

LE CHOIX DU BETON DANS LES TERRAINS GYPSIFERES DE LA LIGNE 16 DU GRAND PARIS EXPRESS

CONCRETE CHOICE IN THE GYPSUM GROUNDS OF LINE 16 OF THE GRAND PARIS EXPRESS

Alexandre GIROUX¹, Philippe VERDURE¹, Nabil ZIANI¹, Philippe ROUSSOT¹, Baïla DEME²

¹ Egis, Guyancourt, France

² Société du Grand Paris, Saint-Denis, France

RÉSUMÉ – La conception d'un projet souterrain en béton doit tenir compte des attaques chimiques des nappes et du sol pour limiter notamment la réaction sulfatique externe. Le choix du béton nécessite une bonne connaissance du contexte géologique et hydrogéologique du sous-sol comme l'atteste des exemples tirés d'un projet s'inscrivant dans les formations gypseuses du Nord Est parisien.

ABSTRACT – Design of a concrete project must consider chemical attacks from water tables and soil, to limit the external sulphate reaction. Choice of concrete requires a good knowledge of the geological and hydrogeological context of the subsoil, as evidenced by examples taken from a project in the gypsum formations of North East Paris.

1. Introduction

La conception d'ouvrages souterrains en béton armé doit tenir compte de la poussée des terres et des actions hydrogéologiques. Leur durabilité dépend également de la bonne prise en compte des critères environnementaux. Parmi eux, les attaques chimiques des sols et des nappes naturelles peuvent nécessiter le recours à des dispositions constructives particulières.

En région parisienne, le sous-sol est particulièrement riche en sulfates que l'on retrouve principalement dans le gypse. En présence d'eau, cet agent chimique interagit avec le béton en dégradant ses propriétés mécaniques. Pourtant, aucune pathologie liée à ces réactions sulfatiques externes n'a été recensée par le passé. Sur le projet du métro du Grand Paris Express de la ligne 16, les reconnaissances géotechniques et les analyses chimiques de sols et des nappes ont permis de mieux caractériser ce risque et de choisir les parades adéquates.

Dans une première partie seront présentés le projet, les ouvrages concernés par ce risque et les reconnaissances effectuées pour quantifier la présence de sulfates. Puis dans une seconde partie, la réaction sulfatique externe sera rappelée, ainsi que les dispositions réglementaires pour la quantifier et les parades associées. Enfin, la dernière partie présentera comment ces dispositions ont été appliquées sur le projet de la ligne 16, en particulier à partir de deux exemples singuliers.

2. Présentation du projet

Le projet du Grand Paris Express prévoit la réalisation de 4 nouvelles lignes de métro (15, 16, 17 et 18) et le prolongement au nord et au sud de la ligne 14. Le Maître d'Ouvrage de ce projet hors norme est la Société du Grand Paris. Il consiste en la création de 200 km de voies nouvelles et 68 gares. La ligne 16, située au Nord Est de la région Ile de France (Figure 1), comportera 9 gares et reliera celles de Saint-Denis Pleyel à Noisy-Champs,

par un tunnel souterrain, de 10 m de diamètre et de 29 km de longueur. De plus, 36 puits de secours et de ventilation appelés également ouvrages annexes seront réalisés tous les 800 m et raccordés au tunnel par des rameaux. Tous ces ouvrages sont réalisés en béton armé à l'abri d'écrans de soutènements provisoires et définitifs de type parois moulées (0,6 à 1,5 m d'épaisseur) ou pieux sécants (0,6 à 1 m de diamètre), hormis les voussoirs des tunnels qui sont, soit en béton armé, soit en béton fibré. Les études de conception de la ligne 16 ont été confiées au groupement de Maitrise d'œuvre Egis - Tractebel.

