la nappe. L'existence d'un tel volume seuil peut être expliqué par le besoin de saturer les sols en eaux avant de permettre un écoulement vers la nappe, tout comme la possible existence d'une rétention de l'eau dans les premiers horizons par la végétation.

4.4.2 Contribution des différentes sources à l'eau des piliers

Afin de quantifier la contribution de la nappe de la craie et de la nappe alluviale à l'alimentation en eau dans les piliers de la carrière, des prélèvements ont été effectués en 2022, 2024 et 2025 dans SD1, SD2, le canal du Loing, le Loing lui-même, ainsi que dans deux piliers de la carrière, le premier situé immédiatement à droite coté entrée 1 de la carrière, et le second dans la zone A (Figure 15).

Les prélèvements dans les piliers ont été réalisés à l'aide de bougies poreuses installées dans la craie des piliers. L'eau est ensuite pompée par dépression. Cette dépression a été initialement réalisée manuellement à l'aide d'une seringue pour les prélèvements de 2022 et de 2024, et à l'aide d'une pompe à vide en 2025 afin d'obtenir plus de volume d'eau à analyser (Figure 87). Dans le cas du dispositif avec la pompe à vide, un récipient de collecte est positionné entre la bougie poreuse et la pompe afin de séparer la phase aqueuse de la phase gazeuse.

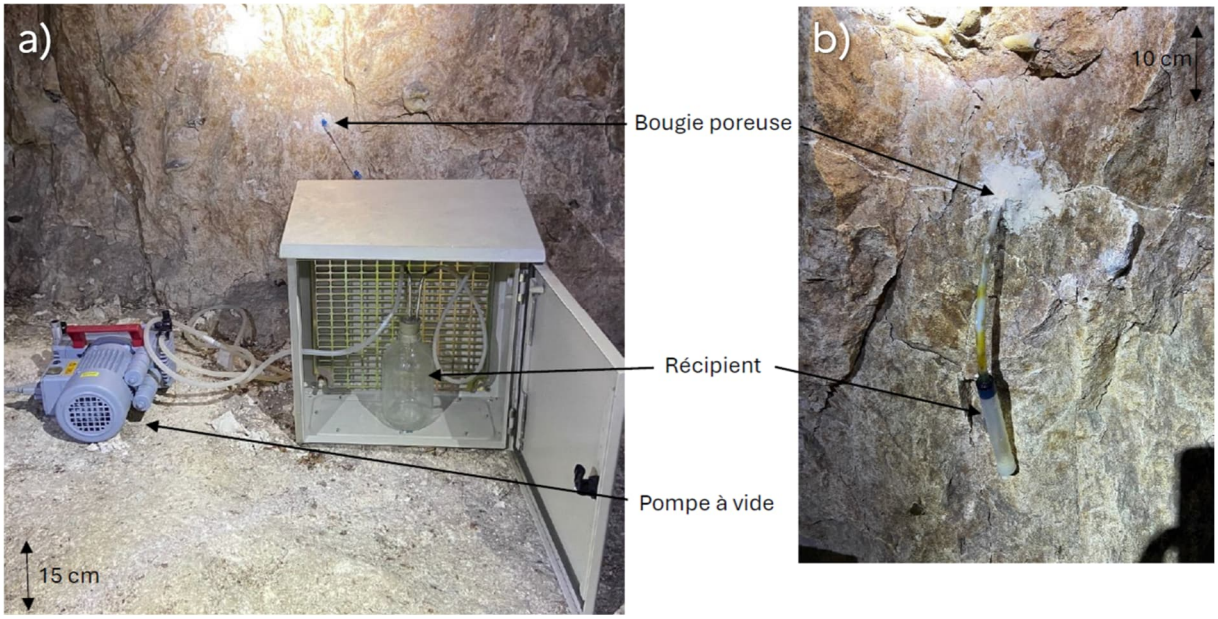


Figure 86 : Dispositif de prélèvement de l'eau interstitielle au moyen d'une bougie poreuse raccordée à a) : une pompe à vide, b) une seringue

Ces prélèvements ont permis d'évaluer la chimie des eaux aux différentes sources SD1, SD2, le canal du Loing, et le Loing (en dehors des précipitations) ainsi que celle des eaux dans les piliers afin d'en déterminer la signature chimique et d'étudier d'éventuelles similarités entre eaux sources et eaux des piliers (Annexe 1). Au total, 50 litres ont été ainsi collectées répartis en 17 prélèvements et 16 paramètres physico-chimiques.

Dans le cas des précipitations, l'étude par corrélation a révélé une contribution plus complexe de ces dernières sur les apports en eau dans les piliers. En effet, elles possèdent un rôle à la fois indirect sur les apports en eau via la recharge des aquifères et un rôle direct via l'infiltration dans le recouvrement. Ce rôle étant plus difficile à quantifier, il n'y a pas encore eu de prélèvement d'eau de pluie au niveau de la carrière pour quantifier la contribution directe des précipitations. Les prochaines campagnes intégreront des prélèvements des précipitations. Toutefois, en première approche, la contribution potentielle des précipitations sera discutée à partir d'une composition approchée de l'eau de pluie (§4.4.2.3).

4.4.2.1 Chimie des eaux de la nappe de la craie et du système {nappe alluviale, Loing}

L'étude de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)[8] réalisée sur l'ensemble du jeu de données appliqué aux eaux « sources », c'est-à-dire SD1, SD2, le canal du Loing, et le Loing, montre que les données se répartissent en 4 grands ensembles (Figure 87). Ces ensembles sont définis par la date de prélèvement (2022 ou 2024) et la nature de l'eau (elle provient de la nappe de la craie pour SD1 ou du système {nappe alluviale, Loing}).

On retrouve ainsi la forte proximité des eaux de la nappe alluviale avec celles du Loing. Ces eaux sont moins minéralisées que celles de la nappe de la craie. En outre, les eaux de la nappe de la craie se distinguent aussi par une forte présence de nitrates. Ces différences peuvent s'expliquer par la présence d'une activité agricole sur le plateau surplombant la carrière, qui enrichit les eaux de la nappe de la craie en nitrates, magnésium et chlorures (Hamilton & Helsel, 1995). La différenciation entre les années 2022 et 2024 semble quant à elle, s'expliquer par des différences de pH de concentration en sodium. Elle correspond aussi à un changement de méthode dans le prélèvement des eaux. Toutefois, aucune explication plus précise peut être donnée à ce jour.

