
Nouveaux éléments sur la lithostratigraphie de la série éocène parisienne à partir de l'observation de centaines de sondages carottés (projet Éole et Grand Paris Express).

New elements on the lithostratigraphy of the Paris Eocene series based on the observation of hundreds of core drillings (Eole and Grand Paris Express projects)

Emmanuel Egal¹

Géologie de la France, n° 4, 2023, p. 63-86, 22 fig., 4 tabl.

Mots-clés : Éocène, Paris, Géologie, Forages, Grand Paris Express, Éole.

Keywords: Eocene, Paris, Geology, Boreholes, Grand Paris Express, Eole.

Résumé

Cet article vise à présenter une synthèse d'observations en partie nouvelles, suite à l'analyse par l'auteur de plus de 800 sondages carottés réalisés principalement le long des tracés Éole et des lignes 15 (parties est et ouest) et 16 du Grand Paris Express. Les observations sont issues des coupes de sondages fournies, de l'observation directe des carottes ou, le plus souvent, de leurs photographies. Ce sont principalement les terrains de l'époque éocène qui ont été reconnus en sondage le long d'Éole et des lignes 15 et 16 et la synthèse présentée ici se concentre sur cette période.

Ces observations amènent notamment à faire les constats suivant :

Dans de nombreux cas, le schéma classique de la lithostratigraphie de l'Yprésien post Argile plastique est remis en cause. On ne retrouve pas systématiquement la trilogie Sables supérieures – Fausses Glaises – Sables d'Auteuil sur le terrain, même si c'est parfois la réalité, mais des faciès sableux et argilo-sableux répartis selon un agencement variable et parfois complexe.

Les Sables de Cuise sont bien à distinguer des Sables supérieurs sous-jacents de par leur âge plus récent (Cuisien franc vs faciès Sparnacien), leur composition (glauconie) et leur milieu de dépôt (marin vs continental).

En dehors des zones à gypse développées et préservées de la dissolution, la formation lutétienne des Marnes et Caillasses est essentiellement constituée de calcaire ou de dolomie, de texture/dureté variable, mais pas ou peu de marnes.

Au sein des Sables de Beauchamp, les observations de carottes comme les analyses de diagraphies gamma-ray ne

permettent pas de *généraliser* l'existence d'un horizon argileux médian dans les Sables de Beauchamp. Par ailleurs, des niveaux rocheux plus ou moins durs d'épaisseur décimétrique à supramétrique sont observés de manière irrégulière au sein des Sables de Beauchamp. La composition de ces niveaux n'est pas partout identique : il s'agit soit de niveaux essentiellement cimentés par de la silice (quartzitiques), possiblement très cohésifs, très durs et très abrasifs, soit de lits principalement cimentés par du calcaire (parfois fossilifères) ou de la dolomie, concentrés dans certains secteurs.

Au-dessus du Calcaire de Saint-Ouen, l'horizon des Sables verts n'apparaît pas très bien caractérisé et ne peut en tout cas être systématiquement considéré comme un bon niveau repère pour mettre en évidence des géométries fines.

Dans les zones de plaine de la région parisienne (telle que la Plaine de France), entre les buttes et les plateaux, la formation des Masses et marnes du Gypse (MMG) n'est généralement représentée au-dessus des Sables verts que par une couche peu épaisse de marnes plus ou moins argileuses. Ce faciès marneux est ici interprété comme l'équivalent latéral résiduel des Masses et marnes du Gypse complètes dans lesquelles le gypse initialement présent a été dissout et les marnes résiduelles ont été compactées à la suite de cette dissolution. Ces marnes résiduelles sont localisées en plaine là où les couches qui surmontent les MMG et les protègent de la dissolution ont été préalablement érodées.

¹EGIS, route de la Bouvarde, Park Nord, Bâtiment le Sextant, 74370 Epagny-Metz-Tessy
emmanuel.egal@egis-group.com

D'une manière générale, les formations géologiques cénozoïques sont généralement fortement altérées lorsqu'elles sont en position superficielle et soumises aux eaux pluviales qui s'infiltrent en leur sein. De ce fait, le Calcaire de Saint-Ouen, les Marnes et Caillasses ou le Calcaire grossier se présentent en surface sous forme d'un faciès majoritairement tendre et/ou friable. Pour leur part, les terrains sableux (sables yprésiens ou Sables de Beauchamp) présentent fréquemment un faciès altéré oxydé de teinte ocre sur une épaisseur parfois plurimétrique, lorsqu'ils sont actuellement positionnés près de la surface.

Toutes ces observations et descriptions mettent en évidence, sans doute encore plus qu'il n'était établi jusqu'à présent, la forte variabilité et les hétérogénéités de la série éocène sous Paris et sa périphérie, au sein des grandes entités lithostratigraphiques bien délimitées. Les causes de cette variabilité sont en grande partie d'origine sédimentaire, mais également de manière notable du fait de phénomènes d'altération divers.

Extended abstract

The geology of the Parisian underground has been explored and recognized for a long time and the general succession and content or characteristics of the strata are generally well known (see explanatory notes accompanying the geological maps published by the BRGM, Soyer and Cailleux, 1960, or Filliat and Duvauchelle, 1981) and the geological knowledge may be very precise/detailed in certain areas. However, these historical works have also made it possible to highlight a great variability of the geology in its general framework and the difficulty of establishing a precisely reproducible lithostratigraphy for the whole of the Parisian subsoil.

The carrying out of many investigation surveys, in particular by drillings, for the new Eole and Grand Paris Express (GPE) metro projects has provided a considerable amount of new data about the Parisian geology allowing a better understanding, mainly in its periphery.

This article aims to present a synthesis of partly new observations, following the author's analysis of more than 800 core drillings carried out mainly along the Eole project and 15 and 16 lines of the GPE. The synthesis presented below focuses on the Eocene strata because they have been mainly recognized in boreholes, much more than the Upper Chalk of the Late Cretaceous, the Danian and Oligocene to Quaternary sedimentary units, which are therefore not presented here.

This article also addresses the weathering of Eocene strata, a phenomenon historically little described or even underestimated in the Parisian geological context.

Eocene lithostratigraphy

The Eocene series (Table 1) consists of an alternation of sand, clay, limestone and marl beds. Lateral variations are also observed, particularly in the Ypresian units. This variability results from the variation of the local depositional environments and more generally from the terrestrial to coastal contexts. Open marine facies are very rare, if not

absent.

The **Ypresian** is classically divided into several lithostratigraphic units (Soyer, 1953 and 1966, Filliat and Duvauchelle, 1981), with in ascending stratigraphic order: 1) the terrestrial to lagoonal Sparnacian units, i) the 'Argile plastique' Fm at the base (floodplain to palustrine), overlain by ii) the 'Sables d'Auteuil' (shallow marine to lagoonal), then iii) the 'Fausses Glaises' (lagoonal to estuarine) and iv) the 'Sables supérieurs' (fluvial to estuarine), and 2), the shallow marine 'Sables de Cuise' Fm representing the Cuisian Stage (table 1).

