



HAL
open science

Caractérisation de roches gypseuses : microstructure et propriétés mécaniques

Thibault Coppée, Myriam Duc, Jeanne-Sylvine Guedon, Amade Pouya,
Béatrice Béchet

► To cite this version:

Thibault Coppée, Myriam Duc, Jeanne-Sylvine Guedon, Amade Pouya, Béatrice Béchet. Caractérisation de roches gypseuses : microstructure et propriétés mécaniques. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719802

HAL Id: hal-03719802

<https://hal.science/hal-03719802>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISATION DE ROCHES GYPSEUSES : MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES MECANIQUES

GYP SUM ROCKS CHARACTERIZATION: MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Thibault COPPEE¹, Myriam DUC¹, Jeanne-Sylvine GUEDON¹, Amade POUYA², Béatrice BECHET²

¹ GERS-SRO, Univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France

² Lab Navier, Univ. Gustave Eiffel, ENPC, CNRS, F-77447, Marne-la-Vallée, France

³ GERS-EE, Univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F- 44344, Bouguenais, France

RÉSUMÉ- Le gypse est une roche évaporitique avec une dissolution à l'origine de désordres géotechniques dont les propriétés hydromécaniques via la percolation sont peu étudiées malgré la présence d'une porosité intrinsèque au matériau. Cet article présente les caractéristiques microstructurales de 3 gypses aux textures et géologies différentes afin de mieux comprendre les écoulements en leur sein.

ABSTRACT - Gypsum is an evaporitic rock with dissolution causing geotechnical disorder whose hydromechanical properties via percolation are less studied despite the presence of an intrinsic porosity. This paper presents the microstructural characteristics of 3 gypsum rocks with different textures and geological origin in order to better understand the effect of water flows within them.

1 Introduction

Le développement des activités anthropiques conduit à l'aménagement de zones sur substratum gypseux (ancienne carrière, zone avec des poches de gypse non identifiées...). Les travaux d'excavation et de constructions peuvent conduire à une modification des écoulements dans le sous-sol (infiltration forcée, rabattement de nappe...) ou à la mise en relation d'une couche gypseuse jusque-là étanche avec une arrivée d'eau via le percement de canalisation ou la modification de couvertures argileuses. Or les roches évaporitiques telles que le gypse possèdent des propriétés de dissolution chimique extrêmement active, conduisant à une saturation rapide en calcium et en sulfates de la solution au contact du matériau. La cinétique de dissolution rapide, conduit généralement à considérer le phénomène comme un processus de surface (entraînant la disparition de la dite surface) et non pas comme un processus de dégradation de la structure poreuse de la roche. L'évolution interne de la masse gypseuse via l'écoulement dans la porosité est souvent jugée comme un processus permettant l'initiation d'une fissuration débouchant sur la formation de vastes cavités.

Les masses de gypse les plus exploitées sont le plus souvent de morphologies granulaires (saccharoïdes ou matricielles) contrairement aux gypses cristallisés en « fer de lance » ou « pied d'alouette » qui possèdent une structure monoclinique à plan de clivage. Au sein de ces formations, les volumes de vide structurel présentent une variabilité selon les morphologies et le contexte géologique allant de quelques pourcents à près de 20% (Tableau 1). Ces vides structurels ou liés à des fissures permettent la circulation de fluide et une dissolution interne du matériau. La connaissance de ces structures poreuses apparaît importante pour mieux évaluer les vitesses d'écoulement au sein des massifs rocheux et la mise en place de gradient de dissolution au sein du matériau pouvant conduire à la formation de chemin préférentiel voire de karst (Klimchouk

et al., 1996). La présente étude se propose de décrire les caractéristiques microstructurales de 3 gypses au niveau porale et mécanique via des essais non destructifs.