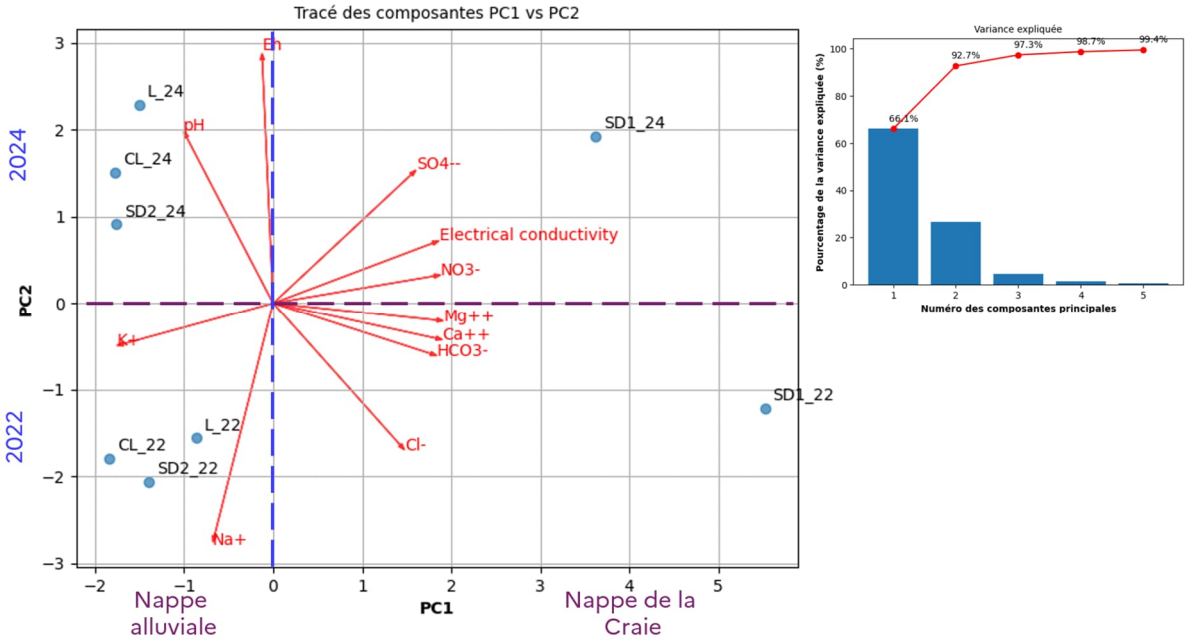


Figure 87 : ACP des analyses chimiques pour les éléments majeurs dans les eaux de SD1, SD2, le canal du Loing et le Loing

4.4.2.2 Chimie des eaux interstitielles (eaux des piliers)

Les volumes prélevés pour les eaux interstitielles étant très faibles (< 20 mL pour un prélèvement manuel, et < 100 mL pour un prélèvement à la pompe à vide), il n'existe à ce jour pas de jeux de données complets pour les eaux des piliers. Il est toutefois possible de proposer une chimie recomposée des eaux interstitielles en regroupant les analyses chimiques des eaux interstitielles en familles possédant un faciès chimique identique. Pour chaque famille ainsi créée, un jeu de données chimique est reconstitué en combinant les résultats des échantillons d'une même famille.

Pour regrouper l'ensemble des analyses des eaux interstitielles en famille, une ACP est réalisée sur les paramètres chimiques communs à toutes les analyses des eaux des piliers. Cette ACP confirme l'existence de deux types d'eaux interstitielles, celles dans le pilier à l'entrée 1 de la carrière et celles

[8] L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique permettant de décrire un jeu de données en identifiant les corrélations entre les variables du jeu de données et des sous-ensembles de données possédant des caractéristiques communes (Analyse en composantes principales — Wikipédia). Malgré la modeste taille de l'échantillon, l'objectif de l'ACP mise en œuvre ici est de faire ressortir des groupes d'échantillons avec des caractéristiques chimiques similaires.

dans le pilier de la zone A (Figure 88). Pour chaque famille il est alors possible de compléter les analyses chimiques en combinant les résultats des échantillons voisins.

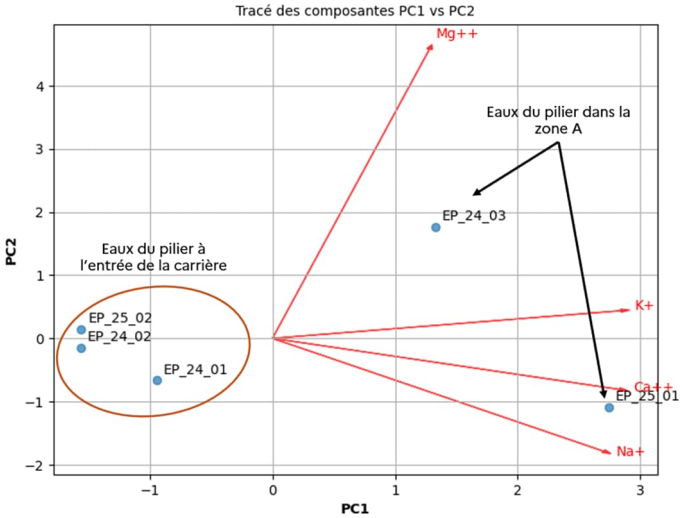


Figure 88 : ACP restreinte aux cations pour l'ensemble des prélèvements d'eaux interstitielles dans les piliers de la carrière

À partir de la chimie recomposée des eaux interstitielles pour l'entrée de la carrière (point EP_24_01) et pour la zone A (point EP_25_01), il est alors possible de discuter de l'influence des sources « nappe de la craie » et « {nappe alluviale ; Loing} sur la chimie des eaux à l'intérieur des piliers de la carrière (Figure 89.a). L'ACP réalisée sur l'ensemble des données montre ainsi l'existence de 4 ensembles :

1. Les eaux de la nappe de la craie contrôlées par la concentration en nitrates
2. Les eaux du système {nappe alluviale ; Loing} contrôlées par une plus faible minéralisation
3. Les eaux à l'entrée 1 de la carrière, relativement proches du système {nappe alluviale ; Loing}
4. Les eaux dans la zone A avec une forte concentration en cations, chlorures et sulfates.

Un tel regroupement des eaux se retrouve aussi sur le diagramme de Piper permettant de visualiser le faciès chimique des eaux. Si on retrouve bien que les eaux de la nappe de la craie, du système {nappe alluviale ; Loing} et de l'entrée 1 de la carrière présentent un faciès bicarbonaté calcique attendu dans un contexte crayeux, les eaux dans la zone A présentent quant à elle un faciès à tendance sulfato-calcique (Figure 89.b). De plus, si les eaux à l'entrée 1 de la carrière se rapprochent de la composition de celles du système {nappe alluviale ; Loing} (Figure 89.a), elles en diffèrent tout de même par un faciès tendant plus vers le pôle magnésien et légèrement plus vers le pôle sodique (Figure 89.b). Ces résultats suggèrent l'existence d'une autre source d'apport en eau permettant d'expliquer cette variation de faciès.

