

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE QUELQUES CRAIES MISES EN ŒUVRE POUR LA CONSTRUCTION À ARRAS. INTÉRÊT DU SCLÉROMÈTRE DE SCHMIDT EN PREMIÈRE APPROCHE

*Physical and mechanical properties of some chalks used for construction in Arras.
Usefulness of the Schmidt sclerometer as a first approach*

Christian David

Institut des Sciences de la Terre Paris – IStEP – UMR 7193, CY Cergy Paris Université – Sorbonne Université – CNRS-INSU. Maison Internationale de la Recherche (MIR), 1 rue Descartes, 95000 Neuville-sur-Oise
christian.david@cyu.fr

Françoise Bergerat - **Auteur correspondant**

Institut des Sciences de la Terre Paris – IStEP – UMR 7193, CNRS-INSU – Sorbonne Université – CY Cergy Paris Université. Campus Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, case 129, 75252 Paris Cedex 05.
francoise.bergerat@sorbonne-universite.fr

Mathieu Béghin

Service Archéologique Municipal d'Arras (SAM), 1 rue de Berlin, 62000 Arras. HARTIS, Université de Lille – CNRS – Ministère de la Culture – INRAP – UMR 9028
m-beghin@ville-arras.fr

Benjamin Mulon

Institut des Sciences de la Terre Paris – IStEP – UMR 7193, CY Cergy Paris Université – Sorbonne Université – CNRS-INSU. Maison Internationale de la Recherche (MIR), 1 rue Descartes, 95000 Neuville-sur-Oise
mulonbenjamin@gmail.com

Résumé

Exploitée en carrières souterraines dans le bassin arrageois, la craie tient une place importante dans le patrimoine de la ville, où elle a été employée pour la construction de nombreux bâtiments. Des moellons de craie provenant de fouilles archéologiques ont fait l'objet de tests physiques et mécaniques, d'une part afin d'évaluer les propriétés des craies qui avaient été utilisées pour ces constructions et de mieux comprendre leur comportement et, d'autre part, pour essayer de différencier ces craies les unes des autres sur la base de ces caractéristiques. Deux groupes de craies ont été distingués, essentiellement sur la base des essais mécaniques, les unes tendres où la résistance à la compression uniaxiale est inférieure à 10 MPa, les autres plus résistantes avec des valeurs de l'ordre de 16 MPa. Les données pétrophysiques ne permettent pas de différencier ces deux groupes à l'exception d'une conductivité thermique plus importante pour le second groupe. Parallèlement, la calibration d'un scléromètre de Schmidt sur des roches sédimentaires a été réalisée à partir de nouveaux essais et de données de résistances existantes. L'ensemble des tests sclérométriques montre que l'emploi de cet appareil permet une première approche satisfaisante pour discriminer des groupes de craies de résistances différentes.

Abstract

Extracted from underground quarries in the Arras basin, chalk plays an important place in the city's heritage, where it has been used for the construction of numerous buildings. Chalk blocks from archaeological excavations underwent physical and mechanical testing, on the one hand to evaluate the properties of the chalks used in these constructions and to better understand their behavior, and on the other hand to try to differentiate these chalks from one another based on these characteristics. Two groups of chalk were distinguished, mainly based on mechanical tests: one soft group, with a uniaxial compressive strength lower than 10 MPa, and a stronger group, with values on the order of 16 MPa. The petrophysical data do not allow for differentiation between these two groups, except for a higher thermal conductivity in the second group. In parallel, the calibration of a Schmidt sclerometer on sedimentary rocks was carried out using new tests and existing strength data. All of the sclerometric tests show that this device provides a satisfactory initial approach for distinguishing groups of chalk with different strengths.

INTRODUCTION

Arras (Hauts-de-France) est caractérisée par un patrimoine naturel, architectural et historique particulièrement riche, fortement lié à l'histoire de son urbanisme bicéphale avec d'un côté l'édification de la cité antique de *Nemetacum*

au début du I^{er} siècle et la restauration de l'évêché à la fin du XI^e siècle et, de l'autre, l'établissement de l'Abbaye Saint-Vaast au VII^e siècle et le développement du bourg monastique à partir du IX^e siècle. Les deux noyaux, Arras-Cité et Arras-Ville, évoluèrent distinctement (Jacques *et al.*, 2019) jusqu'à

leur réunion concrétisée par Louis XV en 1749 (Béghin & Bray, 2024). La craie a une place importante dans ce patrimoine à travers les carrières souterraines, exploitées du X^e siècle au XVIII^e siècle (Béghin *et al.*, 2021) pour la construction des bâtiments arrageois puis utilisées pour leur rôle stratégique durant la Grande Guerre (Girardet *et al.*, 2003; Bergerat *et al.*, 2015).

Malheureusement une grande partie des archives de la ville d'Arras, et plus généralement des archives départementales du Pas-de-Calais, fut détruite lors de ce premier conflit mondial. Elles étaient alors installées au Palais Saint-Vaast dont le 1^{er} étage fut dévasté par les bombardements allemands dès 1914 et dont la principale destruction est due au bombardement du 5 juillet 1915. Celui-ci provoqua un incendie qui fit rage pendant deux jours (Vigne, 1916), dévorant les archives encore en place, la bibliothèque – à

l'exception des manuscrits mis à l'abri par le personnel des archives –, le Musée et les collections de l'Académie d'Arras. Celles des archives anciennes d'Arras qui ont pu être sauvées furent évacuées et envoyées dans des dépôts temporaires : aux Archives nationales à Paris ainsi qu'à Boulogne-sur-Mer, à Montreuil-sur-Mer et aux archives départementales de la Haute-Garonne à Toulouse (Archives départementales du Pas-de-Calais, sans date).

La disparition des archives a entraîné une perte importante d'informations patrimoniales. Les campagnes de fouilles archéologiques engagées depuis plusieurs années, complétées par l'étude de sources diverses (comptabilités de travaux, actes notariés, etc.) permettent de combler en partie ces manques et ainsi de documenter et comprendre le passé d'Arras (Jacques *et al.*, 2019; Béghin *et al.*, 2021, 2026). Lors des investigations archéologiques, des blocs de roche

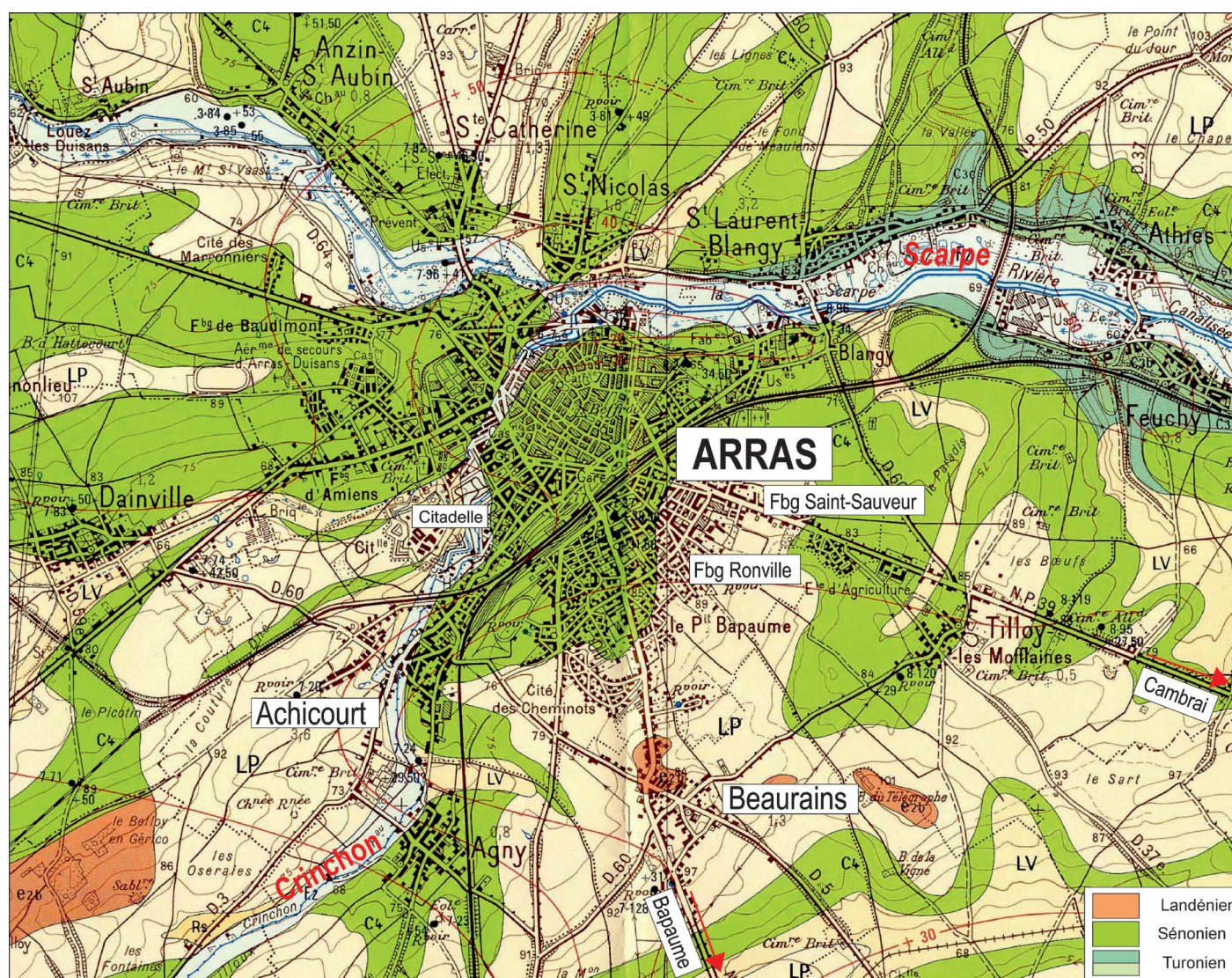


Fig. 1. Principaux lieux d'extraction de la craie coniacienne aux alentours d'Arras. Fond géologique BRGM (extrait de la feuille Arras à 1/50 000; Delattre, 1968). Sur cette carte, ainsi que sur les autres cartes géologiques régionales, le Coniacien et le Santonien sont groupés sous le nom de Sénonien, ancien étage dont ils représentent la partie inférieure.

Fig. 1. Main extraction sites of Coniacian chalk around Arras. BRGM geological background (extract from the Arras sheet at 1:50,000; Delattre, 1968). On this map, as well as on other regional geological maps, the Coniacian and the Santonian are grouped under the name Senonian, an ancient stage of which they represent the lower part.

ont été prélevés et soigneusement stockés. Une large partie d'entre eux étant inscrits à l'inventaire de la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles), il était exclu de les détériorer pour réaliser des essais mécaniques destructifs et nous n'avons pu réaliser que quelques essais non destructifs sur place (dans les carrières et au service archéologique d'Arras). Par la suite, il a été possible de travailler sur quelques blocs non-inscrits à l'inventaire et qui ont pu être apportés à Cergy pour y réaliser des analyses plus poussées, physiques et mécaniques, dans le but (i) d'évaluer les propriétés des craies prélevées et de mieux comprendre leur comportement, mais aussi (ii) d'essayer de distinguer ces craies les unes des autres sur la base de ces caractéristiques.

La craie coniacienne et santoniennne est le principal matériau géologique en surface et en subsurface dans la région d'Arras. Craie très blanche, fine, tendre et traçante, avec ou sans silex suivant les niveaux, elle a été utilisée comme pierre à bâtir depuis l'Antiquité. La craie turonienne sous-jacente apparaît en fond de vallée de la Scarpe à l'est d'Arras et au nord dans le secteur de Vimy – Souchez ; elle a surtout servi à la fabrication de chaux et à l'amendement des sols pour l'agriculture (Delattre, 1968). Le bassin carrier d'Arras (Fig. 1) s'appuie au sud sur la vallée du Crinchon et au nord sur celle de la Scarpe, dont le cours est navigable depuis le début du XVII^e siècle, offrant ainsi des débouchés vers la Flandre. Il se développe vers l'est et le sud sur plus de deux kilomètres, en suivant les routes de Cambrai et Bapaume, qui constituaient également des axes de transport pour alimenter notamment les chantiers de constructions urbains (Bergerat *et al.*, 2015).

Un recensement des cavités souterraines, réalisé en 2018 et publié en 2023 par la Préfecture du Pas-de-Calais, faisait état de 813 cavités de différentes natures sur les communes d'Arras, Achicourt et Beaurains, 62 % d'entre elles étant d'origine inconnue (Préfecture du Pas-de-Calais, 2023). Parmi celles dont la nature était certaine on comptait 38 exploitations par chambres et piliers à Arras, 14 à Achicourt et 5 à Beaurains. Ces chiffres n'étaient cependant fondés que sur l'étude des archives civiles et militaires, d'autres cavités ont été découvertes depuis – en particulier lors d'opérations archéologiques récentes (*cf. infra* et Béghin *et al.*, 2026) – montrant que leur nombre peut être largement revu à la hausse.

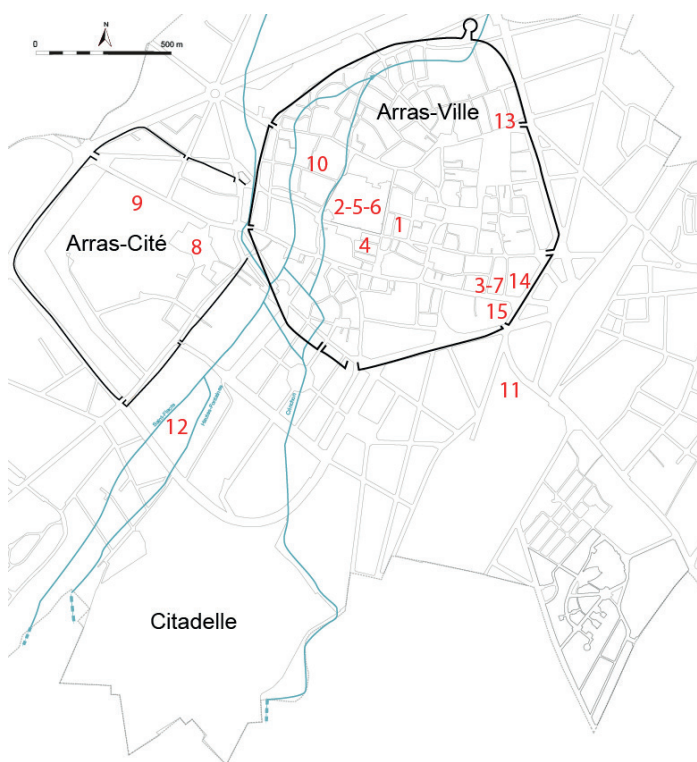
PRÉSENTATION DES BLOCS DE CRAIE ÉTUDIÉS

Une étude préliminaire, en 2023, a porté sur (i) des moellons de craie, utilisés comme pierres d'appareillage ou d'ornementation, provenant des fouilles de six sites arrageois et conservés dans les sous-sols du service archéologique (8 blocs) et (ii) des moellons en place dans les confortations des carrières souterraines (ou boves) de la rue Saint-Denis et de l'Abbaye Saint-Vaast (5 blocs) (Fig. 2).