However, the observation of numerous drill cores from the Ypresian enables to show that one frequently deviates from this lithostratigraphic scheme for the Sparnacian facies located above the 'Argile plastique' Fm.

The 'Argile plastique' formation is regularly observed and thus seems to constitute a continuous unit over the whole of the Parisian subsurface. It is mainly made up of characteristic variegated clayey facies (plurimetric to supradecametric in thickness) which often passes upwards to homogeneous (often dark) gray clayey facies a few meters thick. In certain areas, beds or sandy lenses plurimetric in thickness and plurimetric to pluridecametric in length are inserted within or at the base of the Formation (South or South-East of Paris), that may be interpreted as fluvial channels.

Above the 'Argile Plastique' Fm, the Ypresian strata are most often constituted by a set of dark siliceous and lignitic sands and gray-black organic clay associated to lignite beds and comprising silt laminae, the whole over a thickness of around twenty meters. It is mainly the vertical distribution and the proportion of these sandy and clayey facies that have historically led to the identification of the three distinct units in the reference lithostratigraphic scheme ('Sables d'Auteuil', 'Fausses Glaises' consisting of an alternation of sand and well-developed clay-lignite beds and the 'Sables supérieurs'). But according to the observations on cores from the GPE and Eole, the distribution of the sandy and clay-lignite facies deviates commonly from the reference lithostratigraphic scheme and the distribution of Ypresian sandy and clayey terms is highly variable in the Parisian subsoil (Figure 3):

- It is therefore not possible to generalize the reality of the so-called 'Sables d'Auteuil' unit;
- The development and distribution of clay-lignite beds and lenses are highly variable, as illustrated by the sections in Figure 1;
- Most often, the upper part of the Sparnacian is composed of dominant siliceous and lignitic sands which constitute the 'Sables supérieurs' Fm, but clay-lignite lenses or beds are sometimes well developed over plurimetric to pluridecametric thickness in this unit.

The 'Sables de Cuise' Fm, which belongs to the Cuisian Stage, contains glaucony which gives it a greenish tint (P. Diffre, 1980; Filliat and Duvauchelle, 1981). The 'Sables de Cuise' shall be distinguished from the underlying and lateral 'Sables supérieurs' by their petrography, mineralogy, paleontological content and facies, their depositional

environment and former substage to which they were ascribed (glauciferous sands containing marine molluscan shells, foraminifera and vertebrate remains, fully marine and Cuisian vs more or less lignitic, silty and clayey coarse to fine sands, very often pyritic, containing wood, leaves and other vegetal remains, fluvial to estuarine and Sparnacian).

The Parisian Lutetian series is composed, in ascending order by the more or less fossiliferous 'Calcaire Grossier' Fm and 'Marnes et Caillasses' Fm.

At the time of the intense exploitation of the 'Calcaire grossier' in the South of Paris, the quarrymen established a fine lithostratigraphy of the Formation (Tableau 2) by identifying and naming each bed. This detailed lithostratigraphic nomenclature is not generally found on the logs of the GPE-Eole boreholes, with the frequent exception of a few emblematic hard beds (the 'Banc de Roche' in particular).

More schematically, the 'Calcaire grossier' Fm is frequently divided into upper, middle and lower parts (see the Paris geological map explanatory notes at 1/50,000 scale, Filliat and Duvauchelle, 1981 or Merle Coord, 2008):

- The upper part is made up of several rather hard beds or of the single 'Banc de Roche' bed which marks the top of the Formation. One to three flint beds are frequently observed in this upper part;
- The middle part is made of medium to coarse limestone, plurimetric in thickness, generally not truly rocky;
- The lower part is plurimetric in thickness, glauconiferous and therefore characterized by a gray-green tint. Quartz grains associated with limestone and glaucony give a more sandstone character to this lower part.

At the base of the Lower glauconiferous 'Calcaire Grossier', a coarse quartzo-calcareo-glaucitic sandy to microconglomeratic and shelly facies corresponds to the 'Glauconie Grossière' unit as defined by R. Soyer (cf. Soyer and Cailleux, 1960) and is rather often observed here and there. This thin (generally several decimeters) and very discontinuous loose bed should not be confused with the glauconiferous, thick and essentially rocky Lower 'Calcaire Grossier' Fm.

The 'Marnes et Caillasses' Fm is mainly made up of an alternation of carbonate beds of moderate "hardness" ("semi-rocky limestone") and hard beds or fragments mainly present at the base of the Formation (cf. 'Banc de Rochette'). A few thin clay beds are regularly observed. To the North and East of Paris, beds of albastroid gypsum ("ante-ludian" gypsum) are intercalated, with a thickness of several decimeters or meters. To the East of Paris, their cumulative thickness reaches 10 to 20 m (Figure 6 and Toulemont, 1987).

Many analyzes of the carbonate content were carried out on samples during the GPE and EOLE reconnaissance studies and in particular a series of systematic analyzes was performed every 20 cm on two core drillings of the EOLE project. The results (summary Table 2) indicate that the samples analyzed mainly correspond to pure limestone (or

dolomite) (>90% carbonates) or marly limestone (70-90% carbonates) but rarely to marls (<70% carbonates), whatever the texture of the beds analyzed. Apart from areas with developed gypsum, the 'Marnes et Caillasses' Fm is therefore essentially made up of limestone or dolomite, of variable texture/hardness, but little or no of marl.

Concerning the composition of the carbonate beds of the 'Marnes et Caillasses' Fm, 4 semi-quantitative XRD analyzes carried out on EOLE samples (Table 3) indicate very variable proportions of calcite and dolomite.

The gypsum present in the 'Marnes et Caillasses' Fm is subject to dissolution by the underground circulating water, which leads to the formation of cavities or, more often, of (very) destructured or decompressed zones (diffuse dissolution). These dissolution zones are unevenly distributed depending on the initial composition of the 'Marnes et Caillasses' Fm (presence or absence of gypsum) and the very irregularly developed effective dissolution.

The **Bartonian** is composed mainly of sands ('Sables de Beauchamp') and limestone ('Calcaire de Saint-Ouen').

The 'Sables de Beauchamp' Fm is made up of fine to very fine calcareous sands, often also silty to clayey. Since the work of J. Simonnet (2010), a clay level is frequently described in the middle position in the 'Sables de Beauchamp' Fm under the term "median clay screen". On the geological sections (logs) of the GPE drillings, such a median clayey interval is quite often described from the visual observation of the cores (Figure 8). However, the analysis of logs of natural radioactivity (gamma-ray logging) carried up in the 'Sables de Beauchamp' Fm does not enable to confirm this observation as they highlight a random variability of the radioactivity and therefore probably of the clay content in these strata (Figure 9). Hence, most often, these logs do not identify a more median clayey interval in median position. It is therefore prudent not to generalize the existence of a median clayey interval within the 'Sables de Beauchamp' Fm.