Tableau 1. Propriétés microstructurales et mécaniques de gypses issues de la littérature.
* études tirées de Auvray (2003). BP : bassin parisien, ESP : Espagne, GB : Grande-Bretagne

	Source	Lieu	Age	Porosité totale (%)	R _c (MPa)	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Vitesse du son V _P (m.s ⁻¹)
Contexte de bassin sédimentaire	*Asanza (1985)	BP	Eocène	11,5	21,5	2,24	4000
	*Durville (1993)	BP	Eocène	16,6	--	2,31 - 2,45	2000-4500
	*Gumusoglu (1982)	Turquie	Quaternaire	17,4	20,4	2,28	--
	*Massieu (1996)	BP	Eocène	16	12,5	--	4000
	*Massieu (1997)	BP	Eocène	10	17,7	2,1	--
	*Papadopoulos (1994) (Moiriat, 2001)	Grèce BP	Néogène Eocène	12 4 – 12,1	8,3 7,6 – 25,6	2,05 - 2,67 2,1 – 2,2	2433-4431
	Auvray (2003)	BP	Eocène	5	17,3	2,33	2960
	(Moiriat et al., 2006)	BP	Eocène	3,5 - 15,5	13,7 - 23,5	--	--
	(Bustamante et al., 2020)	ESP	Oligocène	0,7 – 13,8	26,6	2,2	3128
Contexte orogénique	*Bell (1981)	GB	Permien	3,4	30,5	--	--
	*El Ghorfi (1991)	Alpes	Trias	4,6	27,5	--	--
	*Fabre (1982)	Italie	Trias	1,3 - 6	34,5	--	--
	*Piguet (1986)	Jura	Trias	0,5	28,5	--	--
	*Olgaard (1995)	Jura	Trias	0,5	--	--	4000
	Fabre et Dayre, (1982)	Alpes	Trias	1,3 - 6	20 - 49	2,23 - 2,32	--
	*Auvray (2003)	Jura	Trias	<1	34,5	2,34	2230
	Arnaud et al. (2017)	Provence	Trias	--	3,3 - 29,6	2,2 - 2,3	1550 - 3700

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux étudiés

Deux gypses étudiés sont extraits dans l'Est de l'Île de France. Ils proviennent de la base de la première masse du gypse priabonien. Le premier gypse est un gypse de type matriciel noté G1. Le second est de type saccharoïde et noté G2. Les 2 sites de prélèvement sont distants de 4 km environ. Le troisième gypse étudié, soit un gypse saccharoïde triasique noté G3, provient d'une carrière des Hautes-Alpes.

Une analyse par diffractométrie des rayons X montre que les deux gypses issus du bassin de Paris présentent des compositions similaires avec un taux de gypse supérieur à 90% auquel s'ajoutent du quartz et de la calcite. Le gypse saccharoïde parisien se caractérise par la présence en faible quantité de zircon (ZrSiO₄) et de sidérite (FeCO₃) conférant à la roche une couleur jaunâtre. Le gypse triasique est également composé majoritairement de gypse mais il comporte une diversité de minéraux plus importante comme de la phlogopite (KMg₃AlSi₃O₁₀ (OH,F,Cl)₂), des oxydes, des argiles, du quartz et du zircon.

2.2 Caractérisation des propriétés microstructurales, hydrauliques et mécaniques

Les capacités d'écoulement d'un fluide dans un massif rocheux ne dépendent pas uniquement du volume de vide de la roche encaissante mais principalement de la

structure de la porosité et de son accessibilité. Le seul volume de vide ne suffit pas à décrire la porosité mais une analyse plus fine doit être menée. On doit distinguer la porosité totale à l'eau (N_t), la porosité libre (N_{48}) et la porosité piégée (N_p) telles que définie par Bousquie (1979). La porosité libre est le volume de pores librement accessibles à l'eau par imbibition capillaire. La porosité piégée est le volume de pores restant occupé par l'air lors d'un essai d'imbibition. Cette porosité piégée résulte des variations dimensionnelles et de la rugosité des capillaires des roches considérées.

La porosité totale a été quantifiée selon la méthode de la triple pesée en suivant la norme NF EN 1936 (2007). Elle permet d'obtenir la masse volumique de l'échantillon ainsi que la porosité à partir de la différence de la masse saturée et la masse obtenue par pesée hydrostatique d'un échantillon.