L'origine de la craie – quand elle est connue ou supposée – est indiquée dans le tableau 1. Tous les moellons ont fait l'objet de mesures non destructives au scléromètre permettant d'estimer la résistance à la compression de la roche. Pour ne pas surcharger le texte, les moellons étudiés à Arras en 2023 sont ci-après désignés par un acronyme. Il faut se reporter au tableau 1 pour leur localisation.

Fig. 2. Localisation des moellons étudiés, en place dans les confortations des carrières souterraines de la rue Saint-Denis (1) et de l'Abbaye Saint-Vaast (2) et extraits des fouilles archéologiques du n° 42 de la rue Gambetta (3), du n° 1 de la rue du Conseil (4), de l'Abbaye Saint-Vaast rue Paul Doumer (5) et square Albert 1^{er} (6), de l'église Saint-Jean-en-Ronville (7), de l'ancienne cathédrale d'Arras place de la Préfecture (8), de l'Hôtel d'Hooghstraeten, rue Baudimont (9), des n° 6-10 de la rue du Bloc (10), de l'îlot Bergaigne (11), de la friche du Gouverneur (12), des n° 59-65 Grand'Place (13), de l'îlot 13 rue Pasteur – 12 rue du Saumon (14) et du 13-15 rue Gambetta (15). Les enceintes médiévales d'Arras-Ville et Arras-Cité sont reportées sur le plan. Les traces anciennes du Crinchon (maintenant souterrain à 95 % sur le territoire d'Arras) et de ses affluents, les ruisseaux Saint-Fiace et des Hautes-Fontaines sont indiquées (en bleu) comme repères. Fond cartographique SAM.

Fig. 2. Location of the studied chalk blocks, in place in the reinforcements of the underground quarries under Saint-Denis street (1) and Saint-Vaast Abbey (2) and extracted from archaeological excavations at no. 42 Gambetta street (3), no. 1 Conseil street (4), Saint-Vaast Abbey Paul Doumer street (5) and Albert 1^{er} square (6), church of Saint-Jean-en-Ronville (7), former Arras cathedral Préfecture place (8), Hooghstraeten Mansion, Baudimont street (9), nos. 6-10 Bloc street (10), Bergaigne city block (11), Governor's wasteland (12), nos. 59-65 Grand'Place (13), no. 13 Pasteur street – no. 12 Saumon street city block (14) and nos. 13-15 Gambetta street (15). The medieval walls of Arras-Ville and Arras-Cité are marked on the map. The former courses of the Crinchon (now 95 % underground in Arras) and its tributaries, the Saint-Fiace and Hautes-Fontaines streams, are shown (in blue) as landmarks. SAM map background.



Acronyme	Localisation	N° sur Fig. 2	Mesure verticale ou horizontale	I_R moyen (et médian)	Écart-type	UCS moyenne (et médiane)	Écart-type	Provenance de la craie
BOV-SD	Boves rue Saint-Denis (blocs en place dans confortations)	1						ré-exploitation sur place ou carrières des faubourgs Ronville et Saint-Sauveur
	Bloc1		H	22,4 (23)	5,1	14,5 (15,1)	5,3	
	Bloc2		H	22,2 (24)	4,3	14,3 (16,1)	4,4	
BOV-SV	Boves Abbaye Saint-Vaast (blocs en place dans confortations)	2						inconnue
	Bloc1		H	28 (29)	3,8	20,3 (21,3)	3,9	
	Bloc2		H	24,9 (24)	2,3	17 (16,1)	2,4	
	Bloc3		H	28,7 (30)	3,6	21 (22,3)	3,7	
STRA	Hôtel d'Hooghstraeten, rue Baudimont, 1 ^{er} quart du XVI ^e siècle	8						inconnue
	Bloc 1		H	31,2 (33)	7,8	23,5 (25,4)	7,9	
RON	Église Saint-Jean-en-Ronville, fin XII ^e siècle	7						inconnue
	Bloc 1		V	28,1 (28)	3,3	25,1 (25)	3,8	
	Bloc 2		V	28,6 (29,5)	5,3	25,7 (26,7)	6,1	
GAM-42	Cave du XIII ^e siècle, 42 rue Gambetta	3						probablement carrières des faubourgs Ronville et Saint-Sauveur
	Bloc 1		V	22,9 (22,5)	5,1	19,1 (18,7)	5,9	
	Bloc 2		V	22,1 (22)	4,1	18,2 (18,1)	4,7	
CATH	Ancienne cathédrale d'Arras, place de la Préfecture, XII ^e -XVI ^e s.	8						inconnue
	Bloc 1		V	30,4 (30)	4,5	27,8 (27,3)	5,2	
CONS	Mur de fortification, 1 rue du Conseil, X ^e s.	4						carrières sous Arras
	Bloc 1		H	21,2 (21)	4,7	13,2 (13)	4,8	
PSV-PD	Palais Saint-Vaast, rue Paul Doumer (reconstruction du XVIII ^e s.)	5						ré-utilisation des pierres de l'abbaye médiévale
	Bloc1		V	21,6 (21)	3,5	17,7 (17)	4	

Tableau 1. Essais au scléromètre sur des moellons de craie utilisés dans les confortations des carrières sous la ville et issus de diverses fouilles à Arras. La valeur de la résistance à la compression (UCS) a été évaluée individuellement pour chaque mesure d' I_{RV} ou d' I_{RH} , en utilisant les formules des abaques (cf. Fig. 7). Le tableau indique la moyenne, la médiane et l'écart-type des I_R et des UCS pour chaque bloc.

Table 1. Sclerometer tests on chalk blocks used in the reinforcement of quarries beneath the city and from various excavations in Arras. The compressive strength value (UCS) was assessed individually for each I_{RV} or I_{RH} measurement, using the formulas from the charts (see Fig. 7). The table shows the mean, median, and standard deviation of the I_R and UCS for each block.

Par la suite, huit blocs de craie issus de sites de fouilles réalisées récemment, à l'intérieur de la ville actuelle (Tabl. 2 ; Fig. 2), ont été fournis pour une étude plus complète au laboratoire ISTeP à Cergy. Ces blocs sont ci-après désignés par le numéro de l'unité d'enregistrement (UE) dans laquelle ils ont été prélevés ; par exemple, le bloc appelé ici « UE 04 » est un des blocs prélevés dans l'unité d'enregistrement UE 04 du C.2022. Il faut se reporter au tableau 2 pour la localisation des fouilles correspondantes ainsi que leurs codes SAM et Patriarche. Les essais ont été réalisés en 2025 et incluent non seulement des tests au scléromètre, comme pour les échantillons étudiés en 2023, mais surtout divers essais destructifs et non destructifs en laboratoire (Mulon, 2025). Dans ce but, plusieurs éprouvettes cylindriques ont été prélevées sur chaque bloc à l'aide d'une carotteuse. Des éprouvettes (deux par bloc) de longueur ~50 mm et de diamètre ~25 mm ont fait l'objet d'essais de compression simple à la presse uniaxiale (norme ASTM D7012). Des éprouvettes plus petites ($L \sim 13$ mm, $D \sim 25$ mm) ont également été préparées pour la réalisation d'essais brésiliens (essais de traction indirecte ; norme ASTM D3967).

Il faut noter que, d'une manière générale, le comportement très cassant de la craie a rendu sa manipulation et sa préparation particulièrement délicates.

Code SAM	Code Patriarche	Localisation	N° sur Fig. 2	UE	Datation UE
G.2021	159204	13-15 rue Gambetta	15	19	XIV ^e siècle
C.2022	159356	Abbaye Saint-Vaast (Parking Albert 1 ^{er})	6	04	XVIII ^e /XIX ^e siècle
G.2022	159492	6-8-10 rue du Bloc	10	4009	XVI ^e siècle
E.2023	159622	59-65 Grand' Place	13	1043	XIX ^e siècle
I.2023	159729	Îlot Bergaigne – phase 2	11	1032	XVII ^e siècle
C.2024	159748	Rue Pasteur et rue du Saumon	14	1017	XV ^e siècle
C.2024	159748	Rue Pasteur et rue du Saumon	14	2030	XIII ^e /XV ^e siècle
H.2024	159802	Esplanade du gouverneur (friche militaire)	12	3007	XVII ^e siècle

Tableau 2. Moellons étudiés au laboratoire, issus de fouilles réalisées

entre 2021 et 2024 à Arras et leur référencement archéologique. Code SAM : identifiant d'une opération du Service Archéologique Municipal d'Arras ; Code Patriarche : identifiant national de la même opération archéologique ; UE = unité d'enregistrement (niveau d'observation et d'échantillonnage).

Table 2. Chalk blocks studied in the laboratory, from excavations carried out between 2021 and 2024 in Arras, and their archaeological referencing. SAM code: identifier of an operation of the Arras Municipal Archaeological Service; Patriarche code: national identifier of the same archaeological operation; UE = recording unit (level of observation and sampling).

Ces craies présentent quelques variations lithologiques visibles à l'œil nu (Fig. 3). Ainsi, le bloc UE 04 présente une coloration grise contrastant avec la teinte blanche des autres échantillons, les blocs UE 1032, UE 1017 et UE 19 montrent de petites hétérogénéités : structures laminées, micro-fractures, litage et le bloc UE 3007 contient une veine de silex qui constitue une hétérogénéité mécanique importante. Les autres blocs apparaissent plus homogènes et sans structure macroscopique particulière. Ces variations perceptibles dans les blocs ne suffisent pas à attribuer les craies à tel ou tel niveau de la série sénonienne, ceux-ci pouvant seulement être reconnus, à l'échelle macroscopique, grâce aux niveaux repères (lits marneux, lits de silex tabulaires, *hardgrounds*...) ou aux fossiles (ammonites, inocérames...) quand ils en contiennent (e.g. Amédéo & Bergerat, 2024 ; Amédéo *et al.*, 2025).

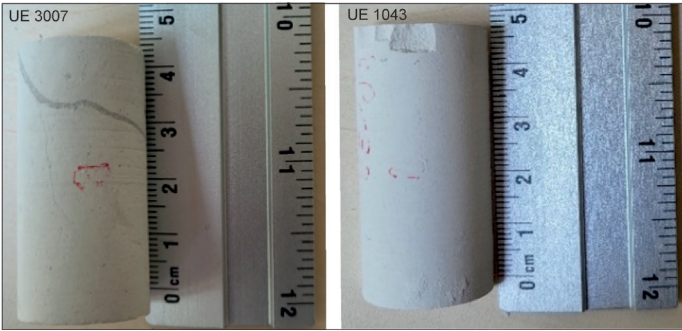


Fig. 3. Exemples d'échantillons préparés pour les essais mécaniques (carottes de diamètre ~25 mm et de longueur ~50 mm). L'échantillon UE 3007 inclut une petite veine siliceuse, ce qui entraîne une hétérogénéité mécanique notable ; l'échantillon UE 1043 est homogène et ne présente pas d'hétérogénéité d'ordre macroscopique. Clichés B. Mulon. Fig 3. Examples of samples prepared for mechanical testing (cores with a diameter of ~25 mm and a length of ~50 mm). Sample UE 3007 includes a small siliceous vein, resulting in significant mechanical heterogeneity; sample UE 1043 is homogeneous and does not exhibit any macroscopic heterogeneity. Photos B. Mulon.

Les rapports de fouille très détaillés fournissent les renseignements sur le contexte dans lequel les blocs ont été prélevés. Ils sont juste rappelés brièvement ci-dessous :

- ✧ Un diagnostic d'archéologie préventive a été réalisé en 2019, motivé par un projet de construction d'un bâtiment d'habitation et commercial, au 42 rue Gambetta, et visant à étudier l'emprise de l'ancienne église Saint-Jean-en-Ronville (Béghin *et al.*, 2019). Une première occupation du site, artisanale, a été datée entre la fin du X^e siècle et le

début du XII^e siècle, puis le lieu a été reconverti avec l'installation d'une chapelle et ensuite d'un terrain sépulcral. La construction de l'église date de la fin du XII^e-début du XIII^e siècles. Les blocs RON proviennent de cette église, les blocs GAM-42 (cave) sont aussi attribués à la deuxième phase d'occupation au début du XIII^e siècle. Une troisième phase d'occupation correspond au fonctionnement de l'église (XIV^e-XVIII^e siècles). Le démantèlement de l'édifice à la fin du XVIII^e siècle a entraîné la récupération de matériau pour revente, le site fut ensuite réaménagé en demeure civile (Béghin *et al.*, 2019).

✧ Le bloc CATH provient d'un diagnostic d'archéologie préventive réalisé en 2021 à l'occasion du renouvellement de la ligne de basse tension, entre le Conseil Général et la boîte de raccordement située place de la Préfecture. Malgré son exigüité, la tranchée de fouille a montré deux massifs maçonnés et neuf fondations des travées délimitant la partie méridionale de l'ancienne cathédrale, complétant ainsi les résultats de fouilles antérieures, ce qui a permis d'estimer l'emprise totale de la cathédrale gothique (Fautrez *et al.*, 2022). Celle-ci a été mise en chantier vers 1160 et les travaux se sont échelonnés sur quatre siècles; désaffectée et vandalisée à partir de 1792, elle fut vendue en 1799 à des spéculateurs qui la démolirent pour vendre les pierres.

✧ Le bloc STRA provient des fouilles de la cave voûtée de l'ancien hôtel d'Hooghstraeten, rue Baudimont. Quelques colonnes avec chapiteaux en ont été extraites. Cet hôtel nobiliaire datait du XVI^e siècle et devint, au XVII^e siècle, propriété des Brigittines. Il fut démoli à partir de la fin du XVIII^e siècle (Fautrez & Jacques, 2004). Il est évoqué dans le rapport de diagnostic du 51 rue Baudimont, mais il n'y a aucun rapport concernant l'intervention archéologique elle-même.