The sand of the 'Sables de Beauchamp' Fm is generally loose but rocky and more or less hard intercalations decimetric to supra metric in thickness are observed irregularly in boreholes. The composition of these hard intervals is not the same everywhere: they are either siliceous (quartzitic), possibly very cohesive, very hard and very abrasive, or mainly calcareous (sometimes fossiliferous), concentrated in certain areas (cf. GPE St-Denis-Pleyel station).

Sandstone-siliceous (quartzitic) intercalations generally do not correlate from one borehole to another, their geometry is of the lenticular type and their dimensions are sometimes very small (decimetric thickness for a pluridecimetric length). Lightly or moderately indurated sand beds or lenses are observed as well, reflecting the more or less developed phenomenon of silicification.

The calcareous sandstones identified are sometimes correlated between two or three boreholes and for their part reflect a greater lateral extension than the siliceous (quartzitic) sandstone lenses, which enables to suggest a

synchronous sedimentary or diagenetic origin of the sand cementation by carbonate as indicated by the presence of fossils (or their imprint) in these intervals.

The 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm is made of a limestone facies which has strong similarities with the one of the 'Marnes et Caillasses' Fm. It is distinguished from these by generally more developed weathering due to its frequent superficial position (along lines 15 East and 16) and by a proportion of gypsum never as high as in the 'Marnes et Caillasses' Fm. The complete thickness (not eroded) of this Formation ranges most often from less than 10 m up to 15-20 m (10-12 m in average).

When located at depth and not or only slightly weathered, the 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm is composed mainly of "semi-rocky" limestone, comprising intercalations or subdecimetric to suprametric fragments of harder limestone (more "rocky") and some dark and thin clay beds. According to the analyzes carried out for the GPE, the dominant limestone facies is generally marly limestone (<30% clay), and contains little marl in the proper sense, as in the 'Marnes et Caillasses' Fm. hard ("rocky") limestone intercalations are rather localized in the lower part of the Formation.

Gypsum is irregularly associated with the 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm in diffuse form or locally in well-defined massive beds, but of limited multi-decimetric to metric thickness. Note that the lower part of the Masse et marnes du Gypse (see below) represent the upper Bartonian and the end of the sequence of the Calcaire de Saint-Ouen and the Sables verts (Gely, 2016).

The base of the 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm is represented over an approximately metric thickness by the Mortefontaine and Ducy Beds. However, these are not always easy to identify. According to our observations, the Mortefontaine Bed includes at the top a hard and fossiliferous limestone bed (with *Avicula francei*) 15-20 cm thick, overlying a pluridecimetric sandy unit. The Ducy Bed is represented by a limestone bed also 15-20 cm, but generally soft to crumbly and sometimes very little individualized.

The "Sables verts" or 'Sables de Montceau' unit constitutes a sandy-marly bed, metric to rarely plurimetric in thickness, sometimes difficult to identify or even not identified on cores due to characteristics that are often not enough distinctive compared to the units that encompass it.

Our observations lead us to consider that the 'Sables verts' unit is not continuous and regular but rather constitute a discontinuous lenticular bed, or even several ones potentially shifted in altitude in the series and possibly recurrent in the transition interval between the 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm and the 'Marnes et Marnes du Gypse' Fm.

Gypsum is rarely present within the "Sables verts". However, beneath the Clichy hillock and to the North of it (L16), a gypsum bed is frequently described at the base of the 'Sables verts' over a thickness of several decimetres (up to 1.15 m thick in the survey).

The **Priabonian** is made up of the main part of the 'Marnes et marnes du Gypse', 'Calcaire de Champigny' and 'Marnes supragypseuses' Formations.

The 'Marnes et Marnes du Gypse' Fm represents one of the emblematic lithostratigraphic units of the Parisian Paleogene series due to the presence of thick layers of gypsum within it, which were widely quarried under Paris in the past. We include in this Formation some intercalated marl beds and the 'Marnes infragypseuses' and/or 'Marnes à Pholadomyes' unit, classically distinguished. Laterally, towards the East – North-East (North of the Marne valley along line 16) and towards the South, the 'Marnes et Marnes du Gypse' pass to the 'Calcaire de Champigny' Fm, which presents its own and very distinctive lithological characteristics.

The 'Marnes et Marnes du Gypse' Formation (MMG Fm) is present in its completeness only when it is covered by the younger Oligocene strata. This is particularly the case in the hillocks of Paris ('Butte de Montmartre') and around ('Butte de Clichy', etc.) where the Formation it is still protected from weathering and erosion by the overlying strata still in place and in particular the almost impermeable 'Argile verte de Romainville' unit (Table 1).

The composition of the MMG Fm and in particular the proportion of gypsum (thickness and number of gypsum beds) appears to be variable at the Parisian and surroundings scale: four thick beds or 'Marnes' (whose the fourth and lower one is now included in the Bartonian series, Gely 2016) of variable thickness (up to 20 m for the higher 'Marnes') are clearly identified in the North-East of Paris (Clichy Hillock), whereas in the South-West of Paris in particular, gypsum is encountered in borehole only on one or more layers much thinner.

In the low areas of the Paris region (such as the 'Plaine de France') between the hillocks and plateaus, the MMG Fm is generally represented above the 'Sables verts' unit only by an interval of marly more or less clayey soils generally quite compact and of rather homogeneous composition. This marly facies is interpreted as the residual lateral equivalent of the MMG Fm in which the gypsum initially present has been dissolved and the residual marls compacted following the dissolution. These residual marls are located in the plain where the impermeable strata which overlay the 'Marnes et Marnes du Gypse' Fm and protect them from dissolution have been previously eroded.

The 'Calcaire de Champigny' Fm represents a lateral variation of the 'Marnes et Marnes du Gypse' Fm and is characterized in particular by the disappearance of the gypsum beds. The cores taken in boreholes for the South-East part of the GPE show a great diversity of facies, from limestones (and marls?) more or less soft and limestones (dolomitic?) rocky (hard) and vacuolar. Characteristic dark brown cherts were regularly observed within a plurimetric interval of limestone.

The 'Marnes supragypseuses' Fm is made up of the 'Marnes d'Argenteuil' in the lower position and the 'Marnes de Pantin' above; they represent the lithostratigraphic units of the latest Eocene.

The analyzes on samples of the carbonate content carried out as part of the studies of different sections of the GPE indicate that these are indeed marls. However, these analyzes make it possible to determine an overall more calcareous lithology of the 'Marnes de Pantin' and a correlatively more clayey one in the 'Marnes d'Argenteuil', finally a few beds of hard limestone ($\text{CaCO}_3 > 90\%$) have been highlighted in the 'Marnes de Pantin'.

The superficial weathering of Eocene strata

Parisian Cenozoic geological formations are generally highly weathered when lying in superficial position and subject to rainwater. This weathering is notably responsible for the almost total dissolution of the gypsum in the 'Masses et Marnes du Gypse' Fm not protected on the topographic surface and their transformation into residual marls.