Les porosités ouvertes (N_{48}) et piégées (N_p) ont été obtenues via le protocole de la norme NF B.10-513 (1991). Les échantillons après avoir été séchés à l'étuve (50°C), ont été immergés pour déterminer selon le même principe de la triple pesée, la porosité naturellement accessible à l'eau. La porosité totale (N_t) est obtenue à partir d'une saturation sous vide, celle ouverte (N_{48}) par une saturation à l'air libre. La différence entre ces deux porosités permet de déterminer la porosité piégée (N_p). Précisons que les essais ont été réalisés dans de l'eau présaturée en gypse dissous afin de bloquer la dissolution pendant la mesure de porosité et de préserver les échantillons lors des pesées.

Le coefficient de capillarité C_1 a été déterminé selon la norme NF EN 1925 (1999). Cette dernière consiste à suivre la prise de masse d'eau par unité de surface et de temps d'un l'échantillon déposé dans un conteneur au fond duquel une fine lame d'eau (2 à 3 mm) est présente. La vitesse d'ascension capillaire permet de mesurer C_1 .

Les courbes de distributions des diamètres de pores ont également été déterminées par des essais de porosimétrie par intrusion de mercure après lyophilisation précédée d'une trempe dans l'azote liquide. Le gypse étant un minéral dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), des analyses par diffraction de rayons X confirment que la lyophilisation n'affecte pas l'eau de constitution du minéral. Tous les pores sont explorés exception faite des pores < 6 nm non accessibles compte tenu des pressions d'injection du mercure appliquées.

Du point de vue microstructural, une analyse pétrographique sur des lames minces de roche incluse avec une résine colorée permet d'observer directement les porosités compatibles avec la microscopie optique. Compte tenu de la dureté de 2 de la roche selon l'échelle de dureté MOHS et sa sensibilité à l'eau, la réalisation des lames a nécessité la mise au point d'un protocole particulier (sciage à l'huile, utilisation de résines basse température avec intégration de silice et d'un colorant bleu pour mettre en évidence la porosité).

Enfin, une méthode non destructive soit la mesure de la vitesse du son V_p (onde P) a permis d'évaluer les propriétés mécaniques des 3 gypses étudiés. Cette méthode permet de déterminer un module de Young (E_{dyn}) via la formule de l'Eq(1) avec L la longueur de l'éprouvette (m).

$$E_{\text{dyn}} = V_p^2 \times L \quad \text{Eq(1)}$$

La vitesse du son (mesurée sur les éprouvettes séchées) est évolutive en fonction de la quantité de vide et d'anomalie au sein du matériau. Un minéral sans défaut a ainsi une vitesse du son optimale V_t , vitesse qui va diminuer avec l'altération et la modification de la minéralogie. A partir de la différence entre la vitesse théorique optimale et celle mesurée sur une éprouvette donnée, un indice de qualité (ou de continuité) peut être calculé selon Eq(2). Cet indice est en relation directe avec la porosité selon Tourenq et al. (1971) et il permet de distinguer de manière simple la proportion de vides dus à la fissuration et celle directement issue de la porosité de la roche.

$$I_c = (V_p/V_t) \times 100 \quad \text{Eq(2)}$$

Cet indice de continuité permet en lien avec la porosité totale mesurée de distinguer la porosité fissurale et porale, via une lecture graphique de la Fig. 4. Nous prenons dans cette étude pour vitesse du son maximale du gypse sans défaut (V_t), une valeur de 5200 +/- 200 m/s (Auvray, 2003).

3 Résultats expérimentaux

3.1 Observation microscopique et étude pétrographique des gypses testés

Le gypse G1 à grains fins est de type matriciel avec une couleur grise compte tenu des grains gris foncés disséminés dans la matrice (Fig.1A). Il se compose majoritairement d'une matrice finement divisée enserrant des grains de 0,2 mm de diamètre (Fig. 2A) subautomorphes à xénomorphes présentant de nombreuses traces d'altération chimique sur leurs pourtours et au sein des clivages. Les surfaces sont également marquées par la présence de microcristaux dans des teintes de polarisation du 3^{ème} ordre en lumière polarisée analysée (LPA), identifiés comme de la calcite. La porosité observée au microscope optique à l'aide de résine colorée en bleu est principalement micrométrique et répartie de manière homogène au sein de la matrice. Quelques pores de 40 μm sont localement visibles mais peu présents à l'échelle des lames pétrographiques réalisées (lames de 6x4,5 cm). Des variations de granulométrie sont observées sur l'ensemble des éprouvettes avec des zones plus finement divisées.