✧ Le bloc CONS a été prélevé lors d'un diagnostic d'archéologie préventive réalisé en 2020, en amont d'un projet de construction d'un immeuble au 1 rue du Conseil. Le site montre une première occupation civile au X^e siècle (sols), suivie d'une militarisation avec l'installation d'un mur de fortification maçonné en grès et en craie (Béghin *et al.*, 2020). La construction d'un périmètre fortifié plus vaste au XII^e siècle et la réorganisation du quartier au XIII^e siècle, rendant inutile la fortification passant par la parcelle de la rue du Conseil, a conduit au démantèlement de cette fortification et a laissé place à une aire de cour et jardin.

✧ La perspective d'une large rénovation des bâtiments du Palais Saint-Vaast et le projet de création d'un centre culturel, ont amené à effectuer un diagnostic, en 2013 et 2014, sur l'emprise de ces projets rue Paul Doumer. Le Palais Saint Vaast est un vaste ensemble monumental qui a

été construit au XVIII^e siècle sur l'emplacement de l'abbaye royale fondée au VII^e siècle et qui fut entièrement rasée au XVIII^e siècle. Une campagne de trois sondages dans la cour du puits a révélé des vestiges datant des différentes époques d'occupation, la première correspondant à un état antérieur à l'édifice du XIII^e siècle (Henry, 2016). Les 5 000 m² d'emprise estimés de l'abbatiale gothique ont été largement amputés par les caves de l'édifice actuel. Le bloc PSV-PD correspond à une réutilisation des pierres de l'abbaye médiévale dans la construction du XVIII^e siècle.

✧ L'UE 04 provient d'un diagnostic d'archéologie préventive réalisé en 2022 à l'occasion du projet de construction d'un local technique souterrain pour climatisation dans le talus des parkings haut et bas de l'Abbaye Saint-Vaast (square Albert 1^{er}). Quatre phases d'occupation ont été distinguées lors l'opération, les deux premières, liées à l'abbaye bénédictine puis à l'installation de la vie conventuelle, remontent au X^e siècle; la 3^e phase correspond à la reconstruction de l'établissement monastique au XVIII^e siècle, enfin divers niveaux de remblais de démolition, liés à la Première Guerre mondiale, se succèdent directement sous la couche végétale (Béghin *et al.*, 2022). L'UE 04 correspond au comblement de la fosse-dépotoir 98-06; il s'agit d'une couche sableuse jaune-ocre, hétérogène riche de fragments calcaires, de tessons de céramique et de terres cuites architecturales; la datation par le mobilier céramique indique un âge XVIII^e-XX^e. On est probablement en présence d'une des fosses dépotoirs installés par l'armée britannique à Arras durant la Première Guerre mondiale. Lors d'une fouille postérieure, en 2025, sur une autre parcelle du site, quatre carrières à ciel ouvert ont été mises au jour, elles seraient liées à la reconstruction de l'abbaye au début du XI^e siècle; un four de verrier de cette époque et une fosse de décantation de l'argile, tous les deux liés aux travaux, ont d'ailleurs été mis au jour. Ces découvertes sont à mettre en lien avec un four à chaux daté de la fin du X^e siècle mis au jour en 1999 à dix mètres de là (Béghin *et al.*, 2025). La craie qui était extraite n'était pas de bonne qualité et était utilisée pour l'intérieur des murs ou pour la fabrication de la chaux.

✧ L'UE 1043 appartient à un site occupé en continu depuis le Moyen Âge et étudié en raison d'un projet de construction sur la Grand'Place dans l'enceinte de l'ancien Office culturel de la ville. Trois phases principales ont été reconnues: la première occupation est antérieure au XV^e siècle, puis, au cours de la période moderne, les niveaux de remblais médiévaux furent creusés par l'installation de maçonneries en moellons de craie et/ou en briques ou de radiers, formant des caves, les fondations et la crypte funéraire de l'église et les sols du couvent des Carmes Déchaussés d'Arras. Au cours du XIX^e siècle, le

site vit l'installation d'un château d'eau, d'une seconde cave et de sols de cours recouvrant ou creusant les structures d'époque moderne. Enfin, après les destructions subies entre 1914 et 1918, les bâtiments et structures situés dans les tranchées de diagnostic de l'Office culturel ont été remblayés ou arasés et laissèrent la place à un niveau de sol constitué de ciment, lui-même recouvert par des gravats et une couche d'asphalte dans le courant de la seconde moitié du XX^e siècle. Le bloc UE 1043 correspond au remblaiement d'un escalier (UEs 1053/1081) par du mortier mêlé d'éclats de briques et de fragments de calcaire ; le comblement date du XIX^e siècle, mais les fragments de pierre eux-mêmes dateraient des XVI^e/XVIII^e siècles (Legrand *et al.*, 2024).

✧ L'UE 4009 se situe dans une des tranchées de sondage réalisées au 6-8-10 rue du Bloc dans le cadre d'un projet de rénovation et de construction de logements collectifs. Situé entre deux branches du Crinchon, le lieu se situe en zone humide ; celle-ci a été partiellement asséchée et rehaussée dès le X^e siècle, mais ne fut réellement lotie qu'au XIII^e siècle. À la fin du XVII^e siècle, d'épais niveaux de remblais traduisent une volonté de faire table rase des occurrences anciennes (Speurt *et al.*, 2023). L'UE 4009 est représentée, au sein du sondage 04, par des maçonneries reposant sur un sol calcaire damé qui surmonte un limon du XV^e siècle. Malheureusement le bloc UE 4009 n'a pu être utilisé, en raison de ses dimensions insuffisantes (bloc trop petit et trop mince pour être usiné).



Fig. 4. Fouille Îlot Bergaigne. Vue depuis l'ouest de la structure 1032 (d'après Béghin *et al.*, 2024, p. 67). Cliché M. Béghin.

Fig 4. Bergaigne city block excavation. View from the west of structure 1032 (from Béghin *et al.*, 2024, p. 67). Photo M. Béghin.

✧ La structure 1032 a été investiguée en 2023, lors de la 2^e phase de diagnostic de l'îlot Bergaigne qui a mis au jour trois grandes phases d'occupation du site (Béghin *et al.*, 2024) avec, tout d'abord, plusieurs structures d'extraction du limon et de la craie, comblées et scellées par l'installation d'une décharge communale au XIII^e siècle. Puis un faubourg prend place autour d'une voirie, il subsiste jusqu'au XVII^e siècle, dès lors l'occupation persiste tout

en devenant beaucoup plus lâche, avec un redécoupage parcellaire au XVIII^e-XIX^e siècles. Les éléments maçonnés mis au jour montrent l'installation d'un four à chaux au XVIII^e siècle (Béghin *et al.*, 2024) ; un autre four, daté des XVII^e-XVIII^e siècles a été mis au jour lors de la fouille du site pendant l'été 2025 ; de nombreuses galeries d'extraction de la craie et des boves ont été retrouvées ainsi qu'une demi-douzaine de puits de carrières (jusqu'à 12 m de profondeur avec deux niveaux d'exploitation) ouvrant sur des salles à piliers, voire des galeries en eau. Enfin, la dernière phase d'occupation, depuis le XIX^e siècle, est marquée par l'industrialisation du site, liée à l'installation de la gare ferroviaire entre 1843 et 1846. La structure 1032 (Fig. 4) est un « ensemble de trois maçonneries calcaires montées au mortier de chaux et de sable [situé à] 1,98 m sous le niveau de circulation de la rue Abel Bergaigne » et correspondrait à une cave ou un cellier. Il est comblé d'un limon marron clair riche en cassons de briques et moellons calcaires dont plusieurs éléments céramiques suggèrent une datation au XVII^e siècle.

✧ Les UE 1017 et UE 2030 sont incluses dans un diagnostic archéologique effectué en 2024 dans le cadre d'un projet de réhabilitation en résidence senior d'un ancien couvent de sœurs augustines, situé au 13 rue Pasteur et 12 rue du Saumon. Un premier projet ayant été abandonné en 2021, un nouveau diagnostic fut réalisé (Bray *et al.*, 2024). Quatre tranchées de sondage ont révélé quatre phases d'occupation du site, la première entre les X^e et XIII^e siècles, suivie par une pétrification de l'occupation aux XIII^e et XIV^e siècles. Une importante phase de reconstruction de l'hôtel particulier occupant les lieux prend place au XVII^e siècle, tandis que XIX^e et XX^e siècles sont marqués par l'installation du couvent des sœurs augustines et la Première Guerre mondiale. Le bloc UE 1017 provient d'un niveau de remblaiement du XV^e siècle fait d'un limon, brun, meuble et hétérogène (Fig. 5). Le bloc UE 2030 correspond à un élément de maçonnerie composite qui comprend « en partie supérieure deux assises de blocs calcaires taillés de gros appareils maintenus et renforcés par un blocage de moellons calcaires » et en dessous une assise de blocs de grès (Fig. 6). Le mobilier archéologique découvert lors de la mise au jour de cette maçonnerie s'inscrit au XVII^e siècle, la maçonnerie pouvant appartenir aux bâtiments visibles sur le plan-relief de 1716.

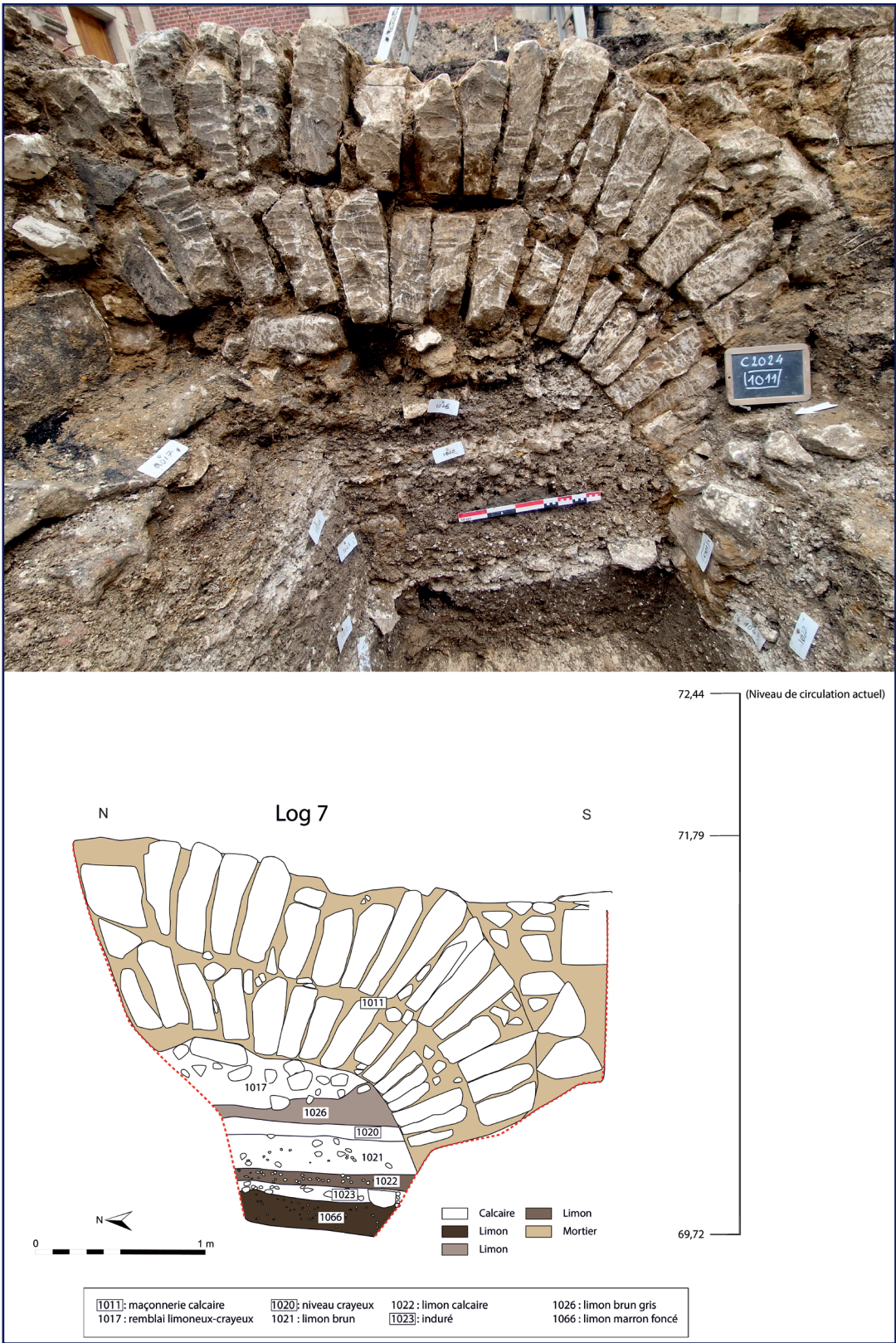


Fig. 5. Fouille rue Pasteur – rue du Saumon. Photographie de détail (en haut) et relevé de coupe (en bas), log 7, maçonnerie 1011 (d'après Bray *et al.*, 2024, p. 64). L'UE 1017 est située au centre-gauche de la photographie. Cliché et dessin SAM.

Fig 5. Pasteur street – Saumon street excavation. Detailed photograph (top) and cross-section (bottom), log. 7, masonry 1011 (from Bray *et al.*, 2024, p. 64), The UE 1017 is located in the center-left of the photograph. Photo and drawing SAM.