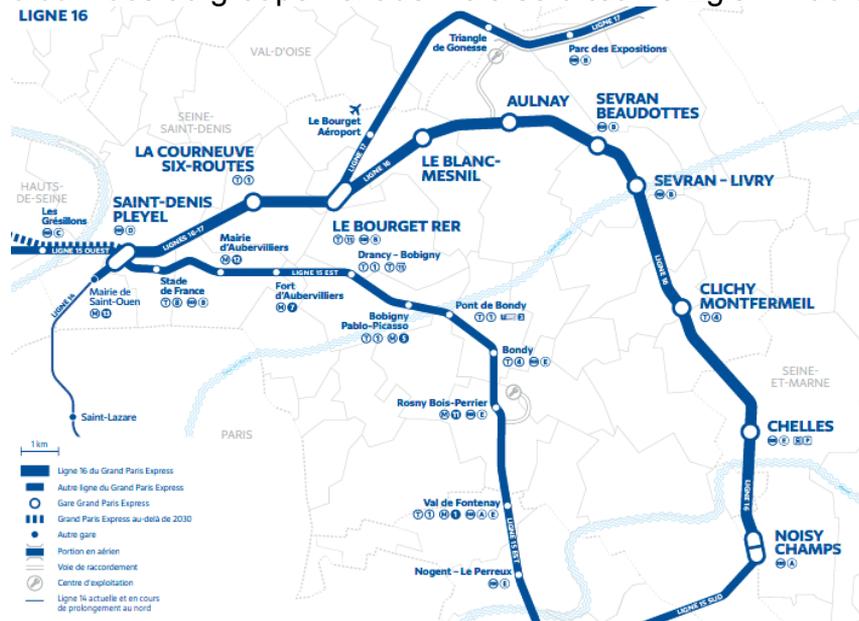


Figure 1 : tracé Ligne 16 (Société du Grand Paris)

Le tracé de la ligne 16 est implanté successivement sous la Plaine de France, le plateau de Clichy-Montfermeil puis la vallée de la Marne. Il s'inscrit, sous des formations quaternaires, dans la série sédimentaire tertiaire du Bassin de Paris, dans des terrains pouvant être argileux, sableux, marneux ou calcaires. Malgré leur hétérogénéité, toutes ces formations géologiques contiennent du gypse. Cette roche tendre peut se présenter sous différentes formes (Dumont 2021), du banc massif alabastré de plusieurs mètres d'épaisseurs à des cristaux millimétriques.

Le projet se développant entre 15 et 60 m de profondeur est inévitablement baigné par une ou plusieurs nappes. Les études environnementales ont montré que les sulfates constituaient la principale caractéristique agressive au sens de la norme EN206-1/CN (Picaud, 2021). La Figure 2 montre l'évolution de la concentration en sulfates des nappes du Bartonien et du Lutétien (109 mesures) tout le long du projet ($[SO_4^{2-}]_{max}=1400$ mg/L).

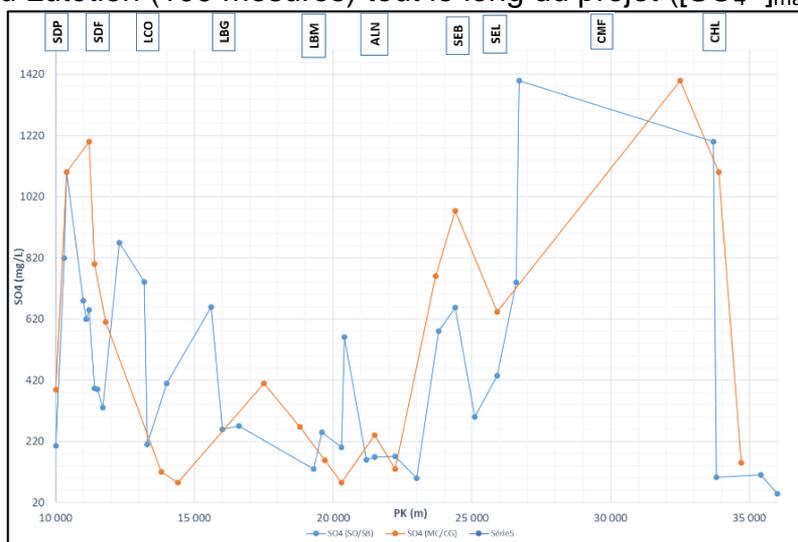


Figure 2 : Teneur en sulfates par nappes selon point kilométrique et les gares L16 (EGIS)

Les teneurs en sulfates sur brut des sols, réalisées dans le cadre des études de pollution, complètent les mesures de sulfates totales. 1251 analyses montrent que les teneurs en sulfates dans les sols varient de 75 à 230000 mg/kg, répartissant les échantillons dans 5 classes d'exposition XA (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Répartition des teneurs en sulfates par sols – GPE L16 (EGIS)