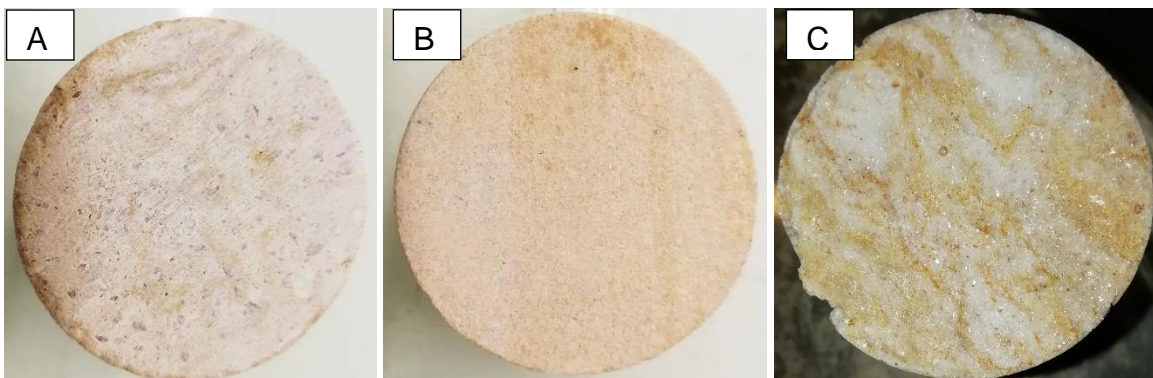


Figure 1. Visualisation des gypses étudiés (diamètre des éprouvettes = 5 cm). A) gypse matriciel parisien G1, B) gypse saccharoïde parisien G2, C) gypse saccharoïde triasique G3.

Le gypse G2 est un gypse saccharoïde de couleur ocre et d'aspect homogène (Fig. 1B). Il est constitué de grains sphériques d'un diamètre de 0.2 à 0.4 mm dans une matrice cimentée (Fig. 2B). Quelques grains plus grossiers sont disséminés. La phase de liaison (matrice) est de nature gypseuse et elle est peu présente. Ce gypse présente un aspect homogène malgré la présence locale d'un réseau de fissures et de poches de dissolution (de plusieurs cm d'extension) observés lors du carottage des éprouvettes. Une partie de ces vides est remplie partiellement par des cristallisations centimétriques sous forme de feuillets translucides de gypse pur (selon la DRX). La porosité de type inter-granulaire apparaît bien développée et connectée. Des capillaires sont observés avec des dimensions supérieures à 10 μm . Des traces d'altérations et de précipitations de calcite similaires à celles observées pour le gypse matriciel sont observées.

Le gypse G3 étudié est un gypse de type saccharoïde avec de nombreux interlits d'argiles avec présence d'oxydes. Le contexte orogénique de formation de ce gypse lui a

donné un aspect légèrement plissé (Fig. 1C). Les éléments sont de formes sub-automorphes, allongés de 0.5 mm de long par 0.2 mm de large. De la phlogopite fortement altérées est présente en faible quantité mais avec une répartition homogène sur la lame pétrographique observée (Fig. 2C). Des traces d'altérations sous la forme de « bords rongés » et progressant suivant les plans de clivage sont également présentes ainsi que des microcristaux de calcite. La porosité est de type inter-granulaire avec 2 types de structure (Fig. 2C). Des réseaux fins de porosité (autour de 10 μm) se développent entre les faces longitudinales des minéraux et des pores plus importants (40 μm environ) sont observés au niveau des points de rencontre de ces fins capillaires. Ce type de structure à une répartition non homogène à l'échelle de la lame pétrographique observée.