Similarly, the 'Calcaire de Saint-Ouen' Fm, frequently in a superficial position in the plains to the North (Plaine de France) and to the East of Paris, then appears in the form of a generally soft and/or very fragmented limestone facies (unstructured) reflecting a marked superficial weathering. In this weathered context, intervals or beds of harder limestone are often preserved as angular fragments. Some fragments are silicified and reflect additive weathering phenomena comparable to the superficial silicifications observed in Oligocene strata ('meulière' in particular).

The 'Marnes et Caillasses' and the 'Calcaire grossier' Fms are rarely in a superficial position, but when this is the case, these two Formations also undergo clear weathering. Contrary to the deep weathering of the 'Marnes et Caillasses' Fm by dissolution of gypsum, the superficial weathering of these and of the 'Calcaire grossier' Fm is little known and has sometimes been underestimated although in fact often observed (Egal and Piraud, 2018 and Figure 21, see also Quesnel's observations in Grataloup *et al.*, 2020). However, it leads to a potentially significant weakening of the geomechanical characteristics of the Formations.

In some areas, the 'Calcaire grossier' Fm in deep position shows dark and weathered intervals that could result from weathering phenomena by the water table movements, notably when it was in a much lower position than it is today (during the last glacial period? Or possibly during Lutetian times, during short emersion events, F. Quesnel, written communication).

Conclusion

The observations and descriptions here reported highlight the strong variability and heterogeneity of the Eocene series under Paris and its periphery within the large well-defined lithostratigraphic entities. The causes of these variabilities are largely of sedimentary origin but also in a notable way due to "deep" dissolution of gypsum and superficial weathering phenomena.

1. Introduction

La géologie du sous-sol parisien est explorée et reconnue depuis plusieurs siècles, d'abord à des fins d'exploitation (pierre de construction, argile, gypse), puis d'aménagements souterrains (circulation du métro

principalement). Ainsi, la succession générale des couches et le contenu ou les caractéristiques de celles-ci sont-ils globalement bien connus (Soyer, 1955 ; Soyer et Cailleux, 1960 ; Soyer, 1966, Diffre, 1980 ; Filliat et Duvauchelle, 1981 ; Megnien, 1991) et de manière très précise dans certains secteurs. Cependant, ces travaux historiques ont également permis de mettre en évidence une grande variabilité de la géologie dans son cadre général et la difficulté d'établir une lithostratigraphie précisément reproductible pour l'ensemble du sous-sol parisien.

La réalisation de très nombreux sondages de reconnaissance, notamment carottés, pour les projets de nouveaux métros Éole et du Grand Paris Express (GPE) a apporté une quantité considérable de nouvelles données sur le sous-sol parisien permettant une meilleure lecture de ce dernier, principalement dans sa périphérie.

Cet article vise à présenter une synthèse d'observations en partie nouvelles, suite à l'analyse par l'auteur de plus de 800 sondages carottés réalisés principalement le long des tracés Éole et des lignes 15 (parties est et ouest) et 16 du GPE. Les observations sont issues des coupes de sondages fournies, de l'observation directe des carottes ou, le plus souvent, de leurs photographies. Des observations de fronts d'excavation dans des tronçons excavés de manière traditionnelle (entonnements) et de fonds de fouille de gares ou de puits ont également été intégrées pour cette synthèse.

Ce sont principalement les terrains de l'époque éocène qui ont été reconnus en sondage le long d'Éole et des lignes 15 et 16 et la synthèse présentée ci-après se concentre sur cette période.

Ces données ont permis de préciser la lithostratigraphie parisienne, de mieux appréhender sa variabilité et en conséquence de remettre partiellement en cause certains de ses éléments établis ou du moins leur généralisation.

Par ailleurs, cet article aborde le sujet de l'altération des terrains éocènes, phénomène historiquement peu décrit voire sous-estimé dans le sous-sol parisien.

Pour des raisons de confidentialité, la localisation des observations et variations lithostratigraphiques décrites dans cet article n'est donnée que partiellement et de manière imprécise. La spatialisation des observations et leur corrélation géographique ne font pas l'objet de cette note.

Les photos de carottes qui sont reproduites en petit format dans le fil du texte sont intégralement reprises en fin de texte pour plus de lisibilité

2. Lithostratigraphie de l'Éocène

2.1 - Présentation générale

Le Tableau 1 synthétise la succession lithostratigraphique cénozoïque du sous-sol parisien depuis la craie crétacée jusqu'aux terrains oligocènes, sous les dépôts quaternaires (essentiellement alluvions et remblais anthropiques). La série éocène et plus largement cénozoïque est constituée d'une alternance de couches sableuses, argileuses, calcaires et marneuses.

Ce tableau (voir également Charles *et al.*, 2020) met en évidence la variabilité verticale de la série cénozoïque parisienne avec un nombre relativement élevé de formations distinguées, d'épaisseur souvent modérée. Des variations latérales sont également observées, notamment dans l'Yprésien (voir plus bas). Cette variabilité résulte de la variation des milieux de dépôt locaux des sédiments et plus globalement du contexte dominant continental à littoral. Les sédiments franchement marins sont très minoritaires au-dessus de la craie crétacée.

Sables d'Auteuil, des Fausses Glaises et des Sables supérieurs (ou Sables du Soissonais), et au sommet, les Sables de Cuise d'origine marine représentant le Cuisien (Tableau 1). Ce découpage lithostratigraphique fait généralement référence notamment dans le milieu du génie civil.

Cependant, l'observation des nombreuses carottes de sondage de l'Yprésien récoltées dans le cadre des projets Éole et GPE-Ligne 15 montre que l'on s'écarte fréquemment de ce schéma lithostratigraphique pour les terrains

PERIODE	Age (Ma)	SERIE ou EPOQUE	ETAGE	Sous-étage ou équivalent	FORMATION géologique	Milieu de dépôt		
		5,3	PLIOCENE					
	23	MIOCENE			<i>Emersion et lacune (sauf localement : Sables fluviaux de Lozère, Alluvions très anciennes...)</i>			
PALEOGENE	34	OLIGOCENE	CHATTIEN		<i>Emersion et lacune</i>			
			RUPELIEN (Stampien)	Stampien s.s.	Calcaire d'Etampes (--> M. de Montmorency)*	Lacustre (à lagunaire ?)		
					Sables de Fontainebeau (pp grésifiés)*	Marin à éolien		
					Marnes à Huîtres	Laguno-marin		
							<i>Emersion</i>	
			Sannoisien	Calcaire de Brie	Lacustre (+/- laguno-marin)			
				Argile verte	Lagunaire			
			PRIABONIEN	Ludien	Marnes de Pantin	Lacustre		
					Marnes d'Argenteuil	Lagunaire à marin		
					Champigny. M. à <i>Pholadomya</i> à la base	Laguno-lacustre à palustre		
						<i>Emersion</i>		
			BARTONIEN	Marinésien	Sables verts ou Sables de Monceau	Saumâtre - marin		
					Calcaire de Saint-Ouen s.l.	Laguno-lacustre (à marin)		
				Auversien	Sables de Beauchamp (et d'Auvers)	Littoral (plage) à marin		
						<i>Emersion</i>		
			LUTETIEN	Bartonien inf. - Lut. Sup.	Marnes et Caillasses	Laguno-saumâtre		
				Lutétien inf. à sup.	Calcaire grossier (Glaucanie grossière à la base)	Marin (laguno-lacustre pdt une courte période)		
						<i>Emersion et lacune (2 Ma)</i>		
56	EOCENE	YPRESIEN	Cuisien	Sables de Cuise	Marin littoral			
			Yprésien inf. Faciès Sparnacien	Yprésien sablo-argileux	Sables supérieurs	Fluviale à estuarien		
					Fausses Glaises	Laguno-continental		
					Sables d'Auteuil	Littoral à continental		
			Argile plastique	Fluviale (+/- lacustre ?)				
			<i>Emersion et lacune du Sélandien et du Thanétien au niveau de Paris</i>					
65	PALEOCENE CRETACE SUPERIEUR	SELAN.-THAN.		Calcaires et marnes de Meudon	Lacustre			
		DANIEN	Dano-Montien	Calcaire pisolithique	Marin			
				<i>Emersion, altération, érosion et ravinement de la craie</i>				
84		CAMPANIEN		Craie à silix	Marin			