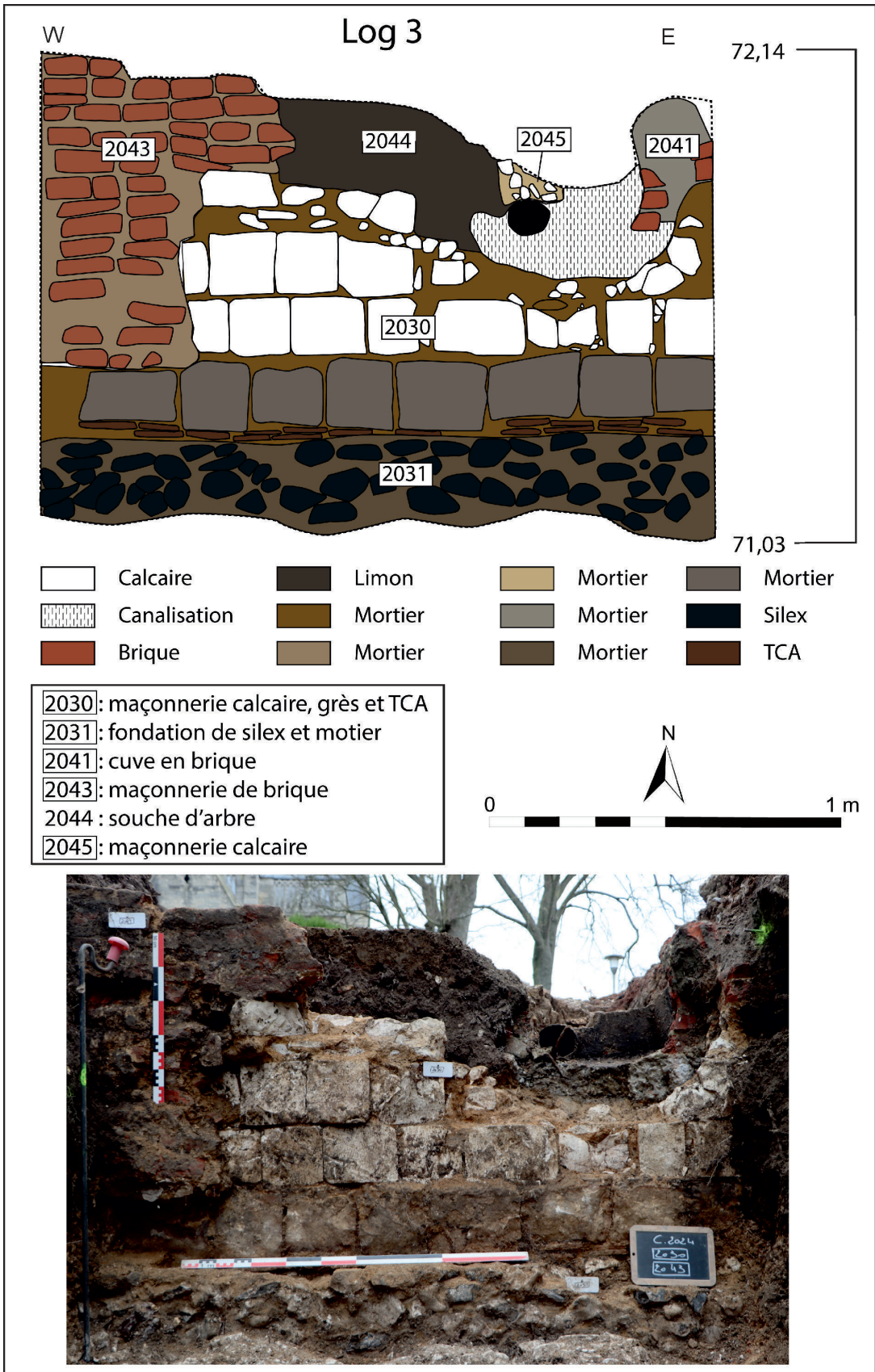


Fig. 6. Fouille rue Pasteur – rue du Saumon. Photographie de détail (en bas) et relevé de coupe (en haut), log 3, sondage 02 (d'après Bray *et al.*, 2024, p. 126). L'UE 2030 est située au centre de la photographie. Cliché et dessin SAM.

✧ Une opération de diagnostic a été menée en 2021 aux 13-15 rue Gambetta suite au projet de réhabilitation de l'ancienne poste en bureaux et logements collectifs. Les tranchées réalisées témoignent d'une occupation continue entre les IX^e et XVIII^e siècles. La 1^{re} phase (IX^e-XI^e siècles) concerne un ensemble compris dans un fossé défensif ; la deuxième phase (XII^e-XVIII^e siècles) se caractérise par une enceinte maçonnée ; enfin les fondations d'au moins deux bâtiments datant de l'Époque moderne ont pu être reconnues. L'échantillon UE 19 provient du comblement d'une fosse. Seul un rapport de diagnostic est disponible à ce jour (Béghin *et al.*, 2021), le rapport de fouille est en cours de rédaction.

✧ L'échantillon UE 3007 a été prélevé lors de la fouille préventive – effectuée en 2024 par le service archéologique d'Arras – de la friche située à l'emplacement de l'Esplanade du gouverneur, au nord de la citadelle, avant sa réhabilitation. La sortie du rapport est prévue mi-2026.

CALIBRATION DU SCLÉROMÈTRE DE SCHMIDT

Le scléromètre (ou marteau) de Schmidt est un appareil mécanique servant à déterminer indirectement la résistance à la compression d'un matériau à partir d'un indice de rebondissement (I_R), c'est-à-dire de la mesure du rebond élastique d'une bille d'acier à la surface de ce matériau (*e.g.* Aydin, 2009). Son principe est fondé sur la résilience d'un matériau au choc et il renseigne sur sa dureté. Il a été montré empiriquement que l'indice I_R est proportionnel à la résistance du matériau à la compression uniaxiale (en MPa), la corrélation pouvant varier selon le type de matériau (Wang & Wan, 2019).

Le scléromètre utilisé lors de ce travail est un scléromètre de type L *PROCEQ Original Schmidt* conforme à la norme internationale ISO 1920-7:2004.

Afin d'opérer dans les meilleures conditions possibles, nous avons – pour les essais au laboratoire – (i) enlevé les parties altérées à la surface des blocs pour réaliser les mesures sur la roche saine et (ii) poli soigneusement la surface.

Pour s'assurer de la stabilité des résultats, chaque essai a comporté un minimum de dix impacts, chacun à une distance de 2-3 cm de l'impact précédent, et chaque mesure de rebond a été enregistrée. Les conditions de frappe influencent les résultats obtenus et il est nécessaire de bien positionner l'outil perpendiculairement à la surface mesurée. Quand l'appareil est utilisé en position horizontale, les frottements mécaniques internes peuvent altérer la distance de rebond ; en position verticale, c'est l'effet de la gravité qui intervient ; il est donc essentiel de standardiser autant que possible la position afin d'obtenir des données fiables et comparables. De même, il est indispensable d'exercer une pression constante lors de la mesure afin de garantir la reproductibilité ; il est

donc recommandé que ce soit toujours le même opérateur qui les réalise.

Les blocs que nous avons testés en place dans les confortations des carrières et tous ceux provenant des fouilles sont des blocs rocheux, mais les abaques fournis avec le scléromètre correspondent à des mesures sur béton. Ceci nous a amené à recalibrer l'appareil et à établir nos propres abaques à partir de mesures effectuées avec celui-ci sur des roches dont la résistance à la compression était connue par ailleurs, afin d'établir une corrélation fiable entre les valeurs de rebond mesurées en position horizontale (I_{RH}) ou verticale (I_{RV}), et la résistance à la compression (σ_c ou UCS : *unconfined compressive strength*). Pour cela, dans un premier temps, plusieurs types de roches ont été sélectionnés afin d'établir une base de données : des craies, des grès et un granite (Mulon, 2025).

La grande différence de réaction au scléromètre entre les roches sédimentaires et le granite – les valeurs de rebond sur celui-ci pouvant atteindre jusqu'à 5 fois les valeurs des rebonds sur les craies – nous a amenés, dans un second temps, à recentrer la réalisation des abaques sur les roches sédimentaires seules, afin d'améliorer leur précision sur ces matériaux. Nous avons ainsi utilisé : la craie d'Obourg (bassin de Mons, Belgique – Geremia *et al.*, 2021), les craies de Sainte-Marguerite-sur-Mer et du Pays de Bray (Normandie, France – Dieye, 2025), le grès de Bentheim (Basse Saxe, Allemagne – Wong *et al.*, 1997) ainsi que les craies provenant de diverses constructions arrageoises (ce travail). Chaque échantillon a été testé dans deux orientations différentes, verticale et horizontale, sur 2 faces perpendiculaires. Deux abaques ont ainsi été établis pour les mesures verticales et horizontales (Tabl. 3, Fig. 7) et utilisés pour caractériser les UCS à partir des mesures au scléromètre. Dans les deux cas la corrélation est satisfaisante, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,9 (Fig. 7). Idéalement il aurait été préférable de construire ces abaques avec un seul type de matériau, la craie, comme cela est recommandé dans les normes (Aydin, 2009). Malheureusement notre jeu de données sur les craies du bassin de Paris était trop limité pour cela.

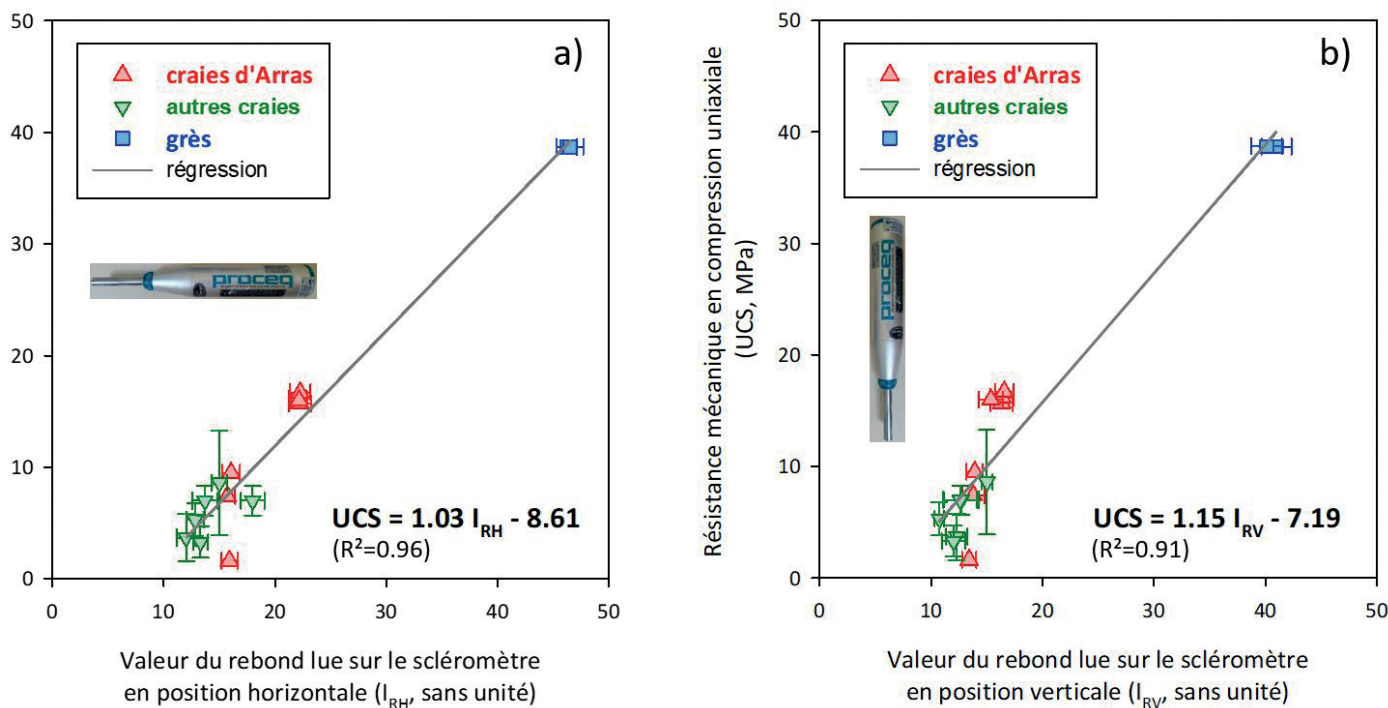


Fig. 7. Abaques de corrélation entre indices de rebondissement horizontal (a) et vertical (b) du scléromètre et valeur de résistance à la compression uniaxiale (mesurée à la presse) établis à partir de diverses roches sédimentaires poreuses (modifiés d’après Mulon, 2025 ; cf. Tabl. 3). L’équation cartésienne de la droite et le coefficient de détermination R^2 sont indiqués.

Fig. 7. Correlation charts between horizontal (a) and vertical (b) rebound indices of the sclerometer and compressive strength value (measured using a uniaxial press) established from various porous sedimentary rocks (modified from Mulon, 2025; cf. Tabl. 3). The Cartesian equation of the line and the determination coefficient R^2 are shown.

Échan- tillon	Nature	Provenance	Scléromètre I_{RH} , rebond horizontal		Scléromètre I_{RV} , rebond vertical		Essai uniaxial UCS (MPa)	
			moy.	erreur	moy.	erreur	moy.	erreur
UE 04	craie	Arras (Fra.)	16,0	± 0,8	13,9	± 0,7	9,5	
UE 3007	craie	Arras (Fra.)	15,9	± 0,7	13,4	± 0,6	1,6	
UE 1043	craie	Arras (Fra.)	15,7	± 0,7	13,8	± 1,0	7,4	
UE 19	craie	Arras (Fra.)	22,3	± 1,0	16,3	± 1,0	15,7	
UE 1032	craie	Arras (Fra.)	22,0	± 0,8	16,4	± 1,1	16,2	
UE 1017	craie	Arras (Fra.)	22,3	± 0,9	16,5	± 0,8	16,7	
UE 2030	craie	Arras (Fra.)	22,2	± 0,8	15,4	± 1,1	16,0	
SMG6	craie	Ste Marguerite sur Mer (Fra.)	12,0	± 0,8	12,3	± 0,9	3,7	± 2,1
SMG8	craie	Ste Marguerite sur Mer (Fra.)	13,3	± 0,7	12,0	± 1,1	3,3	± 1,4
SMG7	craie	Ste Marguerite sur Mer (Fra.)	12,8	± 0,8	10,8	± 0,4	5,3	± 1,5
BRA1	craie	Pays de Bray (Fra.)	15,0	± 0,7	15,0	± 0,5	8,6	± 4,7
OBG1	craie	Obourg (Bel.)	13,7	± 1,1	12,7	± 1,6	7,0	± 1,3
OBG2	craie	Obourg (Bel.)	18,0	± 1,1	12,6	± 1,5	7,0	± 1,3
BNT1	grès	Bentheim (All.)	46,2	± 0,9	41,0	± 1,3	38,7	
BNT2	grès	Bentheim (All.)	46,5	± 1,2	40,1	± 1,4	38,7	

Tableau 3. Données utilisées pour construire les abaques de corrélation entre indices de rebondissement du scléromètre (I_{RV} et I_{RH}) et valeurs de résistance à la compression (UCS mesurées à la presse uniaxiale), à partir de diverses roches sédimentaires (modifié d’après Mulon, 2025).
Table 3. Data used to construct the correlation charts between sclerometer rebound indices (I_{RV} and I_{RH}) and compressive strength values (UCS measured with a uniaxial press), from various sedimentary rocks (modified from Mulon, 2025).