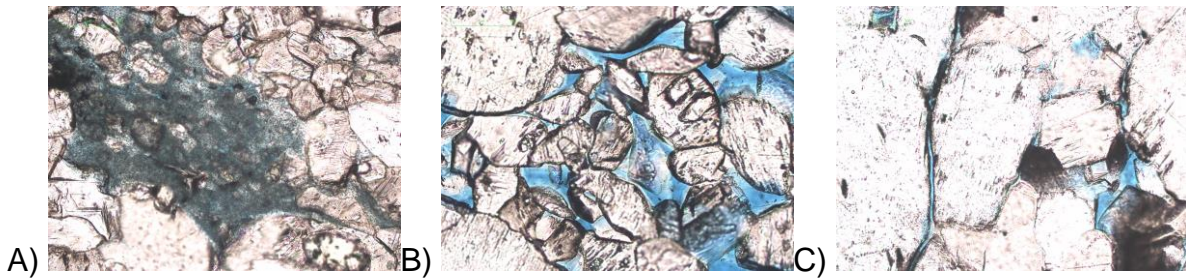


Figure 2. Observation de la porosité au microscope optique en lumière polarisée non analysée (LPNA). A) gypse matriciel G1 (x200), B) gypse saccharoïde G2 (x200), C) gypse saccharoïde G3 du Trias (x200). En bleu : résine colorée.

3.2 Quantification de la porosité des gypses testés

Les 3 roches étudiées présentent des volumes de vide assez similaires (Tableau 2). Les gypses parisiens G1 et G2 présentent des volumes de vides en moyenne de 9-10% contre 8% pour le gypse du Trias G3. Ces valeurs sont en accord avec la littérature (Tableau 1), avec environ 10% de porosité mesurée pour les gypses parisiens. La porosité du gypse G3 apparaît quant à elle légèrement supérieure avec 8% de porosité contre 6% au maximum selon la littérature (Fabre and Dayre, 1982). En comparaison, la porosimétrie par intrusion de mercure (porosité Hg dans le Tableau 2) révèle des porosités totales supérieures à celles obtenues par la méthode des triples pesées (Nt) pour les gypses saccharoïdes G2 et G3. Généralement c'est plutôt l'inverse qui est observé étant donné que la mesure à l'aide de mercure ne permet pas de sonder les pores les plus petits. Le procédé de lyophilisation qui nécessite une phase de refroidissement par trempage dans l'azote liquide pouvant entraîner une microfissuration via le choc thermique pourrait expliquer ces différences d'environ 2 à 4% respectivement.

Tableau 2. Caractérisation de la porosité des gypses étudiés.

Les mesures sont réalisées sur 12 éprouvettes pour établir les moyennes et écart type.

	Porosité totale Nt (porosité à l'eau)		Porosité ouverte N48		Porosité piégée Np		Capillarité C_1 ($\text{g.m}^2.\text{s}^{-1}$)		Porosité totale (Hg) (%)
	Moy (%)	Ecart type	Moy (%)	Ecart type	Moy (%)	Ecart type	Moy (%)	Ecart type	
	Gypse G1	9,7	2,4	9,3	3,2	0,4	0,9	21,1	
Gypse G2	10,5	2,8	7,0	2,6	3,5	0,5	13,3	11,9	15,4
Gypse G3	8,0	2,0	5,7	1,3	2,3	0,8	49,9	9,2	11,0

Concernant la porosité accessible à l'eau, la porosité du gypse matriciel G1 apparaît presque entièrement accessible avec seulement 0.4% de porosité piégée alors que les

gypses de type saccharoïde G2 et G3 possèdent une porosité piégée de 3,5% et de 2,3% respectivement (soit 33% et 28% de la porosité totale mesurée).