* Les Sables de Fontainebeau sont en partie silicifiés en grès et les Calcaires d'Etampes altérés en Altérites à meulière de Montmorency au cours du Néogène

Tableau 1 – Lithostratigraphie synthétique du sous-sol parisien ante-quadernaire (compilé à partir de la carte géologique de France, de Charles *et al.*, 2020 et de communications écrites de F. Quesnel et F. Moreau).

2.2 - L'Yprésien (argile, sable et lignite)

Les terrains yprésiens ont été reconnus en forage essentiellement le long d'une grande partie de la ligne 15 et le long de la ligne Éole ; ils n'ont été recoupés que ponctuellement le long de la ligne 16.

L'Yprésien du sous-sol parisien est classiquement divisé en plusieurs unités lithostratigraphiques superposées (Soyer, 1953, 1966 ; Filliat et Duvauchelle, 1981) : un ensemble sparnacien continental (à littoral), constitué de l'Argile plastique à la base, surmontée des

sparnaciens situés au-dessus de l'Argile plastique.

2.2.1. La formation de l'Argile plastique (Sparnacien)

La formation dite de l'Argile plastique est régulièrement observée dans la partie inférieure de l'Yprésien et semble constituer ainsi une couche continue et parfois relativement épaisse dans l'ensemble du sous-sol parisien. Sur une partie notable de la ligne 15 Sud, elle constitue la seule couche représentant l'Yprésien.

Cette formation est principalement constituée d'un faciès *argileux bariolé* caractéristique (gris clair à beige – kaki – ocre – lie-de-vin) (Figure 1) observé sur une épaisseur plurimétrique à supradécimétrique ; ce faciès résulte de phénomènes d'oxydation au sein de paléosols de type pseudo-gley (F. Quesnel, comm. orale).

Vers le haut, ce faciès bariolé passe parfois (*cf.* Éole) à un faciès *argileux homogène gris à gris bleuté* de quelques mètres d'épaisseur qui, du fait de l'absence d'intercalations sombres ligniteuses en son sein, est généralement rapporté à la formation de l'Argile plastique plutôt qu'aux Fausses glaises dans lesquelles les lits ou lamines silteux et argilo-ligniteux sont régulièrement présents. À noter cependant que des niveaux argilo-ligniteux ont été *très localement* repérés au sein de faciès typiques de l'Argile plastique.

Dans certains secteurs, des lits ou lentilles (chenaux) sableux et pyriteux sont intercalés au sein ou à la base des faciès bariolés caractéristiques de l'Argile Plastique. Ils ont été notamment observés dans la partie sud ou sud-est de Paris (L15), mais sont absents le long de la ligne Éole. Ces lits ou lentilles (ancien chenaux ?) ont une épaisseur plurimétrique à décimétrique ; leur longueur est parfois difficile à estimer, mais peut atteindre plusieurs hectomètres (L15 Sud).

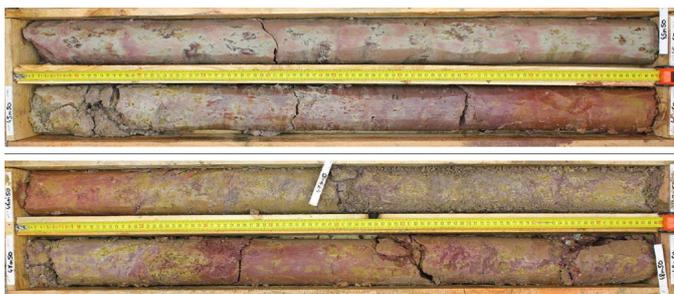


Figure 1 - Argile plastique : faciès bariolé typique. NB : sur toutes les photos de caisses de carottes présentées ci-après, celles-ci font 1 m de longueur.

2.2.2. Alternance de sables et d'argiles ligniteuses au-dessus de l'Argile plastique (Sparnacien)

Au-dessus de l'Argile plastique, l'Yprésien apparaît le plus souvent constitué, sur une épaisseur d'une vingtaine de mètres, d'un ensemble comprenant deux termes lithologiques (Figure 2) : 1 - des sables siliceux généralement homogènes, marron-gris-noir (hors zones d'altération), lâches (pas ou peu cohérents, non indurés) en caisse de carottes ; 2 - des faciès argileux gris-noir plus ou moins ligniteux (comprenant des lits franchement ligniteux). Les caractéristiques lithologiques ou pétrographiques de chacun des deux termes lithologiques sont à peu près constantes à travers la série sparnacienne post-Argile plastique et c'est principalement la répartition verticale et la proportion de ces faciès sableux et argileux qui ont historiquement amené à identifier les trois formations distinctes dans le schéma lithostratigraphique de référence. Selon ce dernier, on distingue de bas en haut : un niveau sableux basal identifié sous le terme de **Sables d'Auteuil**, les **Fausses Glaises** constituées d'une alternance de sable, d'argile et de lits argilo-ligniteux bien développés ou prédominants et les **Sables supérieurs** (ou Sables du Soissonnais) constitués essentiellement de sable gris-marron foncé et de rares intercalations argilo-ligniteuses.