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION : RÉSULTATS DES MESURES NON DESTRUCTIVES AU SCLÉROMÈTRE DE SCHMIDT

Essais sclérométriques *in situ* et sur les blocs stockés à Arras

Des mesures horizontales ont été faites *in situ*, en 2023, sur des moellons de confortations dans les carrières de la rue Saint-Denis et celles de l'Abbaye Saint-Vaast (Tabl. 1; Béghin *et al.*, 2026). Ils présentent des I_{RH} de l'ordre de 23-24 (valeurs médianes) pour trois des moellons BOV-SD et BOV-SV, ce qui, en utilisant les nouveaux abaques, correspond à des UCS (valeurs médianes) de l'ordre de 15-16 MPa. Les autres blocs – stockés au Service archéologique d'Arras – proviennent de fouilles archéologiques (Tabl. 1). Ils ont surtout été testés verticalement, leur forme ne permettant généralement pas d'avoir des surfaces lisses perpendiculaires (Fig. 8). Les blocs GAM-42, CONS et PSV-PD montrent des indices de rebondissement I_{RV} de l'ordre de 21-22. En revanche pour les échantillons provenant de l'église Saint-Jean-en-Ronville (RON) et de l'ancienne cathédrale d'Arras (CATH), les valeurs I_{RV} sont de l'ordre de 28-30 et les I_{RH} de l'Hôtel d'Hooghstraeten (STRA) atteignent 33, avec toutefois un écart-type de 7,8. En se fondant sur les nouveaux abaques, les valeurs de résistance à la compression correspondantes (médianes) seraient de l'ordre de 13-19 MPa pour CONS, GAM-42 et PSV-PD et de 25-27 MPa pour RON, CATH et STRA (Tabl. 1).

La relative dispersion des mesures de rebonds (marquée par des écarts types parfois importants), entraîne une certaine imprécision dans le calcul des UCS, mais il apparaît néanmoins clairement qu'on a affaire à deux familles de craies, différentes en termes de résistance à la compression. Deux des trois moellons mesurés dans les boves de l'Abbaye Saint-Vaast montrent des valeurs intermédiaires (de l'ordre de 22 MPa) et il est difficile de les classer dans une des deux familles.

Essais sclérométriques sur les blocs étudiés au laboratoire de Cergy

Des mesures au scléromètre en position horizontale et verticale, ont été effectuées en 2025 sur les sept blocs de craies utilisables provenant des fouilles d'Arras, à l'état sec (Tabl. 4). Les résultats montrent clairement deux groupes distincts selon les valeurs de rebond : le premier avec des I_{RV} de 13-14 et des I_{RH} de 16, et le second avec des I_{RV} entre 16 à 17 et des I_{RH} entre 22 et 23. Comme on sait que les caractéristiques mécaniques des roches, et en particulier de la craie, sont largement tributaires de leur hygrométrie (e.g. Siwak, 1994; Schroeder, 2002; Risnes *et al.*, 2005; Nguyen, 2009; Lafrance *et al.* 2014; Geremia *et al.*, 2021), les tests ont été répétés après humidification des échantillons étudiés afin de voir si la présence d'humidité entraînait une variation significative des résultats. Contrairement à notre attente, les valeurs enregistrées restent très proches de celles des tests effectués à l'état sec (Tabl. 4). L'état hydrique ne semble donc avoir qu'une importance minime, confirmant ainsi la possibilité d'obtenir des résultats fiables lors de l'utilisation du scléromètre sur le terrain.

Les deux groupes d' I_R correspondent à deux groupes de résistance à la compression et témoignent donc de la présence de deux groupes de craies ayant des propriétés mécaniques différentes. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale (UCS) obtenues sur ces mêmes échantillons avec une presse (*cf. infra*), corroborent l'existence de ces deux groupes. Le premier (UE 04,1043 et 3007), qu'on appellera groupe 1 dans la suite du texte, présente les valeurs les plus faibles, inférieures à 10 MPa (Tabl. 5). Ces résistances témoignent d'une roche assez tendre, probablement hétérogène et/ou altérée, ce que confirment les observations macroscopiques (Mulon, 2025). Pour le second groupe, (UE 19, 1032, 1017 et 2030), qu'on appellera groupe 2 dans la suite du texte, les valeurs d'UCS sont supérieures à 15 MPa (Tabl. 5). Ce groupe témoigne d'une craie relativement compacte et homogène.



Fig. 8. Blocs provenant des fouilles de l'ancienne église Saint-Jean-en-Ronville. Le scléromètre donne l'échelle (longueur 40 cm). Cliché F. Bergerat.

Fig. 8. Blocks from the excavations at the former church of Saint-Jean-en-Ronville. The sclerometer provides the scale (length 40 cm). Photo: F. Bergerat.

Échantillon		Craie sèche			Craie humide		
		I _R moyen	I _R médian	Écart-type	I _R moyen	I _R médian	Écart-type
UE 19	V	16,3	16	1,0	16,4	16,5	0,9
UE 19	H	22,3	22	1,0	20,0	20	0
UE 04	V	13,9	14	0,7	13,9	14	1,1
UE 04	H	16,0	16	0,8	16,1	16	1,1
UE 1043	V	13,8	14	1,0	13,8	14	0,8
UE 1043	H	15,7	16	0,7	16,1	16	1,3
UE 1032	V	16,4	16	1,1	16,1	16	0,8
UE 1032	H	22,0	22	0,8	20,0	20	0
UE 1017	V	16,5	17	0,8	16,8	17	1,0
UE 1017	H	22,3	22	0,9	20,0	20	0
UE 2030	V	15,4	16	1,1	15,6	16	1,1
UE 2030	H	22,2	22	0,8	20,0	20	0,2
UE 3007	V	13,4	13	0,6	13,2	13	1,0
UE 3007	H	15,9	16	0,7	15,7	16	0,9

Tableau 4. Essais au scléromètre pour les craies issues de fouilles réalisées entre 2021 et 2024 à Arras (cf. Tabl. 2). Indices de rebond (I_R) verticaux (V) et horizontaux (H) sur les échantillons de craies à l'état sec et à l'état humide.
Table 4. Sclerometer tests for chalk taken from excavations carried out between 2021 and 2024 in Arras (see Tabl. 2). Vertical (V) and horizontal (H) rebound indices (I_R) on chalk samples in dry and wet states.

	Échan- tillon	Masse vol. appa- rente (g/cm³)	Masse vol. solide (g/cm³)	Poro- sité (%)	Perméa- bilité (mD)	Cond. ther- mique (W/m/°K)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Module dyna- mique K (GPa)	Module dyna- mique μ (GPa)	Résis- tance com- pres- sion UCS, σ _c (MPa)	Module d'Young E _{stat} (GPa)	Résis- tance trac- tion σ _t (MPa)
GROUPE 1	UE 04 A	1,590	2,726	41,7	2,76	0,616	1915	1218	5,8	2,4	9,5	2,0	0,23
	UE 04 B	1,537	2,724	43,6	2,67		2212	1192	7,5	2,2			
	UE 3007 A	1,630	2,708	39,8	0,46	0,511	2903	1605	13,7	4,2	1,63	0,30	Non réalisé
	UE 3007 B	1,546	2,723	43,2	0,13		3220	1714	16,0	4,5			
	UE 1043 A	1,566	2,739	42,8	1,94	0,595	2703	1596	11,4	4,0	7,4	1,6	0,19
	UE 1043 B	1,565	2,742	42,9	1,84		2657	1569	11,0	3,9			
GROUPE 2	UE 19 A	1,525	2,744	44,4	2,00	0,756	2847	1622	12,4	4,0	15,7	5,9	0,39
	UE 19 B	1,618	2,743	41,0	2,29		2939	1557	14,0	3,9			
	UE 1032 A	1,514	2,734	44,6	2,61	0,768	2568	1450	10,0	3,2	16,2	6,8	0,41
	UE 1032 B	1,419	2,740	48,2	1,96		2658	1462	10,0	3,0			
	UE 1017 A	1,467	2,723	46,1	1,80	0,753	2755	1672	11,1	4,1	16,7	6,8	0,42
	UE 1017 B	1,561	2,836	45,0	2,03		2753	1632	11,8	4,2			
	UE 2030 A	1,563	2,736	42,9	2,33	0,817	2644	1534	10,9	3,7	16,0	6,5	0,41
	UE 2030 B	1,623	2,754	41,1	1,68		2839	1646	13,1	4,4			

Tableau 5. Caractéristiques pétrophysiques et mécaniques (pour les craies issues de fouilles réalisées entre 2021 et 2024 à Arras [cf. Tabl. 2]). Les valeurs obtenues pour la résistance à la compression résultent d'essais à la presse uniaxiale, les résistances à la traction ont été obtenues à partir d'essais brésiliens. Les valeurs obtenues pour l'UE 3007 ne sont pas représentatives en raison de la présence d'une veine de silex dans l'échantillon.
Table 5. Petrophysical and mechanical characteristics (for chalk from archaeological excavations carried out between 2021 and 2024 in Arras [see Tabl. 2]). The compressive strength values were obtained from uniaxial press tests, and the tensile strength values were obtained from Brazilian tests. The values obtained for UE 3007 are not representative due to the presence of a flint vein in the sample.

PROPRIÉTÉS PÉTROPHYSIQUES : RÉSULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

Afin de préciser les caractéristiques des différentes craies, plusieurs propriétés pétrophysiques ont été déterminées au laboratoire de Cergy (Mulon, 2025). Pour chaque bloc, on a mesuré la masse volumique, la porosité, la perméabilité, la conductivité thermique et les vitesses de propagation des ondes. Les résultats sont reportés dans le tableau 5 et représentés dans la figure 9.

Masse volumique et porosité

Diverses méthodes peuvent être mises en œuvre pour déterminer la porosité (e.g. Pinot, 2015). Dans ce travail, nous avons utilisé la relation entre la masse volumique apparente ρ_a et la masse volumique de la phase solide (grains) ρ_s , qui ont été mesurées pour chaque échantillon. La première correspond au rapport entre la masse de matériau et son volume géométrique, la seconde est le rapport de la masse du matériau sur le volume de la phase solide. La masse volumique apparente ρ_a a été déterminée par un calcul direct connaissant la masse et les dimensions géométriques (diamètre, longueur) des échantillons. La masse volumique du solide ρ_s a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium.

Il est possible de déterminer la porosité totale ϕ à partir de la relation suivante entre ces deux mesures :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

La masse volumique de la phase solide (ρ_s) est dans la même gamme de valeurs pour l'ensemble des échantillons analysés, autour de 2,70 g/cm³, indiquant une composition minéralogique uniforme dont l'élément majeur est la calcite, comme attendu pour des craies. En revanche, la masse volumique apparente (ρ_a) varie entre 1,42 et 1,63 g/cm³, correspondant à une différence de porosité entre les échantillons. Les valeurs de porosité se situent entre 40 % et 48 % (Tabl. 5). Si masse volumique apparente et porosité varient d'un échantillon à l'autre et plaident pour des provenances différentes, ces variations ne permettent cependant pas d'identifier des groupes avec certitude, d'autant plus qu'on peut observer des différences au sein des mêmes blocs où elles semblent donc plutôt révéler des hétérogénéités locales, peut-être liées à la sédimentation (Mulon, 2025).

Perméabilité

La perméabilité mesure l'aptitude d'un milieu poreux à se laisser traverser par un fluide au sein de son réseau de porosité sous l'effet d'un gradient de pression. Elle a été mesurée sur chaque échantillon à l'aide d'un perméamètre à gaz PORO-PERM Vinci Technologies.

À l'exception d'une très faible valeur de 0,13 mD correspondant au bloc UE 3007 qui contient une veine de silice,

la perméabilité mesurée sur les échantillons analysés est de l'ordre de 2 mD (on rappelle que 1 mD [milliDarcy] correspond à une perméabilité de 10⁻¹⁵ m² en unités SI) avec une valeur maximale de 2,7 mD et une valeur minimale de 1,7 mD, sans qu'on puisse distinguer des groupes distincts (Tabl. 5). La dispersion des données est probablement liée aux différences structurales des échantillons, comme cela a été déjà supposé pour la porosité.

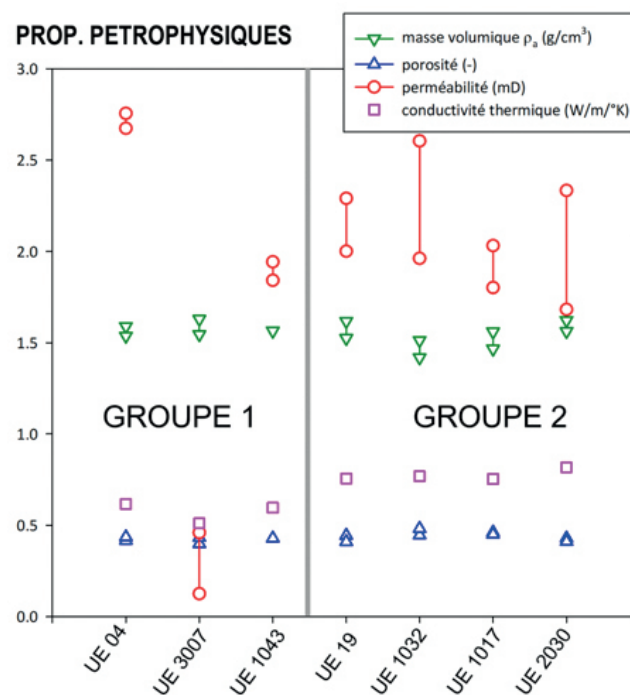


Fig. 9. Propriétés pétrophysiques des échantillons de craie étudiés au laboratoire à Cergy.

Fig. 9. Petrophysical properties of the chalk samples studied in the Cergy laboratory.

Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

La vitesse de propagation des ondes élastiques a été mesurée en laboratoire à l'aide de deux capteurs piézoélectriques, d'un générateur d'impulsions ultrasoniques et d'un oscilloscope. En mesurant le temps de parcours des ondes P (compressives) ou S (cisailantes) dans le matériau, la vitesse de propagation V_p ou V_s peut être déterminée connaissant la distance entre les capteurs ultrasoniques émetteur et récepteur.