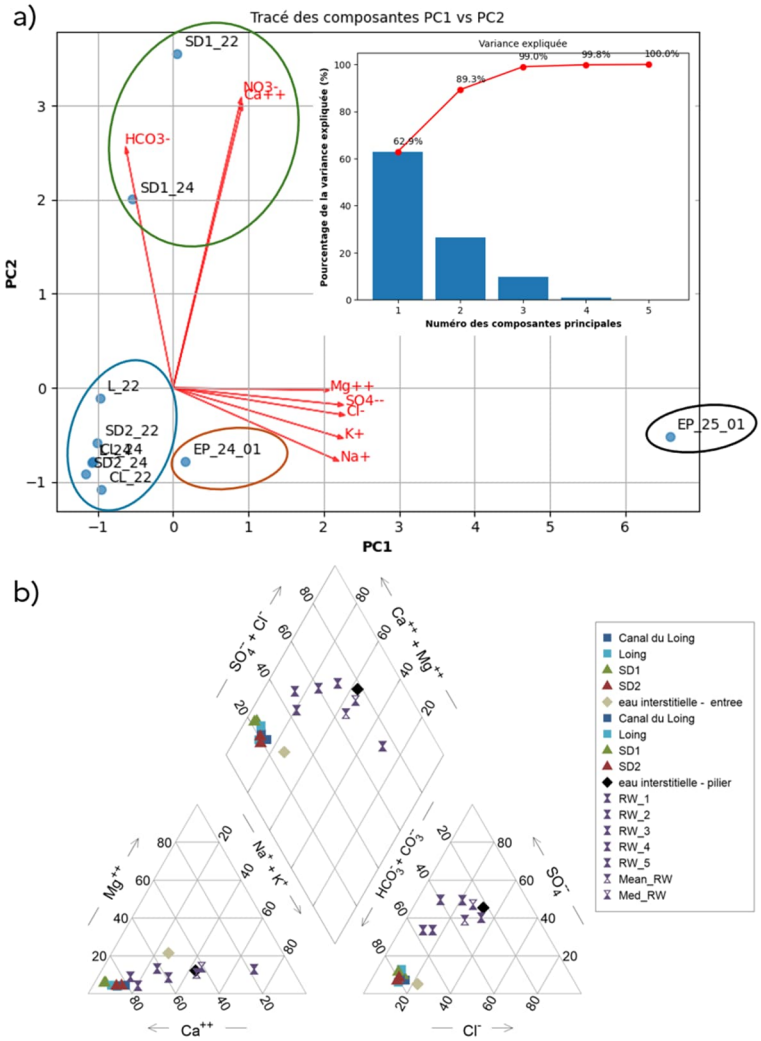


Figure 89 : a) ACP des analyses chimiques pour les éléments majeurs dans les eaux de SD1, SD2 et les eaux interstitielles à l'entrée 1 de la carrière et dans la zone A. b Diagramme de Piper des eaux dans SD1, SD2 le canal du Loing, le Loing, les eaux interstitielles et les eaux de pluies du massif central et de l'est de la France (eaux de pluie d'après Négrel & Roy, 1998; Sanusi et al., 1996)

4.4.2.3 Contribution qualitative de l'infiltration des eaux de pluie

Il n'existe à ce jour, pas de données quantitatives sur la chimie des précipitations à Château Landon, mais une analyse qualitative est possible en s'appuyant sur des études du Massif Central et de l'Alsace qui ont évalué la composition chimique des eaux de pluie (Négrel & Roy, 1998; Sanusi et al., 1996) qui ont évalué un spectre large des compositions de pluie allant d'un environnement industriel et pollué (Alsace) à un environnement sans perturbation anthropique (Massif Central). Bien que la composition puisse varier d'une région à l'autre, on peut considérer que l'eau de Château Landon se situe entre les deux.

La composition de la pluie représentée par les points RW_1 à RW_5 accompagnés de leur composition médiane (Med_RW) et moyenne (Mean_RW) sur la Figure 89.b montre que ces dernières présentent un faciès se rapprochant du faciès de l'eau dans le pilier de la zone A (losange noir). Cela suggèrerait une influence des précipitations sur la composition de l'eau dans le pilier.

4.4.3 Impact de l'eau sur la stabilité des piliers

Malgré l'incertitude sur les analyses chimiques et la recomposition d'un jeu de données complet sur la chimie des eaux interstitielles, il est intéressant de constater que ces dernières sont en équilibre chimique avec la calcite de la craie (Figure 90). En effet les points les représentant sur le diagramme d'activité sont dans le domaine beige de stabilité de la calcite. Les eaux actuellement mesurées ne présentent donc pas de risque de dissolution des piliers de la carrière

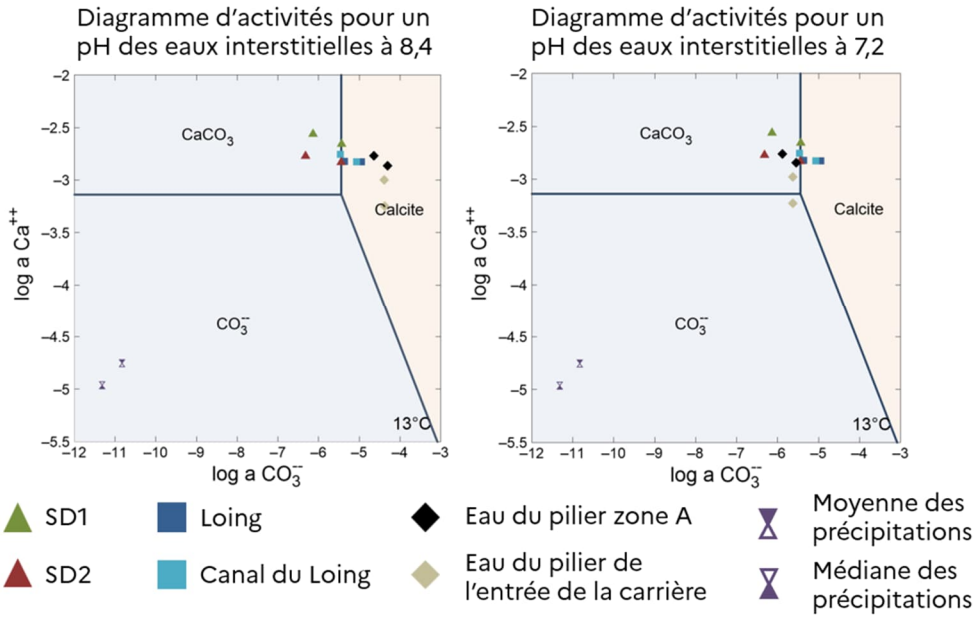


Figure 90 : Diagramme d'activités de la calcite montrant l'état de saturation des différentes eaux étudiées vis à vis de la calcite, ainsi que la sensibilité de cet équilibre aux variations de pH pour les eaux interstitielles. Une eau est en équilibre avec la calcite si elle est dans le domaine jaune.

Toutefois, cet équilibre reste fragile car les points sont proches de la frontière du domaine de stabilité de la calcite. Une telle fragilité peut s'expliquer par la chimie des eaux sources (nappe de la craie, système {nappe alluviale ; Loing} et précipitations) qui ne sont pas forcément toujours en équilibre avec la calcite, voire jamais pour les précipitations. Les points qui représentent ces eaux sont en effet principalement dans les domaines bleus du diagramme d'activité correspondants à des eaux sous-saturées vis-à-vis de la calcite qui risquent donc de la dissoudre.

La saturation des eaux sources vis-à-vis de la calcite est fonction de son temps de résidence au sein des aquifères principalement composés de craie et donc de calcite. Plus le temps de résidence sera long, plus l'eau sera saturée. Au contraire, si le temps de résidence diminue, par exemple suite à des fortes précipitations accélérant les écoulements dans l'aquifère, l'eau sera moins saturée. Une conséquence directe d'un faible temps de résidence est l'acidification des eaux entrant en contact avec la calcite du pilier. En effet, le pH des eaux de pluie est autour de 5,5. Ainsi si les eaux de pluies traversent trop rapidement les aquifères alors le pH n'aura pas le temps d'augmenter vers une valeur plus élevée comme 8.4 actuellement au sein des piliers. À titre d'exemple, un pH de 7,2 au lieu de 8,4 rendrait les eaux interstitielles sous-saturées vis-à-vis de la calcite et commenceraient donc à dissoudre les piliers de la carrière, pouvant donc à terme compromettre la stabilité de l'ouvrage (Figure 90). Ce processus d'acidification des eaux est par ailleurs accentué par l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère lié au changement climatique (Bogan et al., 2009a).

5 Discussions, Synthèse et Perspectives

La carrière Royer, voisine de celle de Beaulieu qui s'est effondrée en 1910, est restée intacte et a été choisie comme observatoire souterrain (dit de Château Landon) afin d'étudier les interactions eau–roche, de comprendre le comportement hydrogéologique du site et de suivre les paramètres géomécaniques et hydrogéologiques, en quantifiant les effets de la circulation d'eau sur sa stabilité.