Toutefois, d'après les observations sur carottes du GPE et d'Éole, on peut constater (Figure 3) qu'il n'est pas rare que la répartition des faciès sableux et argilo-ligniteux s'écarte du schéma lithostratigraphique de référence présenté ci-dessus :

- un niveau sableux est parfois bien individualisé entre l'Argile plastique et les Fausses Glaises identifiées, mais ce cas de figure n'est pas fréquent et il n'est donc pas possible de généraliser la réalité de la couche dite des Sables d'Auteuil ;
- en remontant dans la série, le développement et la répartition des lentilles et lits argilo-ligniteux sont très variables, comme l'illustrent les coupes de la Figure 3 :
 - o dans certains secteurs on observe effectivement des alternances assez régulières de sable et d'argile ligniteuse ou une prédominance d'argile ligniteuse (sous forme de lentilles très irrégulières) qui permettent de définir les Fausses Glaises,
 - o dans d'autres secteurs, les sables sont dominants entre l'Argile plastique et le Calcaire grossier et il n'est pas possible d'identifier une couche de Fausses Glaises distincte des Sables supérieurs sus-jacents,
 - o ailleurs, on peut observer une alternance en trois couches plurimétriques d'argile ligniteuse, de sable et à nouveau d'argile ligniteuse ; cette alternance est suivie par corrélation directe entre sondages sur une distance kilométrique,
 - o enfin, très localement, on peut observer une succession très atypique comprenant, sous le Calcaire grossier, plusieurs mètres d'argile sombre à claire surmontant une dizaine de mètres de sable reposant sur de l'argile sombre (secteur de Chelles).

- le plus souvent, la partie supérieure du Sparnacien est effectivement composée de sables siliceux dominants qui constituent la formation des Sables supérieurs, mais les lentilles ou les lits argilo-ligniteux sont parfois bien développés ; leur épaisseur est d'ordre décimétrique à pluridécimétrique et parfois plurimétrique. Dans certains cas, un lit argilo-ligniteux peut être suivi au niveau de plusieurs sondages sur des longueurs (pluri) hectométriques, notamment en position sommitale.

Les observations précédentes et la Figure 3 montrent bien que le schéma classique de la lithostratigraphie du Sparnacien post Argile plastique est fréquemment remis en cause. En conséquence, il apparaît un peu vain de vouloir retrouver systématiquement la trilogie Sables supérieures – Fausses Glaises – Sables d'Auteuil sur le terrain, même si c'est parfois la réalité, et il est préférable de décrire la répartition et l'agencement (souvent complexe) des faciès sableux et argilo-sableux au-dessus de l'Argile plastique sans forcément identifier des formations. D'autant que les sables d'une part et l'argile ligniteuse d'autre part présentent des caractéristiques communes dans toute la tranche de terrains post Argile plastique.

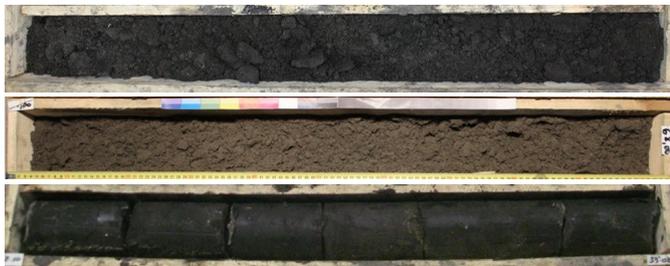


Figure 2 – Faciès de l'Yprésien au-dessus de l'Argile plastique, de haut en bas : sables bruns, sables noirs ligniteux, argile noire ligniteuse

2.2.3. Les Sables de Cuise (Cuisien)

Les Sables de Cuise (Tableau 1), sont d'origine marine littorale et contiennent à ce titre des fossiles marins et de la

glauconie, qui leur donne souvent une teinte verdâtre (Diffre, 1980 ; Filliat et Duvauchelle, 1981). Bien que souvent assimilés aux Sables supérieurs ou confondus avec ces derniers dans les études géologiques ou géotechniques parisiennes, les Sables de Cuise sont bien à distinguer des Sables supérieurs sous-jacents de par leur âge plus récent (Cuisien franc vs faciès Sparnacien), leur composition (glauconie) et leur milieu de dépôt (marin vs continental).

Sur quelques carottes de forages (le long de la ligne 15 est surtout), des sables gris-vert possiblement glauconieux ont été observés ; il pourrait s'agir de Sables de Cuise. À noter qu'ils passent vers le bas à des sables gris-brun sombre de type Sables supérieurs sans contact net.