Les phénomènes de remontées capillaires permettent de mesurer sur les 3 gypses un coefficient de capillarité avec des valeurs inférieures à $50 \text{ g.m}^2.\text{s}^{-1}$. Le gypse saccharoïde G3 présente la valeur la plus élevée avec une capillarité atteignant $50 \text{ g.m}^2.\text{s}^{-1}$ (contre 21.1 et $13.3 \text{ g.m}^2.\text{s}^{-1}$ pour G1 et G2). Ces variations malgré des volumes de vide total et accessible (porosité ouverte) à l'eau assez similaires démontrent que d'autres paramètres du réseau poral doivent être pris en compte pour expliquer les écoulements. La capillarité du gypse saccharoïde parisien G2 a été obtenue en mettant de côté un certain nombre d'éprouvettes qui présentaient des fissures, ce qui entraîne des valeurs de capillarité supérieures à $100 \text{ g.m}^2.\text{s}^{-1}$. Ces valeurs sont exclues du calcul des moyennes. Il en a été de même pour les mesures de vitesse du son

La porosimétrie par intrusion de mercure (Fig. 3) met en évidence des distributions de taille de pores différentes entre le gypse matriciel G1 et les gypses saccharoïdes G2 et G3. Le gypse G1 possède deux familles de pores avec un diamètre moyen autour de $0,1 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$ respectivement (mais avec une large distribution couvrant globalement toute la gamme de mesure entre $0,01$ et $100 \mu\text{m}$). Les gypses saccharoïdes G2 et G3 ont quant à eux des distributions de taille de pore assez similaires avec une majorité de pore de diamètre moyen égal à $15 \mu\text{m}$ pour G2 et à $9 \mu\text{m}$ pour G3. Ce dernier présente une largeur de pic plus importante montrant la présence de pores allant de 2 à $20\text{-}30 \mu\text{m}$. Ces résultats montrent que les échantillons de gypse testés dans cette étude possèdent des diamètres de pore inférieurs à ceux obtenus par Bustamante et al. (2020) dont la porosité était majoritairement $> 100 \mu\text{m}$. Les gypses saccharoïdes G2 et G3 sont en revanche similaires aux gypses décrits par Ramon et al. (2021) et dont les pores avaient une dimension autour de $10 \mu\text{m}$. Cette famille après observation en microscopie électronique à balayage serait à associer à un mélange entre porosité inter-granulaire (des grains faiblement liés) et microfissures alors que la porosité inférieure observée autour de $1 \mu\text{m}$ serait la porosité matricielle du gypse.

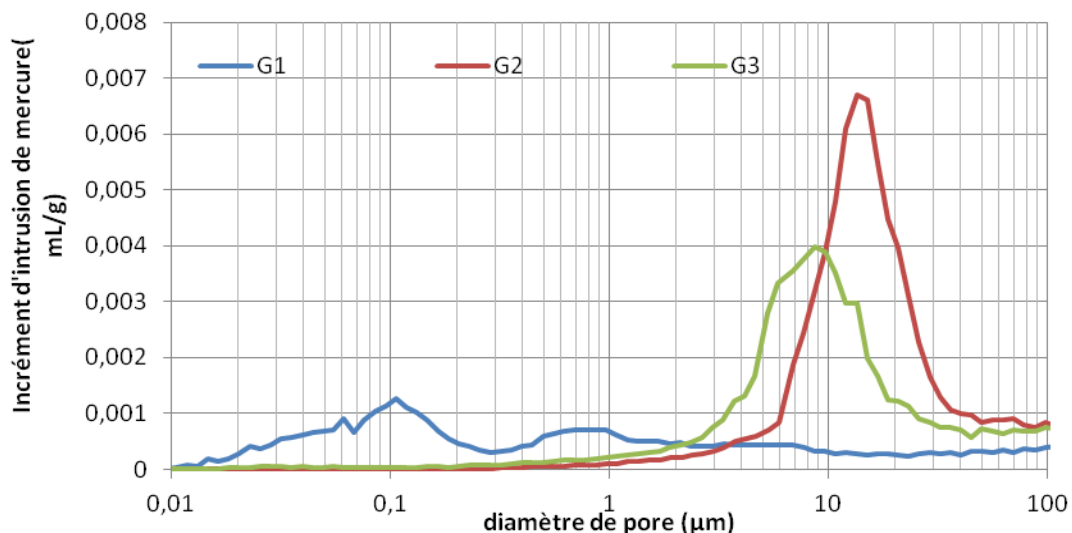


Figure 3. Distribution de taille de pores dans les gypses étudiés.