L'instrumentation approfondie de cet observatoire mise en œuvre il y a près de six ans, combinée aux observations régulières de terrain et aux analyses antérieures, suit, documente et décrit, par un ensemble de données riches et détaillées, et de manière relativement unique à l'échelle d'une carrière souterraine abandonnée en France, l'état du massif, sa dynamique hydromécanique et l'évolution de ses structures internes.

Une cinquantaine de capteurs a été installée dans trois zones préalablement sélectionnées, grâce à la combinaison de modélisations numériques 3D, d'observations de terrain et des enseignements tirés de l'effondrement de Beaulieu. Ces capteurs de haute précision permettent une acquisition continue des données via le suivi quasi-temps réel sur le portail web e.cenaris de l'Ineris (https://cenaris.ineris.fr). Le dispositif est complété par des levés scanner 3D réguliers pour suivre l'évolution géométrique de l'ouvrage dans le temps, ainsi que par une inspection géotechnique annuelle réalisée par le Cerema.

Le dispositif d'instrumentation et d'observation a démontré sa fiabilité, sa sensibilité aux faibles déformations et sa capacité à détecter des phénomènes invisibles à l'œil nu :

- les capteurs hydriques sont essentiels pour comprendre les transferts hydriques complexes dans la craie ;
- les extensomètres détectent les réajustements millimétriques ;
- le radar capture avec précision les fluctuations du remblai ;
- les inspections visuelles permettent de valider les observations instrumentales et d'en assurer la cartographie spatiale ;
- les mesures acoustiques contribuent à la caractérisation de l'altération du massif ;
- le scanner 3D complète le suivi par une mesure géométrique directe.

Des premières analyses de données sur cette période de 6 ans ont permis de mettre en évidence des éléments clés et de proposer des pistes de réflexions relatives à la stabilité des carrières souterraines abandonnées, notamment en environnement crayeux, dans un contexte de changement climatique, comme discutés ci-après.

Comportement du matériau crayeux à l'échelle de la carrière

Bien que les valeurs de déplacements mesurées restent très faibles, les vitesses de déplacement calculées témoignent d'un phénomène d'écrasement lent comparable au fluage des matériaux. En comparant ces résultats aux vitesses de déformation obtenues, sur échantillon, par Lafrance (2016) pour les craies de Saint-Martin-le-Noeud et d'Estreux, de l'ordre de 10^{-11} s^{-1}, on constate que les vitesses mesurées in situ sont nettement inférieures. Dans la zone C, le taux de déformation est d'environ 2×10^{-13} s^{-1}, en supposant une base de mesure de 2 m pour l'extensomètre à fil[9]. Ce taux est ainsi environ cent fois plus faible que les valeurs mesurées par Lafrance (2016), même pour des échantillons très saturés. Ces résultats confirment l'existence d'un mécanisme de déformation à l'échelle du massif (ou pilier) mais extrêmement plus lent qu'à l'échelle de l'échantillon de laboratoire.

Cependant, cette stabilité instrumentale ne doit pas être interprétée comme une absence d'endommagement. En effet, les observations visuelles montrent une altération marquée à la base du pilier instrumenté (Figure 91), contrastant avec la partie supérieure où la présence de niveaux siliceux (silex) semble contribuer à la reprise des charges et à la stabilité globale de la structure. Cette configuration suggère que la résistance du pilier repose en partie sur la cohésion et la rigidité des bancs supérieurs, tandis que les zones plus altérées en partie basse peuvent subir une dégradation progressive non détectée par les mesures extensométriques qui sont très localisées.

[9] La base de mesure correspond à la distance initiale entre les deux points d'ancrage de l'extensomètre à fil. Le taux de déformation étant défini comme le rapport entre la variation de longueur mesurée et cette longueur initiale, rapporté au temps, il est nécessaire de supposer une valeur de base de mesure pour convertir un déplacement (exprimé en millimètres) en un taux de déformation (exprimé en s^{-1}). Une base de mesure de 2 m, correspondant à la configuration instrumentale installée sur site, a donc été retenue pour cette estimation.

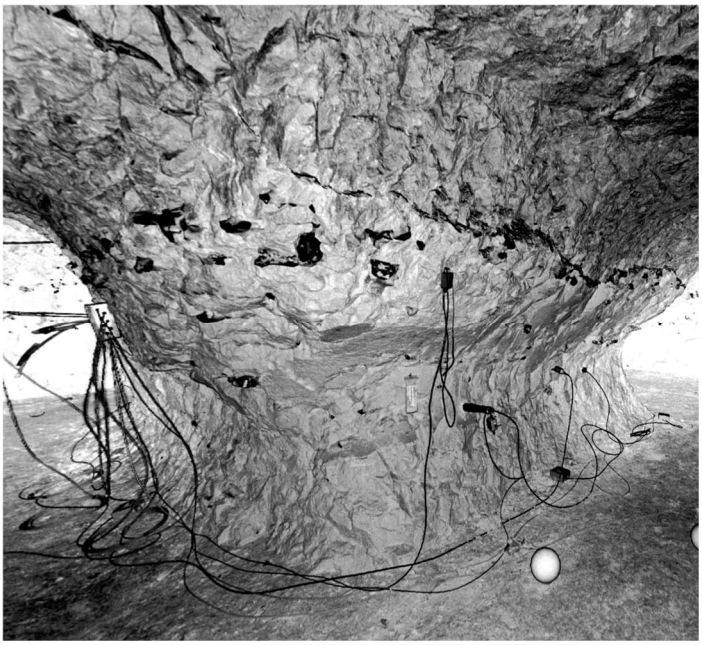


Figure 91 : Vue des silex dans le pilier instrumenté de la zone A – image scanner – Source : Ineris

Ainsi, si les mesures extensométriques traduisent une stabilité mécanique globale à l'échelle du massif, elles n'excluent pas la possibilité d'une évolution locale de l'état du pilier, notamment dans les zones altérées ou décomprimées, qui pourraient à terme modifier les conditions d'équilibre.

Les campagnes de scanning 3D réalisées au cours du suivi montrent l'absence de déformations géométriques significatives à l'échelle de la carrière, confirmant les observations in situ des forages réalisés dans le cadre de la thèse de Lafrance (2016) en 2015. Les photographies prisent en 2025, soit 10 ans après (Figure 92), montrent que la craie dans ces forages est restée quasi intacte, sans signe d'altération notable. Par ailleurs, on n'observe pas de déformation significative du trou de forage. Ces éléments suggèrent que les déformations du massif se situent dans des ordres de grandeur très faibles, confirmant les mesures extensométriques.

Toutefois, les écoutes acoustiques révèlent des chutes de petits blocs (< 6 cm) et celle d'un bloc plus conséquent d'environ 14 cm qui a pu être observé entre deux campagnes de scanner 3D. Ces pertes de matière, limitées mais réelles, témoignent d'une activité de surface liée à l'altération, au relâchement local ou à la dégradation progressive des interfaces fracturées. Ces phénomènes, mis en évidence par les mesures in situ, sont compatibles avec des mécanismes d'altération lente, notamment :

- le relâchement des contraintes en périphérie du massif ;
- les cycles hydriques dans les premières dizaines de centimètres du massif ;
- la perte de cohésion locale entre éléments altérés ;
- la variabilité de la succion dans le massif et des conditions thermiques dans la carrière.