Formations géologiques		XA0	XA1	XA2	XA3	>XA3	Nombre essais
R	Remblais	51 %	12 %	26 %	8 %	3 %	102
EB	Eboulis	100 %					2
AM	Alluvions modernes	70 %	4 %	22 %	4 %		27
AA	Alluvions anciennes	80 %	5 %	15 %			20
LP	Limons des plateaux	100 %					4
TB	Calcaire de Brie	47 %	20 %	33 %			15
GV	Argile verte	52 %	9 %	22 %	17 %		23
MP	Marnes de Pantin	24 %	20 %	44 %	12 %		25
MA	Marnes d'Argenteuil	23 %	2 %	45 %	20 %	9 %	44
CC	Calcaire de Champigny	100 %					5
MMG	Masses et Marnes du Gypse	36 %	5 %	22 %	8 %	29 %	119
SV	Sables verts	67 %	10 %	19 %	2 %	2 %	52
SO	Calcaire de Saint-Ouen	48 %	6 %	39 %	4 %	3 %	279
SB	Sables de Beauchamp	36 %	18 %	42 %	4 %	1 %	325
MC	Marnes et Caillasses	29 %	4 %	54 %	12 %	1 %	179
CG	Calcaire grossier	40 %	10 %	50 %			30
Nombre essais		525	121	471	79	55	1251

3. La réaction sulfatique externe

Le béton est constitué d'un squelette granulaire solidarisé par une pâte de ciment produite lors de son hydratation. La pâte de ciment hydratée est constituée d'hydrates (silicate de calcium hydraté (C-S-H), hydroxyde de calcium, aluminates...) et d'une phase liquide interstitielle fortement basique. La Figure 3 montre des grains d'anhydre du ciment : point 1 = Alite $(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)$ ou C3S et point 2 bélite $(\text{CaO})_2(\text{SiO}_2)$ ou C2S.

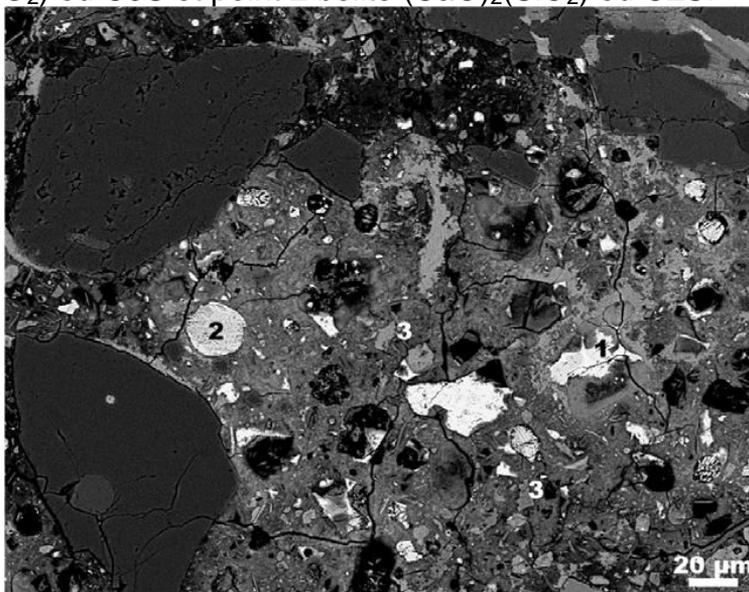


Figure 3 : Lamme mince de béton au Microscopie électronique à balayage (EGIS)

3.1. Actions des sulfates de l'environnement sur le béton

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement la pâte de ciment du béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans). Bien qu'il soit nécessaire de considérer ce risque, les cas réels d'ouvrage atteints en France sont restreints ou absents, comme en région francilienne. Les sources de sulfates sont multiples :

- Sources internes au béton : granulats, ciment, eau de gâchage ;
- Sources externes au béton : eau séléniteuse, atmosphère, pollution, sols.

La plupart des sols contiennent du sulfate (CaSO_4) mais à des concentrations faibles (0,01 % à 0,05 % de sol exprimé en SO_4), non agressives pour le béton. Le sous-sol du bassin parisien riche en gypse peut présenter des concentrations jusqu'à 5 % localement. Les nappes contiennent également des sulfates dissous dont l'agressivité dépend de leur concentration et du cation associé (cf. Figure 4). Hors contexte gypseux, ils sont d'origine agricole (MgSO_4 , K_2SO_4 ou $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ou industrielle (NaSO_4).