À partir de la masse volumique apparente des échantillons et des vitesses V_p et V_s , on obtient le module de cisaillement dynamique μ qui est en lien avec la rigidité du matériau :

$$\mu = \rho_a V_s^2$$

ainsi que le module d'incompressibilité dynamique K qui est en lien avec la déformation volumique du matériau :

$$K = \rho_a \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

Les valeurs de μ varient entre 2,2 et 4,4 GPa, celles de K entre 5,8 et 16 GPa (Tabl. 5), mais là encore, il est difficile de distinguer des groupes distincts, d'autant plus que les variations peuvent être importantes sur un même échantillon.

Conductivité thermique

La conductivité thermique λ d'un matériau caractérise la capacité de celui-ci à conduire la chaleur sous l'effet d'un gradient thermique. Des essais de conductivité thermique ont été réalisés sur des couples d'échantillons cylindriques du même matériau entre lesquels est placée une sonde thermique très fine. Un analyseur thermique de type *HOT DISK* engendre alors une séquence de cinq impulsions chauffantes successives (puissance : 0,05 W, durée : 10 s) et un logiciel calcule la conductivité thermique exprimée en watts par mètre par °Kelvin (W/m/°K).

Les valeurs mesurées varient entre 0,51 et 0,82 W/m/°K (Tabl. 5). Les échantillons UE 19A, UE 1032A, UE 1017A et UE 2030A, avec des conductivités entre 0,75 et 0,82 W/m/°K, suggèrent une craie compacte et bien cimentée, probablement avec un bon contact entre les grains. Les échantillons UE 04A et UE 1043A, avec des valeurs entre 0,59 et 0,62 W/m/°K, correspondent à une craie moins homogène. L'échantillon UE 3007A avec 0,51 W/m/°K est, comme pour les autres essais, moins représentatif en raison de la veine de silex qu'il contient.

En définitive, l'ensemble des données pétrophysiques par bloc étudié (Fig. 9) ne permet pas de différencier les deux groupes de roches établis à partir des résistances à la compression mis à part la conductivité thermique significativement plus grande pour le groupe 2.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES : RÉSULTATS DES ESSAIS DESTRUCTIFS EN LABORATOIRE

Plusieurs propriétés mécaniques ont également été mesurées au laboratoire : résistance en compression uniaxiale, module d'Young et résistance à la traction (Mulon, 2025 ; Tabl. 5 ; Fig. 10).

Résistance à la compression

Des essais de compression uniaxiale ont été réalisés à l'aide d'une presse sur les éprouvettes les plus grandes ($D \sim 25$ mm, $L \sim 50$ mm), permettant de déterminer la résistance à la compression σ_c ou UCS :

$$UCS = \sigma_c = \frac{4F_{max}}{\pi D^2}$$

où F_{max} est la charge maximale à la rupture et D le diamètre initial de l'éprouvette. Les échantillons UE 04 et UE 1043 montrent des résistances de 9,5 et 7,4 MPa, respectivement (Tabl. 5). Les échantillons UE 19, UE 1032, UE 1017 et UE 2030

présentent des UCS plus fortes et très proches, comprises entre 15,7 et 16,7 MPa. L'échantillon UE 3007 présente une valeur σ_c de 1,6 MPa nettement plus faible que les autres. La raison en est la présence de la veine de silex qui affaiblit cet échantillon. L'observation de ce dernier après l'essai montre que la fracture s'est propagée à l'interface entre la veine de silex et la craie.

Module d'Young

Le module d'Young est une constante élastique qui caractérise la proportionnalité entre la contrainte subie par le matériau (σ) et sa déformation axiale (ϵ) dans un essai de compression uniaxiale ; il correspond donc à la pente de la courbe $\sigma(\epsilon)$ dans sa partie élastique (linéaire). La déformation étant sans dimension, l'unité du module d'élasticité d'Young est une pression exprimée en GPa. Lorsque ce module est estimé à partir d'un essai mécanique, on parle de module statique noté E_{stat} , par opposition aux modules élastiques dynamiques déduits des vitesses de propagation d'ondes.

On note des variations significatives entre les deux groupes échantillons (Tabl. 5) : ceux du groupe 1 présentent des valeurs de E_{stat} inférieures à 2 GPa. À l'opposé, les échantillons du groupe 2 ont des valeurs de E_{stat} beaucoup plus fortes, entre 6 et 7 GPa, témoignant d'un comportement mécanique très rigide.

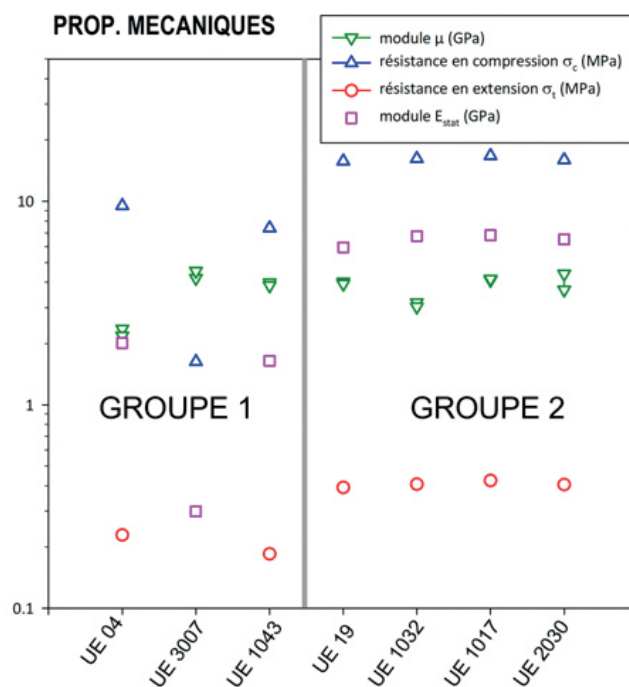


Fig. 10. Propriétés mécaniques des échantillons de craie étudiés au laboratoire à Cergy.

Fig. 10. Mechanical properties of the chalk samples studied in the Cergy laboratory.

Résistance à la traction

Des essais brésiliens (ou essais en traction) ont été réalisés sur chaque petit échantillon (D ~25 mm, L ~13 mm). Ceux-ci sont placés entre deux plateaux circulaires d’une presse mécanique épousant les bords de l’échantillon. Une charge est appliquée à une vitesse constante dans la direction du diamètre de l’échantillon jusqu’à la rupture. La valeur de charge maximale enregistrée à la rupture, F_{max} , permet de déterminer indirectement la résistance à la traction σ_t (en Pa) :

$$\sigma_t = \frac{2F_{max}}{\pi DL}$$

Les résistances à la traction varient entre 0,19 MPa et 0,42 MPa (Tabl. 5), avec là aussi, deux groupes de données, l’un proche de 0,2 MPa (UE 04 et UE 1043) et l’autre proche de 0,4 MPa (UE 19, UE 1032, UE 1017 et UE 2030). L’essai brésilien n’a pas pu être réalisé sur l’échantillon UE 3007.

Au final, les résultats des tests en termes de résistance à la compression et à la traction, ainsi que le module d’Young,

confirment clairement l’existence de deux groupes de craies de comportements mécaniques différents.

DISCUSSION

Groupes de craies en fonction de leurs propriétés physiques et mécaniques. Corrélations.

En résumé, en termes de propriétés mécaniques (Fig. 10), les résultats des tests réalisés en laboratoire confirment clairement l’existence des deux groupes de craies préalablement reconnus à partir des mesures au scléromètre sur les mêmes blocs : l’un plus tendre (groupe 1) comprenant les échantillons UE 04 et UE 1043, l’autre plus résistant (groupe 2) représenté par les échantillons UE 19, UE 1032, UE 1017 et UE 2030. En revanche, à l’exception de la conductivité thermique plus grande pour le groupe 2, les données pétrophysiques (Fig. 9) ne permettent pas de distinguer clairement ces deux groupes.

Le tableau 6 récapitule les résultats obtenus pour l’ensemble des essais pour les groupes 1 et 2.

Caractéristiques pétrophysiques et mécaniques	Groupe 1 : UE 04, UE 1043, UE 3007		Groupe 2 : UE 19, UE 1032, UE 1017, UE 2030	
Masse volumique apparente (g/cm³)	1,572	± 0,034	1,536	± 0,070
Masse volumique solide (g/cm³)	2,727	± 0,012	2,751	± 0,035
Porosité (%)	42,3	± 1,4	44,2	± 2,5
Perméabilité (mD)	1,63	± 1,11	2,09	± 0,30
V _p (m/sec)	2602	± 471	2750	± 123
V _s (m/sec)	1482	± 221	1572	± 85
K, module d'incompressibilité dynamique (GPa)	10,9	± 3,8	11,7	± 1,4
μ, module de cisaillement dynamique (GPa)	3,5	± 1,0	3,8	± 0,5
ν, coefficient de Poisson	0,250	± 0,054	0,256	± 0,030
σ _t , résistance à la traction (MPa)	0,207	± 0,031	0,407	± 0,013
σ _c ou UCS, résistance à la compression (MPa)	6,18 (8,4)	± 4,08	16,17	± 0,42
E _{stat} , module d'Young statique (GPa)	1,32 (1,8)	± 0,90	6,50	± 0,40
λ, conductivité thermique (W/m/°K)	0,574	± 0,056	0,774	± 0,030

Tableau 6. Distinction de deux groupes de craies (issues de fouilles réalisées entre 2021 et 2024 à Arras; cf. Tabl. 2) en fonction de leurs caractères pétrophysiques et mécaniques. Les valeurs entre parenthèses pour σ_c et E_{stat} correspondent aux moyennes calculées sans inclure les mesures faites sur l’échantillon UE 3007.

Table 6. Distinction between two groups of chalk (from archaeological excavations carried out between 2021 and 2024 in Arras; see Tabl. 2) based on their petrophysical and mechanical characteristics. The values in parentheses for σ_c and E_{stat} correspond to the averages calculated without including measurements on sample UE 3007

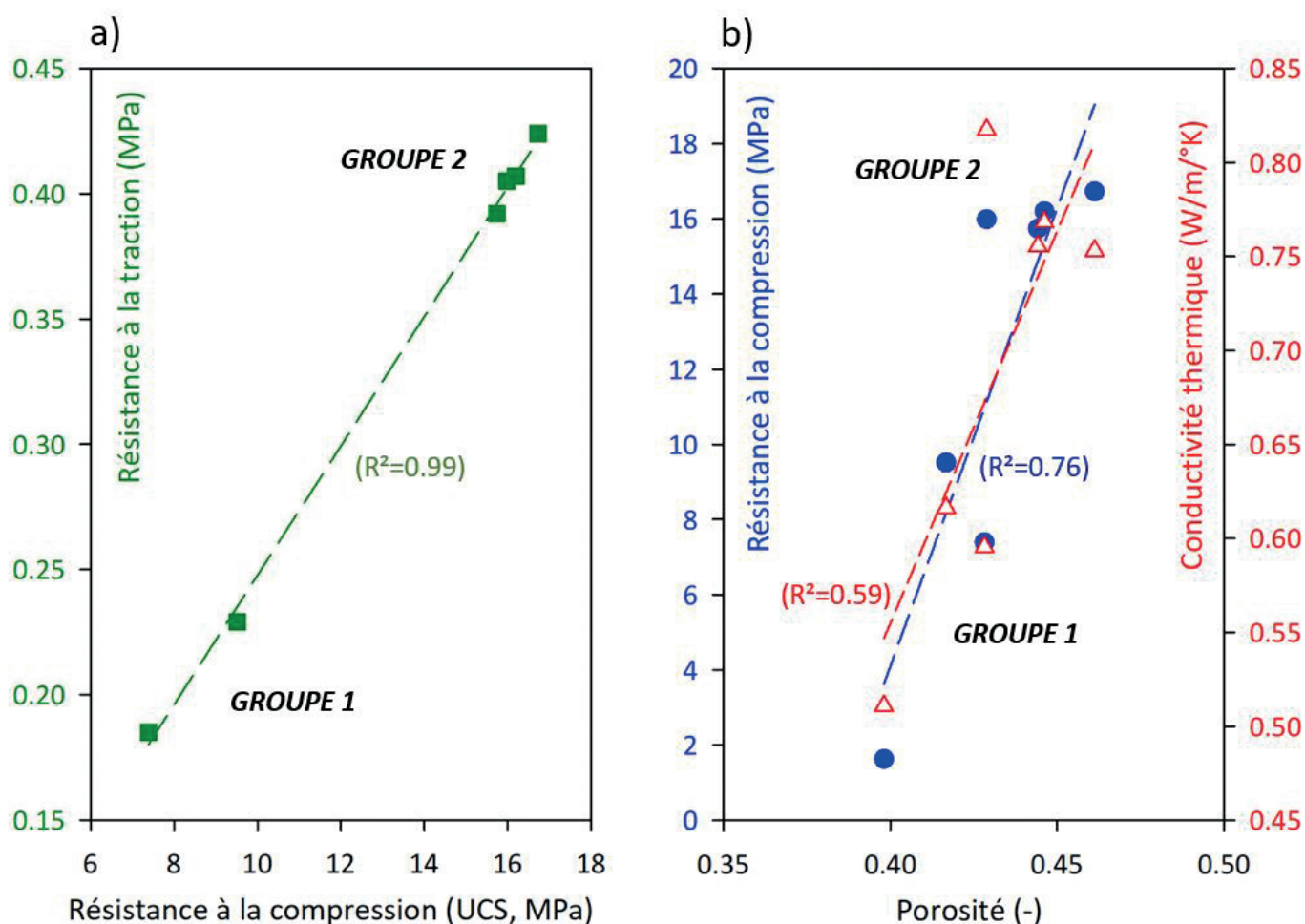


Fig. 11. Corrélations entre quelques caractéristiques physiques et mécaniques : (a) résistance à la compression et résistance à la traction (droite verte); (b) porosité et résistance à la compression (droite bleue) et porosité et conductivité thermique (droite rouge). Les coefficients de détermination R^2 sont indiqués.

Fig. 11. Correlations between some physical and mechanical characteristics: (a) compressive strength and tensile strength (in green); (b) porosity and compressive strength (in blue), porosity and thermal conductivity (in red). The determination coefficient R^2 are shown.