3.3 Propriétés mécaniques des gypses testés

Les vitesses du son mesurées sur les échantillons de gypse testés (Tableau 4) montrent des valeurs en accord avec la littérature (Tableau 1). Les vitesses du son mesurées autour de 3700 m et 3400 m/s pour G1 et G2 sont relativement proches de celles mesurées sur les gypses parisiens. Le gypse G3 a une vitesse de propagation plus faible

d'environ 1000 m/sec. Cette variation peut être attribuée à la variabilité minéralogique qui caractérise ce gypse (la présence des interlits d'argiles/oxydes) ralentissant la propagation des ondes). Cette valeur approche celle obtenue par Auvray (2003) dans le Tableau 1. Dans le Tableau 4, les écarts types sur les mesures de V_p des gypses parisiens G1 et G2 sont variables. Dans le cas du gypse saccharoïde G2, la présence d'une fissuration doit expliquer en partie cette variabilité alors que dans le cas du gypse matriciel (G1), cette variabilité est causée par la variation de texture précédemment montrée par les observations pétrographiques et microscopiques. Les éprouvettes les plus homogènes présentent des vitesses du son avoisinant les 4000 m/s, tandis que celles alternant couche à grains fins et couches à grains plus « grossiers » ont des vitesses du son plus proches des 3000 m/s.

Enfin, l'indice de continuité (I_c) des échantillons testés apparaît comme modéré pour les gypses parisiens G1 et G2 et faible pour le gypse du Trias G3. Pour ce dernier, le rôle des stratifications et des variations minéralogiques sont là encore à l'origine de la différence observée. D'après la Figure 4, un pourcentage de 1 à 2% de leur porosité est attribuable à la fissuration.

Tableau 3. Mesure de la vitesse du son et calcul du module de Young dynamique.

	Gypse G1		Gypse G2		Gypse G3	
	moyenne	écart type	moyenne	écart type	moyenne	écart type
Vitesse du son V_p (m/s)	3706	562	3399	378	2590	7.66
E dyn	22,7	8,0	20,5	5,53	12,3	4,00
I_c (%)	0,7	--	0,65	--	0,5	--

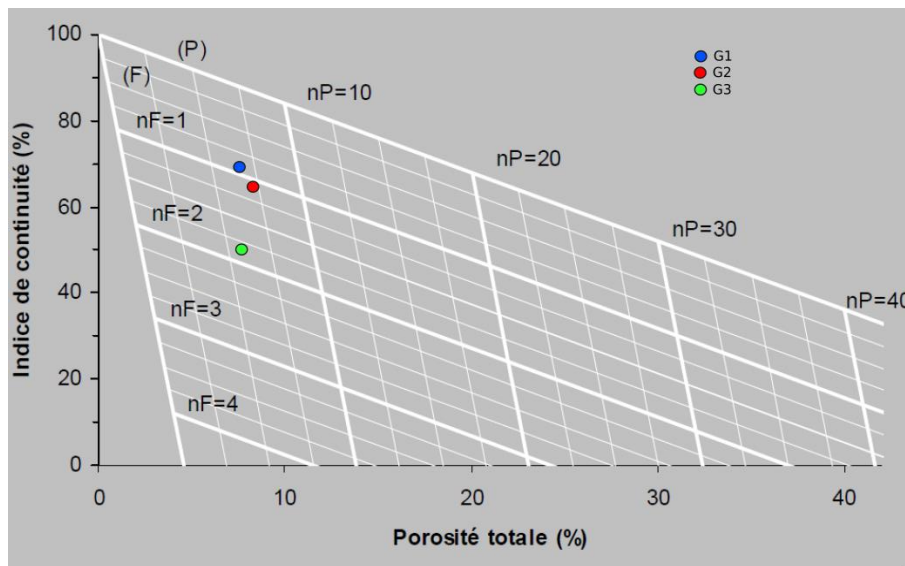


Figure 4. Evaluation par lecture du graphique de la porosité liée aux pores (nP en %) et de la porosité liée aux fissures (nF en %) à partir de l'indice de continuité qui est calculé par Eq(2) et de la porosité totale à l'eau (N_t) – Tourenq (1971) modifié par Saad (2011).