Par ailleurs, la fissure instrumentée présente une tendance à la fermeture lente, suggérant un réajustement du bloc associé, probablement sous l'effet des modifications hydriques locales. Une corrélation négative marquée a été observée entre les données d'humidité relative et celle du fissuromètre ($r = -0{,}62$) indiquant que la diminution de l'humidité relative, associée à une augmentation de la succion en surface du massif, favorise une fermeture de la fissure.

Ainsi, il existe une influence prépondérante des processus hydriques superficiels dans le comportement mécanique des discontinuités superficielles (en peau des piliers). Ce comportement est cohérent avec les propriétés hydromécaniques de la craie, matériau fortement sensible aux effets capillaires, pour lequel une augmentation de la succion induit un confinement effectif supplémentaire et une rigidification du matériau. L'absence de décalage temporel mesurable suggère que ces variations hygrométriques agissent principalement dans les premiers centimètres à décimètres du massif, là où les échanges hydriques avec l'atmosphère sont les plus rapides, et se traduisent immédiatement par un réajustement des lèvres de la fissure.

À l'inverse, l'influence plus modérée des fluctuations piézométriques ($r = 0{,}25$) indique que les variations de la nappe exercent un contrôle secondaire, plus diffus, sur l'ouverture de la fissure, sans réponse

différée identifiable. Ces résultats confirment que, à l'échelle locale des fissures, les conditions hygrométriques de la carrière peuvent dominer le comportement mécanique à court terme, indépendamment des variations hydrauliques plus lentes du système aquifère.

Les mesures radar mettent en évidence des mouvements saisonniers du remblai, compris entre –2 cm et +1 cm, indiquant que le remblai réagit mécaniquement aux sollicitations hydrauliques et mécaniques, sans déformation cumulative à long terme. La faible corrélation entre la teneur en eau du remblai et le niveau de la nappe montre que l'eau de la nappe n'infiltre pas directement le remblai, confirmant que les mouvements sont principalement mécaniques. Ces observations permettent également d'expliquer les dommages constatés en 2016, lorsque le tassement du remblai a entraîné la fissuration du mur maçonné adjacent. Elles soulignent l'importance d'un appui sur un terrain sain et stable, le mur ayant été directement fondé sur le remblai.

L'instrumentation montre que la périphérie des piliers est plus désaturée que leur cœur, impliquant une succion plus élevée, une perméabilité plus grande et des transferts hydriques plus rapides, tandis que le noyau central présenterait une perméabilité plus faible et une plus grande inertie hydrique. Cette hétérogénéité favorise la concentration des efforts en périphérie et des redistributions internes lors des variations hydriques, amplifiées par la présence de fissures.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de Munoz-Castelblanco et al. (2011) qui montrent que la craie de Château-Landon est dominée par les effets capillaires. La caractérisation porosimétrique qu'ils réalisent révèle une structure homogène, avec une famille de pores resserrée autour de 2,2 µm, se désaturant brutalement pour des succions légèrement supérieures à 100 kPa. Les essais de remouillage sous contrainte confirment que la saturation réduit la résistance mécanique et augmente la déformabilité, observation corroborée par Lafrance (2016) et Pajiep Ngongang (2024).

Figure 92 : Forages réalisés dans le cadre de la thèse de Lafrance (2016)– photos prises en 2023

Ces observations permettent d'expliquer pourquoi la craie du pilier instrumenté, bien que peu désaturée en surface (<70 %, si on considère une porosité de 44 %), conserve une résistance résiduelle : son état quasi saturé est associé à une succion non nulle induite par l'évaporation en surface, procurant un confinement équivalent estimé à 80 kPa (Munoz-Castelblanco et al., 2011). Ainsi, la stabilité du pilier dépend moins du degré de saturation que du maintien d'une succion suffisante en périphérie.

Toute diminution de cette succion pourrait selon eux constituer un facteur critique, car la quantité d'eau nécessaire pour l'annuler est faible. Dans cette logique, ils avancent que la réduction de succion consécutive à l'inondation de 1910, et aux remontées capillaires associées, constitue probablement le mécanisme déclencheur de l'affaissement des piliers dans la carrière voisine. Les auteurs mettent en évidence un gradient hydrique interne dans le pilier : un noyau plus saturé, donc plus tendre et ductile, entouré d'une zone périphérique plus désaturée, plus rigide et fragile, et observation confirmée par les mesures de l'observatoire.

Cette hétérogénéité favorise une concentration des efforts en périphérie et des redistributions internes lors des variations hydriques, amplifiées par la présence de fissures. Par ailleurs ils affirment que les cycles d'humidification–séchage pourraient induire une fatigue progressive du matériau.

L'ensemble de ces éléments montre que la dynamique de la succion joue un rôle central dans les processus d'altération et dans la stabilité mécanique du massif.

Fonctionnement hydrogéologique de la carrière

Une première étude du fonctionnement hydrogéologique de la carrière remise dans le contexte régional permet de mieux comprendre les variations piézométriques influençant les évolutions des teneurs en eau observées dans les piliers, ainsi que l'existence d'autres sources d'apport en eau. Au moins 3 sources d'alimentation de la carrière en eau sont identifiées :

- Principalement :
  1. la nappe de la craie située sous le plateau et en amont topographique de la carrière ;
  2. le système de la nappe alluviale connectée au Loing en aval topographique de la carrière qui alimente la carrière au niveau de ses entrées
- Mais également :
  3. les précipitations par infiltration directe à l'aplomb de la carrière.

Les variations des niveaux de la nappe de la craie et du système {nappe alluviale ; Loing} montrent qu'il existe un volume seuil de précipitations d'au moins 100 mm à atteindre pour observer une variation significative des niveaux piézométriques et ce après un retard pouvant aller jusqu'à 100 – 150 jours. Ce volume seuil et ce déphasage reflètent que seule une partie de la pluie atteint effectivement la nappe, celle-ci pouvant ruisseler, et être absorbée par des sols non saturés lors de son infiltration progressive sur cette durée. A ce temps de trajet, s'ajoute ensuite le transport de l'eau des systèmes sources vers la carrière, qui reste encore à déterminer.

D'après ces premiers résultats l'intensité du phénomène pluvieux est aussi importante que sa durée. Une pluie moyenne mais de longue durée qui dépasse en cumulé les 100 mm aurait autant d'impact qu'un phénomène court mais plus intense qui atteint aussi en cumulé cette limite de 100 mm.

L'influence directe de la pluie par infiltration au toit de la carrière est, quant à elle, plus complexe à appréhender, car il faudrait dans un premier temps soustraire l'influence de la nappe de la craie et du système {nappe alluviale ; Loing} au travers desquels la pluie exerce déjà une influence indirecte.

L'étude de la chimie des eaux de la nappe de la craie, du système {nappe alluviale ; Loing}, des eaux interstitielles dans la carrière et d'une chimie approchée des précipitations montre que les apports seuls de la nappe de la craie et du système {nappe alluviale ; Loing} ne peuvent expliquer la chimie des eaux interstitielles des piliers. En première approche, il semble ainsi nécessaire de considérer une infiltration directe des eaux de pluie, avec une chimie faiblement influencée par le recouvrement. La comparaison du facies de l'eau de pluie établie à partir de données historiques provenant du Massif Central et de l'Est de la France suggère tout de même un rôle possible de la pluie, mais celui-ci reste à être démontrer dans le cas de l'observatoire de Château Landon. Il s'agira ensuite de quantifier les contributions relatives de ces sources (par les nappes et par les infiltrations) à l'alimentation en eau dans les piliers.