Une analyse des corrélations (matrice de corrélation de Pearson) a permis d'évaluer la pertinence des relations linéaires entre les différentes variables physiques et mécaniques (cf. détails in Mulon, 2025). Parmi les corrélations importantes en termes de comportement du matériau, on peut noter celle observée entre la résistance mécanique à la compression et celle à la traction (Fig. 11a) avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,99. Une telle corrélation est assez courante en mécanique des roches (Paterson & Wong, 2005) : en général, on estime que le rapport entre les résistances mécaniques en compression et en traction est de l'ordre de 10 à 20. Dans notre étude, on observe bien une proportionnalité entre les deux résistances mécaniques, mais avec un rapport plus fort, de l'ordre de 40. Dans la figure 11b, la résistance mécanique en compression et la conductivité thermique sont représentées en fonction de la porosité. Même

si les corrélations semblent moins bonnes ($R^2 = 0,76$ et 0,59) une tendance linéaire positive semble se dessiner. Or ce résultat n'est pas conforme à ce que l'on attendrait : pour des roches de composition similaire, une augmentation de la porosité devrait conduire à une diminution aussi bien de la résistance mécanique que de la conductivité thermique. Le fait que le contraire soit observé montre que, pour nos roches, ce n'est pas la porosité à elle seule qui contrôle ces propriétés, mais plutôt les caractéristiques microstructurales comme par exemple la cohésion et la cimentation des grains à l'échelle microscopique. À cet égard, les deux groupes identifiés doivent se distinguer par des caractéristiques microstructurales très différentes, même si malheureusement nous n'avons pas pu le vérifier dans notre étude. Des pistes pourraient être suivies pour éclairer la structure du réseau poreux des différentes craies, comme leur examen

au MEB (microscope électronique à balayage) ou des essais d'absorption d'eau par capillarité.

Mesures au scléromètre

Sur la totalité des échantillons investigués au scléromètre, en 2023 à Arras et en 2025 au laboratoire à Cergy, on peut distinguer trois groupes de craies suivant la valeur de la résistance à la compression :

- ✧ le premier avec des valeurs de l'ordre de 7,9 à 9 MPa. Il correspond au groupe 1 des blocs testés en laboratoire.
- ✧ le deuxième dans une fourchette de valeurs assez large de 11,3 à 19 MPa. Il inclut la totalité du groupe 2 des tests en laboratoire ainsi que sept des moellons examinés en 2023 (CONS, BOV-SD, BOV-SV, PSV-PD, GAM-42). Il est difficile de dire actuellement s'il s'agit d'un seul groupe avec une dispersion des valeurs relativement importante ou si ces valeurs correspondent à des groupes différents. Établir une distinction plus fine nécessiterait un nombre plus important de blocs testés.
- ✧ et enfin un troisième avec des valeurs de 25-27 MPa (quatre blocs : RON, CATH, STRA). Ce groupe de valeurs n'a été distingué que dans les échantillons testés au scléromètre à Arras en 2023. Il s'agit probablement de craies non-arrageoises, leur provenance est, à ce jour, inconnue.

Employer le scléromètre de Schmidt en première approche sur le terrain – ou quand les échantillons ne peuvent faire l'objet d'essais destructifs – peut donc permettre d'obtenir *a minima* une assez bonne approximation de la résistance à la compression. Il faut cependant noter que la dispersion des mesures de rebonds – qui dépend fortement des conditions dans lesquelles sont faites les mesures – peut entraîner une précision moindre dans le calcul des UCS (marquée par des écarts types plus importants). Nous insistons donc sur l'importance d'une bonne préparation de la surface, en particulier en supprimant les parties pouvant avoir été altérées.

Notons enfin qu'il est recommandé d'établir les corrélations entre indice de rebond et UCS pour un type de roche donné (Aydin, 2009). À défaut d'avoir une collection de craies différentes suffisamment étendue, nous avons restreint la réalisation des abaques à des roches sédimentaires poreuses, incluant un grès. Des mesures couplées (scléromètre et presse) sur d'autres roches sédimentaires de ce type – et incluant, en particulier une plus grande variété de craies – permettraient sans doute d'affiner la calibration du scléromètre et la précision des abaques qui en ont été déduits.

Craies et constructions

De nombreuses constructions du nord de la France ont été édifiées en craie. Celles-ci étaient choisies par les carriers de façon empirique, pour leur bonne tenue dans les

bâtiments, mais aucun travail de recherche n'a été effectué pour reconnaître quels étaient les bancs ainsi sélectionnés au sein de la série sénonienne et en préciser les caractéristiques géologiques et/ou mécaniques. On a, par ailleurs, déjà évoqué ci-dessus la difficulté pour différencier macroscopiquement (à l'œil nu) les niveaux de craie s'ils sont sous forme de blocs et donc isolés de leur contexte c'est-à-dire quand on ne connaît pas leur place dans la série stratigraphique. L'un des objectifs de cette étude était d'essayer de distinguer ces craies les unes des autres sur la base de leurs caractères physiques et mécaniques et d'apprécier si ceux-ci pouvaient aider à en préciser la provenance.

D'autres travaux, dans le nord de la France, ont démontré que, pour la plupart des constructions, le circuit court était habituellement privilégié et que les roches utilisées provenaient généralement des alentours, par exemple dans le Nord, à Lille, avec les craies du Coniacien inférieur et moyen (Amédéo *et al.*, 2025), dans la Somme, à Amiens, avec les craies coniaciennes et santoniennes (Belin & Maitte, 2019 ; Barrier *et al.*, 2020), dans le Pas-de-Calais, à Saint-Omer (Blanc, 1996) et Théroutanne (Blary & Gély, 2020), avec des craies du Turonien supérieur et du Coniacien inférieur (bassin carrier de Esquerdès-Wizernes). L'abondance des carrières de craie coniacienne dans le bassin carrier arrageois témoigne que ce fut également le cas à Arras avec la craie du Coniacien moyen, à partir du X^e siècle avec les boves puis, au moins entre les XIV^e et XVIII^e siècles, avec les exploitations souterraines au sud et à l'est de la ville.

Dans la plupart des études, la reconnaissance des craies employées s'arrête à l'étage ou à une partie de l'étage. Le travail le plus élaboré, d'un point de vue géologique, est celui de Barrier *et al.* (2020) qui ont réalisé une reconnaissance des microfaciès sur les matériaux de construction de la citadelle d'Amiens, ce qui leur a permis de préciser leur provenance à partir d'une comparaison avec des lames minces faites dans les carrières souterraines. Il y a là une piste intéressante à suivre en essayant de discriminer les différents niveaux à l'intérieur des étages.

Aux études comparatives des années 70 portant sur les paramètres physiques et mécaniques des craies du Nord-Ouest européen (Bonvallet, 1979 ; Dessenne, 1971 ; Doremus, 1978) ont succédé des études portant généralement sur des craies exploitées en carrières pour l'industrie – cimentière en particulier – (e.g. craie d'Obourg ; Geremia *et al.*, 2021) ou comme analogue des craies pétrolifères (e.g. craie de Lixhe ; Priol, 2005). Les travaux récents illustrent en particulier les relations entre propriétés pétrophysiques, propriétés mécaniques et paramètres texturaux et diagénétiques (e.g. Fabricius, 2007 ; Faÿ-Gomord *et al.*, 2016 ; Descamps *et al.*, 2017). La craie n'étant plus employée comme matériau de construction, celles qui ont été utilisées à cette fin n'ont plus – ou rarement – fait l'objet d'études spécifiques. Cependant, aujourd'hui, les risques liés à la présence d'anciennes

carrières souterraines entraînent de nouvelles analyses pour caractériser les paramètres physiques et mécaniques des matériaux exploités (e.g. Descamps *et al.*, 2026), de même que l'analyse des bâtis anciens dans le cadre de recherches, souvent pluridisciplinaires, sur les patrimoines régionaux (e.g. Ballesteros *et al.*, 2018).

Concernant les moellons de craie arrageois, on estime que les craies des deux premiers groupes distingués dans notre étude proviennent soit des carrières situées sous la ville, soit de celles des faubourgs de Ronville et de Saint-Sauveur. Le troisième groupe aurait une origine allochtone, mais il est impossible d'en dire plus sans élément de comparaison. Les avoir trouvées à l'ancienne cathédrale ou à l'église Saint-Jean de Ronville peut laisser supposer que ces craies de meilleure qualité ont été privilégiées pour la construction des édifices religieux. Ceci serait en bon accord avec le faste de l'église Saint-Jean de Ronville dont « l'architecture très élégante [...] aurait pu être réalisée afin qu'Arras-Ville puisse rivaliser avec la cathédrale d'Arras-Cité » (Béghin *et al.*, 2019).

Seule une collecte exhaustive des divers niveaux de la partie de la série sénonienne qu'on sait avoir été utilisée pour la construction, pourrait permettre de créer une base de données susceptible d'être utilisée pour estimer précisément la provenance des blocs recueillis dans les fouilles archéologiques. Cette base pourrait être établie en prélevant des blocs rocheux en carrière, dans différents niveaux stratigraphiques et en différents secteurs, afin de les analyser au laboratoire. Une alternative plus facile à mettre en œuvre – et moins onéreuse – serait d'effectuer des tests *in situ* au scléromètre de Schmidt. Des essais avaient été tentés sur la craie en place dans les carrières de l'Abbaye Saint-Vaast en 2023, mais aucune mesure n'avait pu être réalisée (aucun I_R mesurable) malgré le choix des surfaces les plus lisses possibles et même lissées au moyen d'un abrasif. On avait, à l'époque, supposé que la cause en était la trop grande humidité de la craie, cependant on a vu (i) que des mesures ont pu être faites par la suite sur les blocs de craie (taillée) des confortations dans ces mêmes carrières (Tabl. 1) – donc dans les mêmes conditions d'humidité – et (ii) que les essais réalisés à Cergy sur les blocs étudiés en 2025, après humidification, ont montré que l'état hydrique modifiait peu les résultats (Tabl. 4; Mulon, 2025). Il est donc probable que le manque de réaction de la craie en carrière soit, au moins en partie, lié à l'irrégularité et/ou à l'altération de sa surface.

Notons enfin que des observations à l'échelle microscopique (lames minces) pourraient peut-être permettre de relier certains microfaciès – s'ils se distinguent suffisamment – aux autres paramètres et ainsi compléter l'analyse physique et mécanique.

CONCLUSION

Dès le X^e siècle et jusqu'au XVIII^e siècle, la craie a été largement exploitée dans le sous-sol arrageois et utilisée tout d'abord pour la construction des remparts et des édifices religieux, puis des habitations. Nous avons étudié, dans ce travail, une vingtaine de blocs de craie, certains en place dans les confortations des carrières souterraines sous la ville (5 moellons), les autres provenant de fouilles menées par le Service archéologique municipal et conservés dans ce service (8 moellons) ou analysés au laboratoire de Cergy (8 moellons). Parmi ces derniers, à l'exception d'un bloc de dimension insuffisante et d'un autre traversé par une veine de silex créant une discontinuité mécanique, 6 blocs ont fait l'objet d'une caractérisation physique et mécanique complète. Ceux examinés à Arras ont fourni, grâce à l'utilisation du scléromètre de Schmidt, des données de résistance à la compression (UCS).

Les résultats les plus intéressants concernent les essais mécaniques; ils ont permis de distinguer deux groupes de craies. Le groupe 1 est caractérisé par des valeurs de résistance à la compression σ_c (ou UCS) de l'ordre de 6 à 8 MPa, de résistance à la traction (σ_t), de l'ordre de 0,2 MPa, et un module d'Young statique (E_{stat}) inférieur à 2 GPa; il comprend les matériaux les moins homogènes, moins résistants et moins conducteurs thermiquement (λ de l'ordre de 0,6 W/m²/K). Le groupe 2, avec des UCS de l'ordre de 16-17 MPa, des σ_t de l'ordre de 0,4 MPa et un E_{stat} de 6-7 GPa, inclut des matériaux plus rigides, homogènes, résistants et thermiquement plus conducteurs (λ entre 0,75 et 0,8 W/m²/K). À l'exception de la conductivité thermique (λ), les autres données pétrophysiques ne permettent pas de différencier deux groupes de matériaux (Fig. 6).

Simultanément, la calibration du scléromètre a été réalisée partir des essais réalisés sur les 6 blocs arrageois rapportés à Cergy et sur des roches sédimentaires de provenances diverses (craies de Normandie et du bassin de Mons, grès de Basse Saxe) pour lesquelles on possédait les données de résistance à la compression. Nous avons ainsi pu établir des abaques adaptés aux roches sédimentaires. Les moellons arrageois non analysés au laboratoire ont tous fait l'objet de tests sclérométriques.

L'ensemble de mesures de rebonds – et conséquemment des UCS évaluées – et des essais à la presse uniaxiale – et des UCS déterminées – a permis d'identifier trois groupes de craies en fonction de leur résistance à la compression: les deux premiers groupes ont été reconnus au laboratoire ainsi qu'à Arras et correspondent probablement à des craies issues des carrières situées sous la ville ou ses faubourgs; un troisième groupe, non reconnu dans les blocs examinés au laboratoire mais distingué dans 4 blocs à Arras – et pour lequel on soupçonne une origine allochtone – montre des valeurs d' UCS (calculées à partir des abaques) proches de

25-27 MPa. L'ensemble des tests sclérométriques montre que l'emploi de cet appareil permet une première approche satisfaisante pour discriminer des groupes de craies de résistances différentes.

Remerciements. Les auteurs remercient Antoine d'Hautefeuille pour son accueil dans ses boves et Miriam Redouane (service archéologique d'Arras) pour son aide dans la recherche des rapports de fouilles. L'étude expérimentale en laboratoire à Cergy a bénéficié du soutien technique de Jean-Christian Colombier, ingénieur d'études au laboratoire ISTeP. Nous remercions Philippe Robion et Cheikh Dieye pour nous avoir fourni leurs données sur les craies du Pays de Bray. Claire Bossennec (univ. Lille) et Fanny Descamps (univ. Mons) sont également remerciées pour leur relecture attentive du manuscrit et leurs remarques constructives.