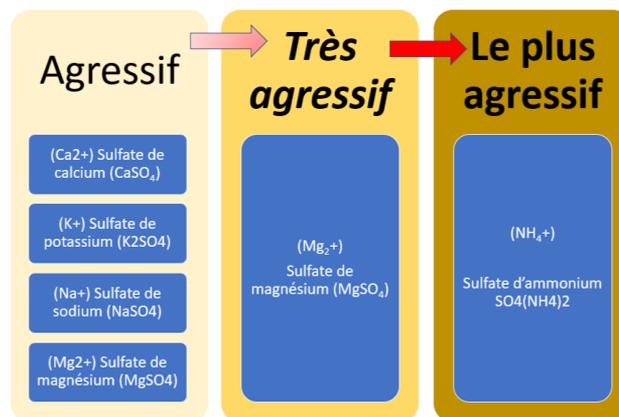


Figure 4 : Agressivité des sulfates (EGIS)

Les attaques des sulfates externes nécessitent obligatoirement un vecteur de transport qui est l'eau. Les sulfates en solution pénètrent depuis l'extérieur jusqu'au cœur du béton et détériorent la pâte de ciment. Ils réagissent avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et l'aluminate de calcium hydraté (C_3A) pour former du gypse puis de l'ettringite. La réaction se déroule dans le béton en deux étapes (cf. Figure 5).

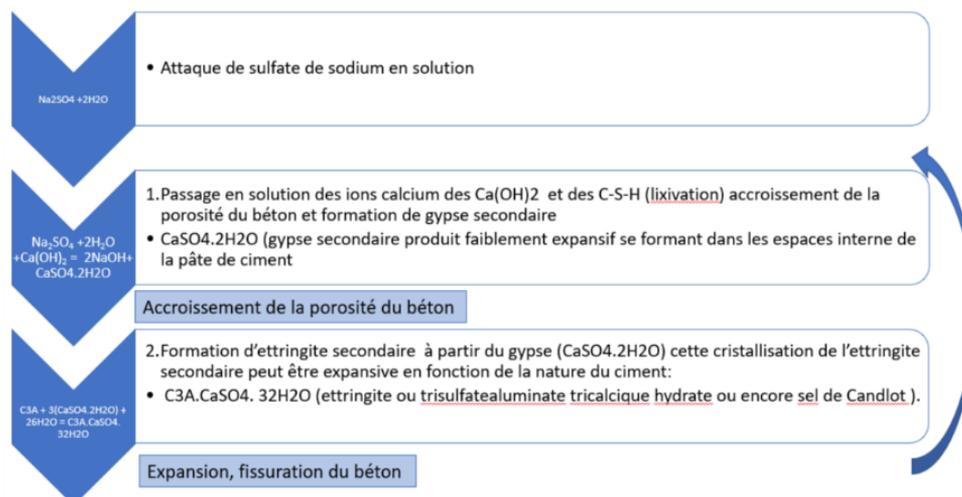


Figure 5 : Synoptique d'attaque du béton par du sulfate de sodium (EGIS)

À l'étape 1, la formation de gypse avec l'augmentation de la perméabilité du béton favorise la pénétration des sulfates. A l'étape 2, la cristallisation, expansive, s'accompagne d'une pression qui mène à un éclatement de la microstructure du béton. Cette dernière permet une accélération de la pénétration d'eau chargée en sulfates augmentant le volume de cristallisation et développant la fissuration : c'est l'effet *boule de neige*.

4. PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DÉLÉTÈRE DES SULFATES SUR LE BÉTON, NORMES ET GUIDES.

Le fascicule de documentation FD P 18-011 « Définition et classification des environnements chimiquement agressifs, recommandations pour la formulation des bétons » définit des classes d'environnement chimique XA1, XA2 et XA3 qui correspondent respectivement à des environnements à faible, modérée et forte agressivité chimique. Le Tableau 2 présente les limites des différentes classes pour les sulfates.

Tableau 2 : Classe d'exposition XA suivant les seuils de dosage en sulfates (NF EN 206/CN)

Environnements chimiques agressifs	XA1	XA2	XA3
SO ₄ ²⁻ (mg/L) dans l'eau	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	>3 000 et ≤ 6 000
SO ₄ ²⁻ (mg/kg) dans le sol	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10 ⁻⁵ m/s peuvent être affectés à une classe inférieure			

À partir des concentrations en SO₄²⁻ et la classe XA correspondante, la norme NF EN 206/CN (durée de vie 50 ans) et le FASCICULE 65 (durée de vie 100 ans) permettent d'établir une composition théorique du béton (rapport E/L, dosage minimum en liant, nature du ciment, type d'addition ; cf. Tableau 3) capable de résister à leur agression.