Par ailleurs i les eaux interstitielles sont actuellement en équilibre avec la calcite de la craie compte tenu des approximations faites vis-à-vis des concentrations des ions HCO_3- et du pH, une faible diminution du pH de 8,4 à 7,2 peut les rendre sous-saturées vis-à-vis de la calcite et amorcer une dissolution de la craie. Dans un contexte de changement climatique où la concentration en CO_2 dans l'atmosphère augmente (Bogan et al., 2009b; Ek et al., 2020), entrainant une acidification des eaux de pluie, un tel phénomène pourrait se produire. Cette possibilité est d'autant plus grande que les eaux des termes sources ne sont pas toujours en équilibre avec la craie. Ainsi une légère modification de l'acidité des eaux pourrait entrainer un processus de dissolution lente pouvant déstabiliser à terme les piliers de la carrière, tout comme l'acidification de l'humidité de l'atmosphère.

Synthèse

L'ensemble des observations et des premières analyses de données réalisées (hydriques, géomécaniques, géométriques et chimiques) indique une évolution limitée, à court et moyen terme, de l'état de la carrière, mais soumis à une dynamique interne lente faite de micro-ajustements mécaniques, d'un vieillissement progressif du massif en lien avec des mécanismes d'altération lents et des transferts hydriques complexes dans la craie.

Il est donc essentiel de suivre ces processus à travers des indicateurs indirects tels que l'humidité, la succion, la teneur en CO_2 de l'atmosphère, la température, l'état des surfaces et l'évolution des fractures. Le croisement de ces éléments permettrait d'identifier les tendances de dégradation avant l'apparition de déformations mesurables et d'améliorer la compréhension des mécanismes susceptibles d'affecter la stabilité à moyen et/ou long terme.

Perspectives

La combinaison des analyses de données hydrogéologiques, des mesures de la chimie des eaux, des teneurs en eau volumique, de l'étude du remblai, de l'évolution de la fracturation et des chutes de blocs constitue un outil déterminant pour comprendre les phénomènes précurseurs d'effondrement et, plus largement, pour appréhender la stabilité à long terme du site, tout en permettant d'évaluer les effets potentiels de l'altération chimique et physique progressive sur la résistance et la cohésion du massif rocheux.

Aussi, nous proposons de poursuivre le suivi instrumental et observationnel de la carrière Royer sur un nouveau cycle pluriannuel, dont la durée, comprise entre 3 et 6 ans, dépendra de la nature des actions complémentaires qui seront décidées et engagées (voir pistes ci-après). La poursuite de la collecte et de l'analyse des données permettra d'enrichir et de valoriser la base de données déjà constituée, susceptible de constituer, à terme, un socle pour le développement de modèles prédictifs (apprentissage automatique, analyses probabilistes, détection automatique d'anomalies).

Ainsi, afin de renforcer et d'améliorer les analyses en cours, plusieurs études complémentaires pourraient être envisagées et notamment les suivantes.

- Les différences de teneur en eau observées entre les trois zones de la carrière pourraient résulter d'une hétérogénéité de la porosité, de la circulation d'air au sein de l'ouvrage ou de variations de la profondeur de la nappe. La mise en service des nouveaux piézomètres (SD3 et SD4) fin 2025 ainsi que la réalisation de prélèvements pour caractériser la porosité devraient permettre de mieux discriminer ces mécanismes et de compléter les analyses hydriques en cours.
- Les teneurs en eau volumique varient selon la localisation dans le massif, avec des zones comme la zone C où elles augmentent continuellement sans stabilisation. Cette évolution reflète une redistribution interne ou une saturation lente des pores capillaires, pouvant entraîner une diminution progressive de la résistance de la craie (Pajiep et al., 2024). Ces observations soulignent l'importance d'un suivi hydrique à long terme et notamment la dynamique de ces mécanismes.
- Les analyses de sensibilité à la composition de l'eau, combinées aux résultats in situ, permettraient de mieux comprendre l'évolution temporelle des propriétés mécaniques de la craie sous l'influence des conditions hydriques et chimiques.
- Les bancs de silex influencent l'altération et l'homogénéité du massif. Une caractérisation précise de leur localisation, épaisseur et propriétés mécaniques améliorerait la compréhension de la stabilité globale.
- L'intégration de ces données dans le modèle numérique 3D développé par Pajiep et al. (2025), en cours d'implémentation dans un code aux éléments finis, offrira une meilleure évaluation de la stabilité de la carrière et de l'impact de conditions climatiques extrêmes. La prise en compte dans les calculs des mécanismes hydromécaniques, notamment via les courbes de rétention et les paramètres de porosité, de résistance et de saturation, complétera ainsi les corrélations statistiques existantes.
- L'exploitation des essais pénétrométriques réalisés par le Cerema ouvre des perspectives intéressantes pour affiner la caractérisation mécanique du mur de remblai de la carrière (estimer sa résistance) et :
  - établir un modèle 1D de la résistance du mur, mettant en évidence d'éventuelles hétérogénéités latérales;
  - identifier les zones du mur les plus susceptibles de se déformer, en reliant les valeurs faibles de Qd à un moindre potentiel de portance ;
  - contraindre les modèles numériques en fournissant une estimation plus réaliste de la résistance mécanique du support des piliers et de son évolution spatiale ;
- Le mécanisme d'infiltration de l'eau de pluie à travers la couche de couverture, initialement considérée comme secondaire, peut néanmoins jouer un rôle local en raison des fractures et conduits karstiques qui pourraient faciliter l'acheminement de l'eau vers la carrière. Cette infiltration peut réduire localement la résistance des piliers, favoriser la dissolution de la craie et augmenter le risque d'instabilité. Un suivi systématique de la chimie des eaux de pluie et des nappes, combiné à l'évolution climatique (précipitations intenses, sécheresses estivales), est nécessaire pour mieux anticiper les cycles de saturation et désaturation et leurs effets sur la stabilité du massif.

- La réalisation d'un modèle géologique permettrait de confronter les observations instrumentales aux caractéristiques locales et aux résultats d'essais mécaniques et hydriques. La caractérisation des fractures dans la couverture et les galeries est essentielle pour identifier les voies d'écoulement préférentielles et quantifier les transferts d'eau.
- Le croisement des signaux acoustiques avec les épisodes de pluie ou de saturation pourrait aider à détecter des précurseurs d'événements mécaniques et à mieux comprendre les phases critiques d'évolution du massif.
- Pour compléter le dispositif, l'installation de capteurs de CO_2 et de capteurs d'humidité plus précis permettraient de mieux comprendre les dynamiques internes et d'affiner les corrélations entre environnement, activité du massif et signaux physiques.

De manière transversale, il est recommandé de poursuivre, compléter et enrichir les analyses de données initiées dans ce rapport, en particulier les corrélations chronologiques et spatiales entre les différentes variables.

Un plan d'actions sur les prochaines années sera établi début 2026 afin de développer et de mettre en œuvre tout ou partie de ces différentes pistes d'études dans une perspective pluriannuelle.