4 Conclusions

Le gypse est une roche évaporitique susceptible de se dissoudre au contact d'écoulement d'eau à sa surface mais également via sa porosité. La littérature montre une variabilité de la porosité des gypses en fonction de leur contexte de formation. La texture de la roche, notamment les familles de pores apparaît comme déterminantes sur ses propriétés

hydrauliques voire mécaniques. Le gypse matriciel G1 et les gypses saccharoïdes (G2 et G3) présentent des volumes de vides similaires mais une structuration des pores différente avec une répartition plus hétérogène pour le gypse matriciel (avec des quantités de pores capillaires plus fins), tandis que les gypses saccharoïdes présentent une structure avec des pores de plus grande taille ($> 10 \mu\text{m}$). Cette différence génère des conditions d'écoulement qui diffèrent en fonction des gypses testés. Ces écoulements sont en partie conditionnés et favorisés par la fissuration qui est plus ou moins développée dans la masse du matériau gypseux. Ces écoulements, compte tenu de la cinétique rapide de dissolution du gypse, peuvent générer des gradients de porosité via l'élargissement des pores existants et l'apparition de chemins préférentiels. Mieux comprendre l'évolution des cavités gypseuses passe alors par une meilleure compréhension de l'évolution de ces gradients de porosité et de leurs impacts sur les propriétés hydromécaniques du massif rocheux.

5 Références bibliographiques

- NF EN 1936 , 2007. Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouverte et totale. Norme AFNOR
- NF EN 1925, 1999. Méthodes d'essai pour pierres naturelles, Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Norme AFNOR
- NF B10-513, 1991. Produits de carrières - Pierres naturelles-Essai de gel. Norme AFNOR
- Arnaud, S., Batilliot, L., Batista, D., Batteux, R., Séjourné, D., Valette, L., Serratrice, J.-F., 2017. Opération de recherche PRECAS (RPR2S12004) Sujet n°5 – Analyse de la stabilité des cavités – comportement, mécanismes de vieillissement dissolution. (No. PR2S12004). CEREMA, Aix en Provence.
- Auvray, C., 2003. Vieillissement et comportement rhéologique du gypse (mémoire de thèse). Institut national Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Bousquie, P., 1979. Texture et porosité de roches calcaires: Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Bustamante, R., Vázquez, P., Cantarell, M., Monjo, J., 2020. Adapted ageing tests for the evaluation of alabaster used in the restoration of Bishop's Palace of Tarazona. *Materiales de Construcción* 70, 219–231. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.08619>
- Fabre, D., Dayre, M., 1982. Propriétés géotechniques de gypses et anhydrites du Trias des alpes de savoie (France). *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur* 91–98.
- Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A., Sauro, U., 1996. Gypsum karst of the world. *international journal of speleology* 25, 307.
- Moiriat, D., 2001. Evolution des désordres dans les carrières souterraines abandonnées (sciences). Paris Xi Orsay, Paris.
- Moiriat, D., Pothérat, P., Massieu, E., Durville, J.L., 2006. Données expérimentales sur le fluage du gypse saccharoïde en condition saturée.
- Ramon, A., Caselle, C., Bonetto, S.M.R., Costanzo, D., Alonso, E.E., 2021. Effect of Microstructure and Relative Humidity on Strength and Creep of Gypsum. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 54, 4121–4145. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02510-2>
- Saad, A., 2011. Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides (H_2O , CO_2) dans leurs processus d'altération (géotechnique). Université de Paris Est, Paris.
- Tourenq, C., Fourmaintraux, D., Denis, A., 1971. Propagation des ondes et discontinuités des roches. Presented at the Proceedings Symposium, IRSM, Nancy.