Tableau 3 : Valeurs limites spécifiées pour la composition et les propriétés du béton XA

		Norme EN 206/CN NA F.1			Fascicule 65 2008 /2016		
Environnements chimiques agressifs		XA1	XA2	XA3	XA1	XA2	XA3
Rapport Eeff/Liant		0,55	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40
Classe de résistance mini		C30/37	C35/45	C40/50	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur mini en ciment		330	350	360	330	350	360
Ciment CEM I +A rapport maxi A/(A+C)	Cendre Volantes				0,30	0,30	0,30
	FS				0,10	0,10	0,10
	Métakaolin type A				0,15	0,15	0,15
	Laitier moulu type A	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Laitier moulu type B ou C				0,30	0,30	0,30
Ciment CEM II +A rapport maxi A/(A+C)	Cendre Volantes				0,20	0,30	0,30
	FS				0,10	0,10	0,10
	Métakaolin type A				0,10	0,10	0,10
	Laitier moulu type A	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Laitier moulu type B ou C				0,20	0,20	0,20
Nature du ciment					Suivant FD P 18-011		

La classe d'exposition XA 3 des sols est limitée par une teneur de 24 000 mg/kg. Au-delà de cette valeur ou en présence de gypse, le fascicule de documentation FD P 18-011 impose une protection externe (enduit, revêtement) ou interne (imprégnation).

L'application d'un revêtement protecteur sur les parties à protéger peut être soit un :

- Film mince de type peinture ;
- Revêtement semi-épais à comportement élastoplastique ;
- Revêtement ou équipement (par exemple pieux tubés) épais (plastique ou métallique). L'épaisseur de ce dernier dépendra de la corrosion du métal.

L'utilisation de produit d'imprégnation peut être soit un :

- Produit hydrophobe : introduit dans les pores du béton, ce produit empêche l'adsorption et la pénétration de l'eau par capillarité ;
- Minéralisateur obturateur de capillaires : mélangé au béton à l'état liquide, ce produit diminue la taille des pores du ciment durci ;
- Inhibiteur de corrosion : Introduit par imprégnation du béton durci, il ralentit la vitesse de corrosion des armatures ;
- Adjuvant limitant le craquage du béton.

Ces protections étant impossible à mettre en œuvre dans le cadre des parois moulées, on s'orientera préférentiellement vers les solutions alternatives :

- Utilisation de ciment spécial plus résistant aux sulfates, comme les ciments sursulfatés (NF EN 15743) ou les ciments d'aluminates de calcium (NF EN 14647) ;
- Couche de béton sacrificielle à l'extérieur de la paroi. L'épaisseur de cette couche devra être suffisante pour assurer une protection pendant de la vie de l'ouvrage ;
- Pour les sols argileux, si la perméabilité est inférieure à 10^{-5} m/s (Tableau 2) : XA3.

5. Exemple de teneurs en sulfates supérieures au seuil XA3

La détermination des classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques est relativement aisée pour les teneurs du Tableau 4. Elle est plus complexe lorsque le seuil maximal XA 3 est dépassé ou en présence de gypse.

La solubilité du sulfate de calcium étant de 2016 mg/L à 18°C (Filliat, 1981), revient à retenir une classe XA2 maximale pour les nappes en région parisienne (cf. Figure 2). Pour les sols, l'agressivité chimique dépend de l'eau qu'ils contiennent, selon la FD P 18-011. Il est donc indispensable de connaître la position des échantillons par rapport à la nappe et d'analyser la représentativité des teneurs en sulfates : l'échantillonnage n'est pas systématique et issu d'un sondage carotté « ponctuel » ; le gypse, de par ses conditions de formation erratiques, peut se présenter sous formes de lentilles non recoupées par les sondages. Chaque carotté doit donc être étudié, au cas par cas, en analysant les descriptions lithologiques, les teneurs en gypse des sols et les essais d'eau. Aussi, le Tableau 4 propose un logigramme déterminant la classe d'agressivité à retenir en distinguant la présence de gypse massif ou diffus.