6 Références

Al Heib, M., Conil, N., & Gombert, P. (2023). Influence of geology and topography on the occurrence of mine massive collapse—Back-analysis of a historical collapse of chalk mine (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(6), 230. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03234-z

Al Heib, M., Duval, C., Theoleyre, F., Watelet, J.-M., & Gombert, P. (2015). Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *74*(3), 1001-1018. https://doi.org/10.1007/s10064-014-0677-6

Armand, G., Bumbieler, F., Conil, N., De La Vaissière, R., Bosgiraud, J.-M., & Vu, M.-N. (2017). Main outcomes from in situ thermo-hydro-mechanical experiments programme to demonstrate feasibility of radioactive high-level waste disposal in the Callovo-Oxfordian claystone. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *9*(3), 415-427. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.03.004

Armand, G., Djizanne, H., Zghondi, J., De La Vaissière, R., Talandier, J., & Conil, N. (2016). Inputs from in situ experiments to the understanding of the unsaturated behaviour of Callovo-Oxfordian claystone. *E3S Web of Conferences*, *9*, 03004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160903004

Blavoux, B., Gourcy, L., & Chery, L. (2014). L'utilisation des isotopes pour caractériser l'origine des pollutions dans les eaux souterraines. *Géologues*, *179*, 9-14.

Bogan, R. A. J., Ohde, S., Arakaki, T., Mori, I., & McLeod, C. W. (2009a). Changes in Rainwater pH associated with Increasing Atmospheric Carbon Dioxide after the Industrial Revolution. *Water, Air, and Soil Pollution*, *196*(1-4), 263-271. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9774-0

Bogan, R. A. J., Ohde, S., Arakaki, T., Mori, I., & McLeod, C. W. (2009b). Changes in Rainwater pH associated with Increasing Atmospheric Carbon Dioxide after the Industrial Revolution. *Water, Air, and Soil Pollution*, *196*(1-4), 263-271. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9774-0

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Castellanza, R., Lollino, P., & Ciantia, M. (2018). A methodological approach to assess the hazard of underground cavities subjected to environmental weathering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *82*, 278-292. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.041

Conil, N., Drif, K., & Lecomte, A. (2024). *Bilan 2024 de l'observatoire de Château-Landon (77)* (Appui No. Ineris-227098-2810423).

Conil, N., Gombert, P., Al Heib, M., Spitzenteder, N., Muller, R., Gaumet, F., & Pajiep, D. (2023). An underground research laboratory at Château-Landon (France) to study the impact of climate change on the stability of abandoned mines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(1), 11. https://doi.org/10.1007/s10064-022-03028-9

Conil, N., Vitel, M., Plua, C., Vu, M. N., Seyedi, D., & Armand, G. (2020). In Situ Investigation of the THM Behavior of the Callovo-Oxfordian Claystone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *53*(6), 2747-2769. https://doi.org/10.1007/s00603-020-02073-8

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, *20*(3), 273-297. https://doi.org/10.1007/BF00994018

De La Vaissière, R., Gerard, P., Radu, J.-P., Charlier, R., Collin, F., Granet, S., Talandier, J., Piedevache, M., & Helmlinger, B. (2014). Gas injection test in the Callovo-Oxfordian claystone : Data analysis and numerical modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, *400*(1), 427-441. https://doi.org/10.1144/SP400.10

Delay, J., Conil, N., & De La Vaissière, R. (2011). Meuse/Haute-Marne underground research center – Technologies and techniques for studying gas flow and thermal properties of an indurated clay-rock. *i-DUST 2010*, 03001. https://doi.org/10.1051/idust/201103001

Didier, ., Al Heib, M., Gombert, P., & Chamoille, A. (2010). *Impact of climate change on the stability of underground cavities : State of knowledge.* (No. INERIS DRS-10–103862–00411). Ineris.

Drif, K. K., Mohmoh, A., & Conil, N. (2025). Automatic Classification of Acoustic Signals for Rockfall Detection in an Abandoned Chalk Mine Using Machine Learning. In I. S. for R. Mechanics & R. E.-N. G. for R. Mechanics (Éds.), *ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2025)*. https://ineris.hal.science/ineris-05312178

Ek, C., Godissart, J., & Verheyden, S. (2020). La teneur en CO2 de l'air des grottes de Wallonie augmente plus vite que celle de l'atmosphère libre—Variations saisonnières, évolution semi-séculaire et flux de CO2. *BSGLg*. https://doi.org/10.25518/0770-7576.6047

Fu, G., Crosbie, R. S., Barron, O., Charles, S. P., Dawes, W., Shi, X., Van Niel, T., & Li, C. (2019). Attributing variations of temporal and spatial groundwater recharge : A statistical analysis of climatic and non-climatic factors. *Journal of Hydrology*, *568*, 816-834. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.022

Gaumet, F., Larrère, F., Guézennec, P., & Chin, P. (2021). *Observatoire souterrain de Château-Landon (77), Carrière « Royer »—Rapport annuel 2021* (Nos. 21-IF-0045). Cerema.

Gombert, P., & Cherkaoui, A. (2011). *Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château- Landon (77) aux XIXe et XXe siècles.* (No. Ineris DRS-11–117680–00812A). Ineris.

Gombert, P., & Cherkaoui, A. (2017). *Analyse comparative entre la carrière effondrée dite Beaulieu et la carrière accessible voisine dite Royer (Château-Landon,77)* (No. Royer (Château-Landon) 77). Ineris.

Hamilton, P. A., & Helsel, D. R. (1995). Effects of Agriculture on Ground-Water Quality in Five Regions of the United States. *Groundwater*, *33*(2), 217-226. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00276.x

Homand, S., & Shao, J. F. (2000). Mechanical behaviour of a porous chalk and effect of saturating fluid. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, *5*(7), 583-606. https://doi.org/10.1002/1099-1484(200010)5:7%253C583::AID-CFM110%253E3.0.CO;2-J

Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (1re éd.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118548387

Kreziak, C., & Cherkaoui, A. (2016). *Château-Landon – Carrière souterraine de Lorroy Visite de site*. Cerema-Ineris.

Lafrance, N. (2016). *Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie* (Numéro 2016LORR0059) [Theses, Université de Lorraine]. https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752257

Liénard AM. (1910, mars 21). *Procès-verbal d'enquête. Effondrement d'une carrière.* 16.

Moiriat, D., Potherat, P., Durville, J. L., & Bebien, J. (2005). Observations sur la fracturation liée à l'incision d'une vallée : Carrière souterraine des Brillants (Hauts-de-Seine). *BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, *258-259*, pp 3-14.

Munoz-Castelblanco, J., Pereira, J. M., Tang, A. M., & Delage, P. (2011). *Comportement de la craie du site de Lorroy*. Ecole ds Ponts Paris Tech/Ineris.

Nadim, C.-E., Klein, E., Occhiena, C., & de Rosny, J. (2013). Surveillance acoustique des cavités à risque de fontis et d'effondrements localisés. *Actes des journées scientifiques AGAP Qualité 2013*, NC. https://ineris.hal.science/ineris-00973709

Négrel, P., & Roy, S. (1998). Chemistry of rainwater in the Massif Central (France) : A strontium isotope and major element study. *Applied Geochemistry*, *13*(8), 941-952. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00029-8

Nolan, B. T., Healy, R. W., Taber, P. E., Perkins, K., Hitt, K. J., & Wolock, D. M. (2007). Factors influencing ground-water recharge in the eastern United States. *Journal of Hydrology*, *332*(1-2), 187-205. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.029

Noury, G., Perrin, J., & Gourdier, S. (2018, juin). ROLE DES INTEMPERIES DANS LES MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AUX CAVITES : RETOUR SUR LA CRISE " LOIRET " JUIN 2016. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*. https://hal.science/hal-01799134

Pajiep, D., Conil, N., Souley, M., & Shao, J.-F. (soumis). Modelling of Saturation Effect on the Mechanical Behaviour of Château-Landon Chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Pajiep, D., Conil, N., Souley, M., Shao, J.-F., Gombert, P., & Xie, S.-Y. (2024). Experimental Investigation of Saturation Effect on the Mechanical Behaviour of Château-Landon Chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *57*(8), 5985-5996. https://doi.org/10.1007/s00603-024-03833-6

Pajiep Ngongang, D. (2024). *Caractérisation expérimentale et modélisation numérique de l'influence de la saturation sur le comportement mécanique de la craie de Château-Landon* (Numéro 2024ULILN009) [Theses, Université de Lille]. https://theses.hal.science/tel-04743601

Renaud, V., Cherkaoui, A., Watelet, J.-M., Gombert, P., & Kreziak, C. (2019). Understanding the instability mechanisms of chalk mines in presence of water (France). In S. A. B. da Fontoura, R. J. Rocca, & J. P. Mendoza (Éds.), *Proceedings in Earth and geosciences* (Vol. 6, p. 2532-2539). CRC Press. https://ineris.hal.science/ineris-03237767

Royer, M. (1926). Excursion du 14 mars 1926. *Bulletin mensuel de l'Association des Naturalistes de la Vallée du Loing*, 17-20.