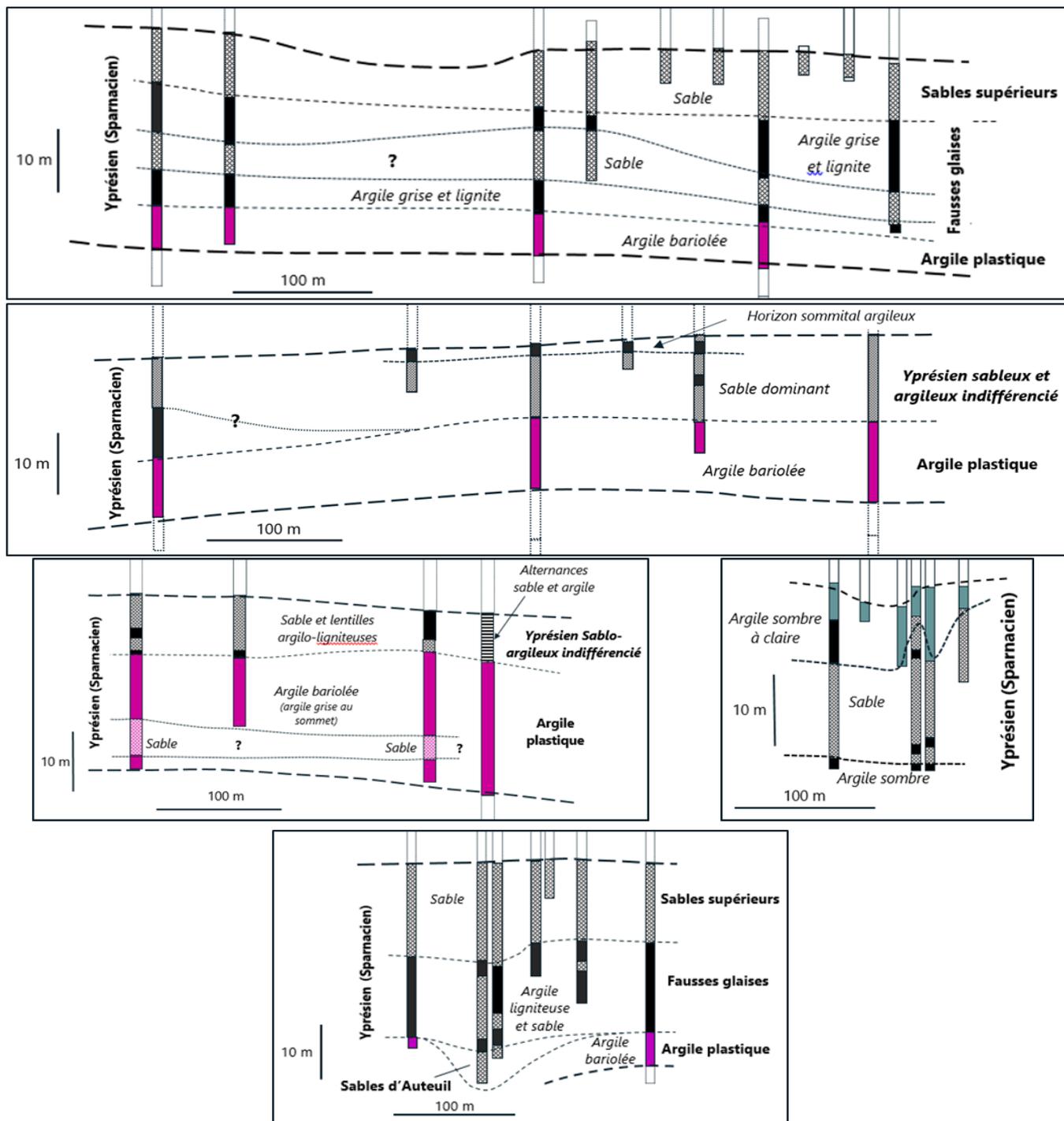


Figure 3 – Exemples de répartition des faciès argileux et sableux dans l'Yprésien parisien. En gris : sables ; en noir : argiles sombres ligniteuses ; en gris bleu : argiles grises à blanchâtres ; en rose fuchsia : argiles bariolées. Extraits des profils en longs des Lignes 15 Sud-Ouest, 15 Sud-Est et 16.

2.3 - Le Lutétien (calcaires et gypse)

La série lutétienne parisienne est composée dans sa partie inférieure de la formation du Calcaire grossier, et dans sa partie supérieure de la formation des Marnes et Caillasses. A noter que d'après J. Briais (2015) et J.P. Gély (2016), qui reprennent les travaux de biostratigraphes antérieurs dont Aubry (1983), ces dernières montent jusque dans la partie inférieure du Bartonien, mais restent majoritairement représentatives du Lutétien parisien.

2.3.1. Le Calcaire grossier

Le Calcaire grossier est quasiment la seule formation essentiellement rocheuse (à "semi-rocheuse") du sous-sol parisien. Et à ce titre, c'est du Calcaire grossier qu'est issue la Pierre de Paris qui a servi à construire de nombreux bâtiments anciens. Des anciennes carrières superficielles ou souterraines de Calcaire grossier sont recensées dans une large partie sud du territoire parisien. Ces carrières sont irrégulièrement comblées et sont à l'origine du réseau de catacombes parisiennes.

Du temps de l'exploitation intense du Calcaire Grossier, les carriers ont établi une lithostratigraphie précise de la formation (Tableau 2) en identifiant et nommant chaque banc, qui la constitue (voir notamment les notices des cartes géologiques à 1/50 000 et 1/25 000 des feuilles Paris).

À la suite de l'analyse de nombreux sondages réalisés dans le Calcaire grossier pour le GPE et Eole, il s'avère que la lithostratigraphie détaillée par les carriers n'est généralement pas reproduite (ou de manière très partielle) sur les coupes de sondages. Ceci traduit probablement en partie la difficulté d'identifier les bancs, mais également l'existence de variations latérales importantes dans la formation du Calcaire grossier. Quelques bancs durs emblématiques (Banc de Roche notamment) sont cependant identifiés dans les sondages du GPE et d'Éole, mais non systématiquement.

Plus schématiquement, le Calcaire grossier est fréquemment subdivisé en trois parties, supérieure, moyenne et inférieure (cf. notice carte géologique à 1/50 000, feuille Paris, Filliat et Duvauchelle, 1981 ou Merle Coord., 2008).

Ce découpage est généralement repris sur les coupes de sondages et les profils en longs géologiques de synthèse du GPE et d'EOLE :

	N°	Nom	Epaisseur	Carrières		
LUTETIEN SUPERIEUR	CG supérieur	B19	Banc de Roche	0,4 à 1m	Etage supérieur des carrières	
		B18	Cliquart ou Haut Banc	0,5 à 1m		
		B17	Banc franc , ou Banc d'appareil, Remise ou Liáis	0,35m		
		B16	Banc de Souchet ("Coup d'esse" à la base)	0,75m		
		B15	Coquiller grignard ou Rustique ou Roche douce	0,35m		
		B14	Banc de Laine ou galets	0,60m		
		B13	Liáis franc	0,3m		
		B12	(Banc de) Marche ou gros banc	0,4m		
LUTETIEN MOYEN	CG moyen	B11	Banc vert ou Banc de verre ou Faux liáis	0,2 à 1,3m	~ Etage inférieur des carrières	
		B10	Banc Royal	1,5m		
		B9	Lambourdes, ardoises et vergelés	Lambourde grise		3 à 4m
		B8		Lambourde		
		B7		Ardoise		
		B6		Lambourde verte		
		LUTETIEN GLAUCONIEUX	CG glauconieux	B5		Banc coquiller blanc
B4	Banc coquiller rouge			Banc de St-Leu	2m	
LUT. INF.	CG inférieur	B3	Banc chlorité nacré ou Banc à mollusques		0,5 - 2 m	
		B2	Banc chlorité gris ou St Jacques ou Pierre à liards. Calcaire à <i>Nummulites laevigatus</i>		1,5 m	
		B1	Glauconie grossière (ou Sable chlorité calcaire)		< 1m	

Tableau 2– Lithostratigraphie détaillée du Calcaire grossier établie principalement par les carriers du temps de l'exploitation du calcaire. Tableau construit à partir des notices et cartes géologiques de Paris et alentour et de Merle Coord., 2008). NB : les attributions aux Lutétien inférieur, moyen et supérieur ont été revues au fil des dernières décennies, au gré de l'évolution conjointe des échelles des temps géologiques et des biozonations.

- la partie supérieure est faite de bancs calcaires plutôt durs, clairs et fins, identifiée comme le Calcaire grossier supérieur (quelques mètres d'épaisseur) ou représentée par le seul Banc de Roche (pluridécimétrique) qui marque le sommet de la formation (Figure 4). A noter qu'un ou des niveaux de silex sombres pluricentimétriques à (rarement) supra-décimétriques sont fréquemment observés dans la partie supérieure du Calcaire grossier. Jusqu'à trois niveaux ou horizons ont pu être décomptés ;
- une large partie médiane plurimétrique, identifiée ou non comme le Calcaire grossier moyen, faite essentiellement d'un calcaire gris-beige plus ou moins grossier (c'est-à-dire plus ou moins riche en fragments plurimillimétriques à supracentimétriques de coquilles) et relativement tendre (Figure 4) ; des bancs plus durs peuvent s'intercaler ainsi que des lits beige-marron plus ou moins lités et d'aspect plus marneux ;
- une partie inférieure également d'épaisseur plurimétrique, se caractérisant par la présence de glauconie (Figure 4) et donc par une teinte gris-vert. La glauconie est plus ou moins abondante dans cette partie inférieure, elle se présente sous forme de grains de teinte vert bouteille caractéristiques, mais également sur les carottes par des plages vert clair. Des grains de quartz sont associés au calcaire et à la glauconie, donnant un caractère plus gréseux à cette partie inférieure du Calcaire grossier. Des bancs durs sont observés, ainsi que des intercalations tendres marneuses verdâtres.