Tableau 4 : Logigramme d'analyse des teneurs en gypse du sol (EGIS)

Présence du gypse selon plusieurs cas				
Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
$[SO_4^{2-}] < 2000$ mg/kg	$[SO_4^{2-}] > 2000$ mg/kg			
Absence de cristaux	Absence de cristaux	Cristaux diffus sur des épaisseurs mm à dm	Cristaux diffus sur des épaisseurs pluri m	Banc massif pluri cm à pluri m
XA0	Classe d'agressivité selon tableau 2 EN206-1. Pour le cas 3, en l'absence de mesures, XA2.		XA3 + Revêtement extérieur XA3 si $k < 10^{-5}$ m/s (sols argileux)	

Le premier exemple concerne la gare de Stade de France (Ligne 15). Cette gare souterraine est implantée dans la commune de Saint-Denis. Sa forme est trapézoïdale avec des parois moulées en béton armé, approximativement de 113 m x 32 m. L'excavation réalisée atteint 28 m de profondeur avec un niveau de nappe à 5 m/TN.

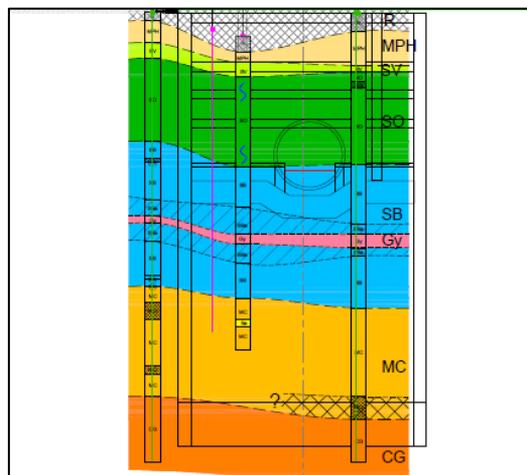


Figure 6 : Profil en long géologique de la gare de Stade de France (EGIS)

Une anomalie sulfatique est constatée dans les Sables de Beauchamp (cf. Figure 6). Il s'agit de bancs de gypse massif en contact avec les parois moulées, repérés au droit de 6 sondages, d'épaisseur variant entre 0,4 m et 1,4 m. Ce banc est situé entre deux couches des SB médians argileux qui l'isole de la nappe. Aucune circulation d'eau n'est possible. Ce gypse n'est pas considéré comme agressif. Néanmoins, deux essais d'eau disponibles dans les SB supérieurs indiquent des perméabilités horizontales de 1.10^{-7} et $2,6.10^{-6}$ m/s.

Le second exemple concerne la gare de Sevrans-Livry (ligne 16). Réalisée à l'abri d'une paroi moulée de forme rectangulaire 23 m x 50 m, l'excavation atteint une vingtaine de mètres de profondeur avec une nappe à 2,6 m/TN. Bien que le gypse se retrouve principalement sous forme diffuse dans les SO, SB et MC, des bancs massifs de gypse de 0,9 m d'épaisseur sont présents dans les SB. Coincés entre deux couches de marne ou d'argile, avec une teneur en sulfates mesurée de 22 000 mg/kg, et des perméabilités (9.10^{-6} à $1,2.10^{-6}$ m/s).

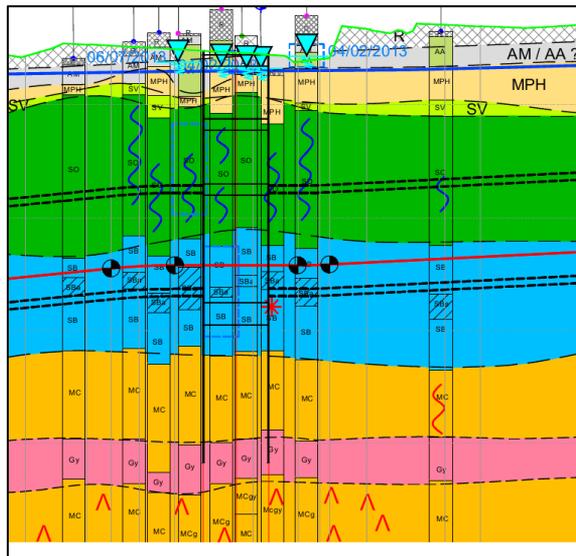


Figure 7 : Profil en long géologique de la gare de Sevrans-Livry (EGIS)