Sanusi, A., Wortham, H., Millet, M., & Mirabel, P. (1996). Chemical composition of rainwater in Eastern France. *Atmospheric Environment*, *30*(1), 59-71. https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00237-S

Watelet, J.-M., & Kreziak, C. (2010). *Effondrement de Lorroy, Château- Landon (77)* [Note technique]. Ineris.

Watelet, J.-M., Kreziak, C., & Al Heib, M. (2016). Analyse et interrogations liées à l'effondrement de la carrière souterraine de craie de Lorroy en 1910. *8. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2016) "Analyser concevoir et aménager dans la durée"*. https://ineris.hal.science/ineris-01863842

7 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Analyses chimiques des eaux de SD1, SD2 du canal, du Loing, des eaux interstitielles et de la pluie

Annexe 1 : Analyses chimiques des eaux de SD1, SD2 du canal, du Loing, des eaux interstitielles et de la pluie

Unités			°C	°F	Unités pH	µS/cm	mV	°C	%	ppm DO
Echantillon	**Sample ID**	**Date**	**Température de l'eau sur site**	**Titre Alcalimétrique complet (TAC)**	**pH à T°C**	**Conductivité à 25°C**	**Potentiel redox Brut éluat**	**Température**	**Pourcentage d'oxygène dissous**	**Concentration d'oxygène dissous**
Canal du Loing	CL_22	01/06/22			7.6	481	120			
Loing	L_22	01/06/22			7.43	531	137			
SD1	SD1_22	01/06/22			6.77	852	171			
SD2	SD2_22	01/06/22			6.72	509	166			
Eau interstitielle -entrée	EP_24_01	01/03/24			8.4					
Canal du Loing	CL_24	01/10/24	10	19	8	557	358	18		
Loing	L_24	01/10/24	10	18.2	7.9	557	355	18.1		
SD1	SD1_24	01/10/24	10	27	7.4	852	354	20.9		
SD2	SD2_24	01/10/24	10	19.8	7.5	535	359	21		
Eau interstitielle - entrée	EP_24_02	01/10/24								
Eau interstitielle - pilier	EP_24_03	01/10/24								
Loing	L_25	01/07/25			8.32	585	234	24.7	87.9	7.32
Canal du Loing	CL_25	01/07/25			8.03	512	223.1	24.7	92	7.26
SD1	SD1_25	01/07/25			6.91	827	145.5	21.99	49.3	4.29
SD2	SD2_25	01/07/25			7.24	530	203.7	16.8	4.5	0.44
Eau interstitielle - pilier	EP_25_01	01/07/25								
Eau interstitielle - entrée	EP_25_02	01/07/25								
Negrel et Roy (1998)	RW1	31/12/98			5.55	9.15				
Negrel et Roy (1998)	RW2	31/12/98			6.2	14.6				
Negrel et Roy (1998)	RW3	31/12/98			6.05	51.6				
Negrel et Roy (1998)	RW4	31/12/98			6.04	7.06				
Negrel et Roy (1998)	RW5	31/12/98			5.76	7.85				
Sanusi et al (1995) ,Negrel et Roy (1998)	MeanRW	31/12/98								
Sanusi et al (1995) ,Negrel et Roy (1998)	MedRW	31/12/98								

Unités			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg /l	mg/l	mg/l	mg /l
Echantillon	**Sample ID**	**Date**	**Calcium (Ca)**	**Magnésium (Mg)**	**Sodium (Na)**	**Potassium (K)**	**Hydrogénocarbonates (HCO3)**	**Sulfates (SO4)2-**	**Chlorures (Cl)**	**Nitrate**
Canal du Loing	CL_22	01/06/22	88.1	2.7	16.5	3.5	232.5	16.3	27.6	14.7
Loing	L_22	01/06/22	106.1	2.7	14.7	3.1	279.5	15.9	26.5	27.3
SD1	SD1_22	01/06/22	177.8	6.7	11.3	1.4	359.4	35.3	36.8	137.8
SD2	SD2_22	01/06/22	100.5	3.1	15.5	4.7	267.3	17.4	23.7	10
Eau interstitielle -entrée	EP_24_01	01/03/24	64.7	15.8	30.3	11.4		18.4	61.5	5.95
Canal du Loing	CL_24	01/10/24	88.3	2.44	10.6	3.77	232.07	21.8	21.4	31.3
Loing	L_24	01/10/24	88.2	2.52	7.87	3.81	222.37	28.6	19.2	35.5
SD1	SD1_24	01/10/24	142	5.46	7.6	0.95	329.53	38	25.7	91.7
SD2	SD2_24	01/10/24	87.5	2.45	10.7	3.91	241.5	20.1	21.6	16.7
Eau interstitielle - entrée	EP_24_02	01/10/24	34.1	18.6	19.3	19.3	<341			
Eau interstitielle - pilier	EP_24_03	01/10/24	94.4	57.6	36.7	111	<426			
Loing	L_25	01/07/25								
Canal du Loing	CL_25	01/07/25								
SD1	SD1_25	01/07/25								
SD2	SD2_25	01/07/25								
Eau interstitielle - pilier	EP_25_01	01/07/25	142	23	70.4	149	<200	321	170	84.6
Eau interstitielle - entrée	EP_25_02	01/07/25	36.6	23.6	18.4	9.88		3.31	40.5	5.07
Negrel et Roy (1998)	RW1	31/12/98	0.3206	0.04132	0.08966	0.1017	1.586	1.547	0.2517	2.152
Negrel et Roy (1998)	RW2	31/12/98	0.5891	0.05104	0.2092	0.2815	1.464	1.902	0.5992	
Negrel et Roy (1998)	RW3	31/12/98	3.158	0.1021	0.4598	0.9306	9.763	4.601	1.099	2.542
Negrel et Roy (1998)	RW4	31/12/98	0.6693	0.04618	0.09886	0.08993	1.769	0.903	0.3014	0.7999
Negrel et Roy (1998)	RW5	31/12/98	0.2284	0.09965	0.9909	0.08993	1.037	1.268	0.8012	1.203
Sanusi et al (1995), Negrel et Roy (1998)	MeanRW	31/12/98	0.7433	0.1052	0.5182	0.5502	3.124	2.803	1.46	2.709
Sanusi et al (1995), Negrel et Roy (1998)	MedRW	31/12/98								2.294

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata • BP 2 • F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 • ineris@ineris.fr • www.ineris.fr