Bibliographie

- AMÉDRO F. & BERGERAT F. (2024).- Une excursion de la Société géologique du Nord dans les carrières souterraines d'Arras le 21 octobre 2023. Stratigraphie et fracturation des craies coniaciennes. *Annales de la Société géologique du Nord*, tome 31, 2^e série, p. 13-30. <https://www.peren-revues.fr/Annales-sgn/2402>. Consulté le 6/03/2026.
- AMÉDRO F., GRAVELEAU F., CHANIER F., BENOIST J., CHEPPE G. & DEVAERE L. (2025).- Les carrières de craies autour de Lille (Hauts-de-France) : des coupes remarquables dans le Coniacien inférieur et moyen. *Annales de la Société géologique du Nord*, tome 32, 2^e série, 26 p. <https://www.peren-revues.fr/Annales-sgn/2582>. Consulté le 6/03/2026.
- ARCHIVES DÉPARTEMENTALES DU PAS-DE-CALAIS (sans date).- Les archives en guerre (la Première Guerre mondiale). Du bombardement du palais Saint-Vaast à la construction de l'actuel centre Georges-Besnier. <https://www.archivespasdecalais.fr/Decouvrir/Un-document-a-l-honneur/Les-archives-en-guerre-la-Premiere-Guerre-mondiale>. Consulté le 20/02/2026.
- AYDIN A. (2009).- ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, n° 3, p. 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2008.01.020>. Consulté le 5/04/2026.
- BALLESTEROS D., MOURALIS D., NEHME C., PAINCHAULT A., TODISCO D. & VARANO M. (2018).- Pétrologie, géochimie et pétrophysique de la craie de construction médiévale de l'Haute Normandie (France): résultats préliminaires. Réunion des Sciences de la terre, 26^e réunion, Lille, 22-26 octobre 2018, résumé 1 p.
- BARRIER P., LECONTE P. & PACAUD M. (2020).- Provenance des matériaux de construction du site de la citadelle d'Amiens (Somme) de l'Antiquité à nos jours : un circuit court pour des matériaux oubliés. In BLARY F. & GÉLY J.-P. (dir.) *Ressources et construction : la transmission des savoirs sur les chantiers*. Éditions du CTHS, Paris, p. 193-214. <https://doi.org/10.4000/books.cths.10387>. Consulté le 6/03/2026.
- BÉGHIN M. & BRAY V. (2024).- La réunion de la Ville et de la Cité d'Arras : une opération de démantèlement complexe (1531-1777). In BYHET T. et al. (éds) *Places fortes des Hauts-de-France – 6 –*, Publications de l'Institut de recherches historiques du Septentrion. <https://doi.org/10.4000/11wao>. Consulté le 6/03/2026.
- BÉGHIN M., BERGERAT F. & JACQUES A. (collab.) (2021).- Les carrières de craie médiévale-modernes de Wellington et de Blenheim (Arras, Pas-de-Calais) : bilan et perspectives de la prospection thématique. *Revue du Nord - Archéologie de la Picardie et du Nord de la France*, 2021, tome 103, p. 163-185.
- BÉGHIN M., BERGERAT F., AMÉDRO F. & DAVID C. (collab.) (2026).- L'extraction carrière à Arras (Pas-de-Calais) au prisme d'une approche pluridisciplinaire. In BÉGHIN M., LEGRAND T. & LASSAUNIÈRE G. (éds) *Archéologie des carrières en Hauts-de-France et dans les régions limitrophes. Première partie. Revue du Nord - Archéologie de la Picardie et du Nord de la France*, Villeneuve-d'Ascq, en cours d'édition.
- BÉGHIN M. (dir.), BINIAS P., BRAY V., CARNEAUX A. & REDOUANE M. (contribs) (2024).- Rapport intermédiaire d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « Îlot Bergaigne 1 (Phase 2) », du 20/11/2023 au 01/12/2023. Code Patriarche 159729. Code d'opération SAM I.2023. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2021_076_01, 149 p.
- BÉGHIN M. (dir.) BRAY V., FAUTREZ V., HENRY Y., JACQUES A. & REDOUANE M. (collabs) (2021).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 13-15 Rue Gambetta », du 27/01/2021 au 15/02/2021, 6 p.
- BÉGHIN M. (dir.), BRAY V., CARNEAUX A., FAUTREZ V., JACQUES A., LEMAN A., MACHINET L. & REDOUANE M. (collabs) (2025). - Arras (Pas-de-Calais). Abbaye Saint-Vaast – Square Albert I^{er} de Belgique, rapport final d'opération de diagnostic documentaire, positif), Arras. Service Archéologique Municipal d'Arras, 100 p.
- BÉGHIN M. (dir.), HENRY Y. & JACQUES A. (collabs), FAUTREZ V. & REDOUANE M. (contribs) (2019).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 42 rue Gambetta ». Construction d'un logement collectif et d'une cellule commerciale, du 13/05/2019 au 12/06/2019. Code Patriarche 158726. Code d'opération SAM D.2019. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 2017-044, 198 p.
- BÉGHIN M. (dir.), HENRY Y. & JACQUES A. (collabs), FAUTREZ V. & REDOUANE M. (contribs) (2020).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 1 rue du Conseil ». Construction d'un immeuble de logements collectifs, du 20/01/2020 au 24/01/2020. Code Patriarche 158911. Code d'opération SAM A.2020. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2019_082_01, 130 p.
- BÉGHIN M. & BRAY V. (dirs), DELTOMBE M., OUESLATI T., REDOUANE M. & SPEURT I. (contribs) (2022).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « Abbaye Saint-Vaast », du 07/04/2022 au 14/04/2022. Code

- Patriarche 159356. Code d'opération SAM d'Arras C.2022. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2022_001_01, 170 p.
- BELIN J.-J. & MAITTE B. (2019).- La cathédrale d'Amiens : ses matériaux, sa construction. *Annales de la Société géologique du Nord*, tome 26, 2^e série, p. 47-57. <https://www.peren-revues.fr/Annales-sgn/462>. Consulté le 6/03/2026.
- BERGERAT F., JACQUES A., VANDYCKE S., AMÉDRO F., ROBASYNSKI F. & FAÏ O. (2015).- Les carrières souterraines d'Arras : géologie, archéologie et Histoire. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, vol. 52, n° 3, p. 3-26.
- BLANC A. (1996).- Les matériaux de construction de la cathédrale de Saint-Omer. Actes du 119^e Congrès nat. soc. sav., Amiens, 1994. In LORENZ J. (dir.) *Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes*. Éditions du CTHS, Paris, p. 27-38.
- BLARY F. & GÉLY J.-P. (2020).- Des pierres pour une ville disparue au XVI^e siècle : Théroouanne (Pas-de-Calais). In BLARY F. & GÉLY J.-P. (dir.) *Ressources et construction : la transmission des savoirs sur les chantiers*. Éditions du CTHS, Paris, p. 214-229. <https://doi.org/10.4000/books.cths.10882>. Consulté le 6/03/2026.
- BONVALLET J. (1979).- Une classification géotechnique des craies du Nord utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines. *Revue française de Géotechnique*, n° 8, p. 5-14.
- BRAY V. (dir.), BÉGHIN M., JACQUES A., PRONIER S., REDOUANE M. & SOUDRY A. (contribs) (2024).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 13 rue Pasteur – 12 rue du Saumon », du 19/02/2024 au 15/03/2024. Code patriarche : 159748. Code d'opération SAM d'Arras C. 2024. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2023_045_01, 295 p.
- DELATTRE CH. (1968).- Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille XXIV-6 Arras. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, Orléans.
- DESCAMPS F., FAÏ-GOMORD O., VANDYCKE S., SCHROEDER CH., SWENNEN R. & TSHIBANGU J.-P. (2017).- Relationships between geomechanical properties and lithotypes in NW European chalks. In TURNER, J. P., HEALY, D., HILLIS, R. R. & WELCH, M. J. (eds) *Geomechanics and Geology*, Geological Society, London, Special Publications, vol. 458, p. 227-244. <https://doi.org/10.1144/SP458.9>. Consulté le 27/06/2026.
- DESCAMPS F., LEFEBVRE C., DEWAIDE L. & ET FAÏ O. (2026).- Cavités souterraines de Wallonie et des Hauts-de-France – Enseignements du projet RISSC. *Revue française de géotechnique*, 186, 2 [en ligne]. <https://doi.org/10.1051/geotech/2026003>. Consulté le 27/06/2026.
- DESSENNE J. (1971).- Étude rhéologique et géotechnique de la craie. Thèse de Docteur-Ingénieur, université de Grenoble, 232 p.
- DIEYE C. (2025).- Mesures pétrophysiques pour la caractérisation des interactions fluides/roches dans les décharges enfouies sur le littoral normand. Rapport de Master 2, CY Cergy Paris Université, 59 p.
- DOREMUS CH. (1978).- Les craies du Nord de la France. Corrélations entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques. Thèse de doctorat de 3^e cycle en Géologie appliquée, université des Sciences et techniques de Lille, 138 p.
- FABRICIUS I. L. (2007).- Chalk: composition, diagenesis and physical properties. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, vol. 55, p. 97-128.
- FAUTREZ V & JACQUES A. (dir.) (2004).- Rapport de diagnostic – Arras, 51 rue Baudimont, du 07/06/2004 au 25/06/2004, INRAP-SAM, arrêté SRA 04/037, n° INRAP GA 15007701, 64 p.
- FAUTREZ V. (dir.), JACQUES A. (collab.), BÉGHIN M., BRAY V. & REDOUANE M. (contribs) (2022).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « Place de la Préfecture », du 15/07/2021 au 22/07/2021. Code Patriarche 159252. Code d'opération SAM d'Arras H.2021. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2021_045_01, 62 p.
- FAÏ-GOMORD O., DESCAMPS F., TSHIBANGU J.-P., VANDYCKE S. & SWENNEN R. (2016).- Unraveling chalk microtextural properties from indentation tests. *Engineering Geology*, vol. 209, p. 30-43.
- GEREMIA D., DAVID C., DESCAMPS F., MENÉNDEZ B., BARNES C., VANDYCKE S., DAUTRIAT J., ESTEBAN L. & SAROUT J. (2021).- Water-Induced Damage in Microporous Carbonate Rock by Low-Pressure Injection Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02411-4>. Consulté le 6/03/2026.
- GIRARDET J.M., JACQUES A. & LETHO DUCLOS J.L. (2003).- Somewhere on the Western Front. *Documents d'Archéologie et d'Histoire du XX^e siècle*, n° 8, 185 p.
- HENRY Y. (2016).- Rapport de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « Palais Saint-Vaast, rue Paul Doumer ». Couverture de la cour du puits – et réalisation d'une zone technique – du 25/04/2013 au 25/06/2013 et 03/03/2014 au 30/05/2014. Code Patriarche 156462. Code d'opération SAM A.2013-B.2014. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 11 254 / DIAG, 129 p.
- JACQUES A., BÉGHIN M. & HENRY Y. (2019).- La ville médiévale et moderne d'Arras à la lumière de son activité archéologique. Bilan et perspectives. *Nordoc'Archéo*, 28/01/2019. <https://nordoc.hypotheses.org/7716>. Consulté le 6/03/2026.
- LAFRANCE N., SOULEY M., AUVRAY C. & LABIOUSE, V. (2014).- Influence de l'eau sur le comportement de la craie », *Journées nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Beauvais, 8-10 juillet 2014, 10 p.
- LEGRAND T. (dir.), BÉGHIN M., BRAY V., MARCHINET L., MANCUSO C. & REDOUANE M. (contribs) (2024).- Rapport intermédiaire d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 59-65 Grand'Place », du 22/05/2023 au 16/06/2023. Code Patriarche 159622. Code d'opération SAM d'Arras E.2023. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2023_044_01, 172 p.
- MULON B. (2025).- Caractérisation pétrophysique et mécanique de moellons de craie d'Arras et calibration d'un scléromètre. Rapport de stage L3, CY Cergy Paris Université, 49 p., 6 annexes.

- NGUYEN H.D. (2009).- Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. Thèse de Doctorat de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 212 p.
- PATERSON, M.S. & WONG, T.-F. (2005).- Experimental Rock Deformation — The Brittle Field. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2^e édition, 347 p. <https://doi.org/10.1007/b137431>. Consulté le 6/03/2026.
- PINOT P. (2015).- Détermination de la porosité de roches calcaires : méthode et incertitude de mesure. *Revue française de Métrologie*, n° 37, p. 37-53. <https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/rfm37-1504.pdf>. Consulté le 27/04/2026.
- PRÉFECTURE DU PAS-DE-CALAIS. DIRECTION DÉPARTEMENTALE DES TERRITOIRES ET DE LA MER (2023).- Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines Achicourt – Arras – Beaurains. Note de présentation, 97 p. https://www.grandarras.fr/sites/default/files/media/downloads/1_Note_presentation.pdf. Consulté le 6/03/2026.
- PRIOL G. (2005).- Comportement mécanique différé et mouillabilité d'une craie pétrolifère. Thèse de Doctorat de l'École nationale des Ponts et Chaussées, spécialité géotechnique, 217 p.
- RISNES R., MADLAND M.V., HOLE, N. & WABIAH N.K. (2005).- Water weakening of chalk— Mechanical effects of water–glycol mixtures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 48, p. 21-36. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410505000768>. Consulté le 6/03/2026.
- SCHROEDER C. (2002).- Du coccolithe au réservoir pétrolier. Approche phénoménologique du comportement mécanique de la craie en vue de sa modélisation à différentes échelles. Thèse de Doctorat en Sciences appliquées, université de Liège, 173 p.
- SIWAK J.-M. (1994).- Comportement et modélisation de la craie. Thèse de Doctorat en Sciences physiques, université des Sciences et Technologies de Lille, 353 p.
- SPEURT I. (dir.), BÉGHIN M., BRAY V., DELTOMBE M., HENRY Y., MANCUSO C., REDOUANE M., TONDEUR A. & WICHA S. (contribs) (2023).- Rapport final d'opération de diagnostic (positif) – Arras (Pas-de-Calais) « 6-8-10 rue du Bloc », du 21/09/2022 au 21/10/2022. Code Patriarche 159492. Code d'opération SAM d'Arras G.2022. Service Archéologique Municipal d'Arras SRA 62_2021_081_01, 277 p.
- VIGNEZ L. (1916).- Résumé de l'Incendie du Palais-St-Vaast - 5 et 6 juillet 1915. *Le Lion d'Arras*, n° 44, 25 février 1917. Archives départementales du Pas-de-Calais, PF 92/2. <https://www.archivespasdecalais.fr/Decouvrir/Chroniques-de-la-Grande-Guerre/A-l-ecoute-des-temoins/A-l-ecoute-des-temoins/1915/L-incendie-du-palais-Saint-Vaast>. Consulté le 6/03/2026.
- WANG M. & WAN W. (2019).- A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 123, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104094>. Consulté le 11/05/2026.
- WONG, T.-F., DAVID C. & ZHU W. (1997).- The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. *Journ. Geophys. Res.*, 102, 3009-3026.