Dans les Marnes et Caillasses : deux bancs de gypse massifs pluri-métriques (1,1 à 3,5 m d'épaisseur cf. Figure 7) sont séparés entre eux par des couches marneuses. Ces bancs de gypse sont en contact avec la base des parois moulées de la gare. Des anomalies du même type sont relevées sur d'autres sondages carottés avec des épaisseurs variant de 0,2 à 6,2 m. L'analyse de 8 sondages carottés et 7 essais d'eau montrent que les Marnes et Caillasses peuvent être séparées en deux parties :

- Partie supérieure (8 m) sans gypse, de perméabilité supérieure à 10^{-5} m/s ;
- Partie inférieure (17 m) avec du gypse, de perméabilité inférieure à 10^{-5} m/s.

En conclusion, les classes d'exposition du béton à retenir pour les deux gares présentées, vis-à-vis des attaques chimiques liées aux sulfates des nappes et des sols, seraient respectivement XA2 et XA3 avec une protection externe (enduit, revêtement), en raison de la présence de gypse massif. Néanmoins, la perméabilité des couches enveloppant le gypse est inférieure à 10^{-5} m/s (cf. Tableau 2). Donc, la classe d'exposition du béton finalement retenue est XA3.

Les bétons des parois moulées mis en œuvre sur le GPE L16 respectent la NFP 1538, basée sur l'EN206/CN. Ce sont des bétons C40/50 et composés de ciment :

- CEM III /B 42,5 N-LH PM-ES 385 kg/m³ E/C = 0,43 (gare de Stade de France) ;
- CEM III /A 42,5 N-LH PM-ES 415 kg/m³ E/C = 0,42 (gare de Sevrans-Livry).

6. Conclusions

Le projet de métro souterrain de la ligne 16 est implanté dans un sous-sol riche en gypse, donc en sulfates. La réalisation d'ouvrages en béton armé doit tenir compte de cette contrainte dès la phase conception afin de choisir les dispositions constructives adéquates, et en particulier la formulation du béton. Des reconnaissances géotechniques et environnementales sont à mener pour quantifier et qualifier la présence de sulfates dans les sols et les nappes. En présence d'eau, les sulfates dégradent le béton au cours de la réaction sulfatique externe. Les normes définissent des classes d'attaques chimiques environnementales à partir de leur concentration dans les nappes phréatiques et les teneurs dans les sols. Ces classes renvoient vers des formulations de béton spécifiques. Même si les classes liées aux nappes sont, en région parisienne, limitées, les teneurs dans les sols peuvent dépasser les seuils maximaux de la norme. Des dispositions complémentaires peuvent s'avérer nécessaires, également en présence de gypse. En pratique, plusieurs cas ont été rencontrés tout le long de la ligne 16, de l'absence de sulfates à des bancs décimétriques de gypse. L'article présente ainsi un logigramme pour tenir compte de ce contexte particulier ainsi que deux exemples montrant pourquoi des classes d'agressivité XA3 ont été retenues pour des bétons de parois moulées en présence de gypse. Ce dernier apparaît souvent, dans les carottes, coincés entre deux couches argileuses peu perméables et l'isolant de la nappe. Ceci expliquerait sans doute l'absence de pathologies liées à la réaction sulfatique externe sur les ouvrages en béton armé recensés en région parisienne.

Enfin, une évolution des documents normatifs est prévue en 2022, dont le FD P18-480 « Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par la méthode performancielle ».

7. Références bibliographiques

- Picaud (2021), Sulfates résister grâce au laitier, Le Moniteur n°6164, page 50.
- Dumont (2021), Variabilité spatiale des formations gypsifères antéludiennes de la Plaine de France, Séance technique CFGI du 17 juin.
- Fascicule 65 (2018), Exécution des ouvrages de Génie-civil en béton, Cahier des clauses techniques et générales applicables aux marchés publics de travaux, 171 pages.
- FDP 18-011 (2016), Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons, AFNOR, 19 pages.
- NF EN 15743 (2015), Ciment sursulfaté - Composition, spécifications et critères de conformité, AFNOR, 26 pages.
- NF EN 206/CN (2014), Béton-spécification, performance production et conformité, AFNOR, 147 pages.
- NF EN 14647 (2006), Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité, AFNOR, 32 pages.
- Filliat (1981), la pratique des sols et des fondations - éditions du Moniteur, Paris, 1349 pages.