Le Calcaire grossier est très fossilifère (Figure 4), il est largement constitué d'abondants fragments de coquilles ou tests de gastéropodes, bivalves, foraminifères, (...) de taille variable, surtout inframillimétrique à supracentimétrique, et localement (pluri)décimétrique (voir Merle Coord., 2008 pour une description illustrée exhaustive de la faune du Calcaire grossier et des Marnes et Caillasses). Les coquilles centimétriques sont souvent partiellement ou entièrement dissoutes, ce qui donne un aspect vacuolaire au calcaire. Lorsque les débris de coquilles sont de petite taille, ils confèrent un aspect granuleux au calcaire, celui-ci étant alors parfois décrit à tort comme gréseux dans les coupes de sondages. La variation de l'abondance et de la taille des coquilles souligne la stratification du calcaire.

Localement des passées tendres verdâtres à beige-brunâtre sont observées dans le Calcaire grossier entre deux bancs rocheux. Ces passées assez rares n'ont pas été analysées de manière fine, mais elles semblent correspondre à des niveaux marneux à marno-argileux.

À la base du Calcaire grossier inférieur glauconieux, on observe de place en place, un faciès sableux grossier à microconglomératique et coquillier quartzo-calcaréo-glauconieux, qui correspond à l'horizon de la **Glauconie grossière** tel que défini par R. Soyer (*in* Soyer et Cailleux, 1960). Ce lit meuble de faible épaisseur (généralement pluridécimétrique) et très discontinu ne doit pas être confondu avec le Calcaire grossier inférieur glauconieux, épais et essentiellement rocheux.



Figure 4 – Différents faciès ou bancs de la formation du Calcaire Grossier. De haut en bas : banc de calcaire clair, fin et dur (base du « Banc de Roche ») sur calcaire plus tendre et plus sombre ici lité (dolomitisé ?) ; calcaire gris rocheux à passées grossièrement fossilifère et vacuolaire ; calcaire irrégulièrement glauconieux et, en bas à droite, passée vert sombre plus tendre de composition probablement marneuse (banc vert possible).

2.3.2. Les Marnes et caillasses

À l'écart des zones de forte altération, les Marnes et Caillasses (MC) sont constituées principalement d'une alternance de bancs carbonatés de dureté modérée (bancs de type "semi-rocheux") et de bancs ou fragments durs surtout présents à la base de formation (Banc de Rochette notamment) (Figure 5). Quelques lits argileux marron-verdâtre à marron sombre d'épaisseur centimétrique à supradécimétrique sont régulièrement observés, mais peu nombreux (quelques-uns dans l'ensemble de la formation des MC). Au Nord et à l'Est de Paris, s'ajoutent des lits ou bancs de gypse albaströide (gypse "anté-ludien") d'épaisseur pluridécimétrique à plurimétrique. Dans le secteur de Sevran à l'Est de Paris, M. Toulemon (1987) décrit une épaisseur cumulée de gypse qui peut atteindre 20 m. L'épaisseur de la formation des Marnes et Caillasses est globalement proportionnelle à l'épaisseur cumulée des intercalations gypseuses.



Figure 5 - Marnes et Caillasses : faciès dominant de calcaire gris-beige clair "semi-rocheux" avec intercalations pluricentimétriques/décimétriques (bancs ou fragments) de calcaire dur gris très clair et une intercalation infra décimétrique d'argile marron sombre. L'ensemble est ici globalement massif et très peu altéré.

Dans le cadre des études de reconnaissance pour le GPE (Ligne 16), les intercalations de gypse ont été recoupées sur une épaisseur cumulée pouvant atteindre 12 m (Figure 6). À l'Ouest et au Sud de Paris, le gypse est nettement moins abondant ; il est observé localement sous forme de rares lits minces ou parfois en cristallisations diffuses dans le calcaire (la nature des cristallisations diffuses restant parfois sujette à caution). Aucun indice n'indique que cette rareté du gypse à l'Ouest et au Sud de Paris résulte de sa dissolution (absence ou rareté de gypse résiduel, absence de figures claires de dissolution ou de déstructuration marquée de la roche).

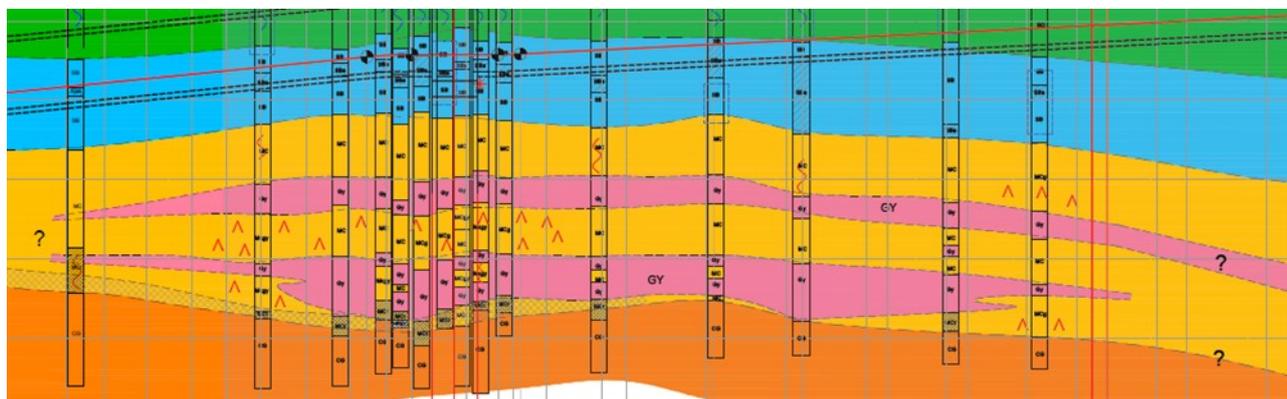


Figure 6 – Extrait (~1,6 km) d'un profil en long géologique du Grand Paris Express (L16) dans le secteur de Sevran où des lits de gypse d'épaisseur plurimétrique sont présents et préservés dans les Marnes et caillasses. La hauteur entre les lignes horizontales est de 10 m (échelle verticale = 10 x échelle horizontale).

De nombreuses analyses de la teneur en carbonates sur échantillons ont été effectuées au cours des études de reconnaissances pour les différents projets de travaux souterrains parisiens ; de plus une série d'analyses systématiques a été réalisée au pas d'échantillonnage de 20 cm sur deux sondages carottés du projet ÉOLE.

Les résultats (Tableau 3) indiquent que les échantillons analysés correspondent très majoritairement à du calcaire (ou de la dolomie) pur(e) (> 90 % de carbonates) ou à du calcaire marneux (70-90 % de carbonates), mais rarement à des marnes (< 70 % de carbonates), quelle que soit la texture des bancs analysés (Egal et Piraud, 2018). En dehors des zones à gypse développées, la formation des Marnes et Caillasses est donc essentiellement constituée de calcaire ou de dolomie, de texture/dureté variable, mais pas ou peu de marnes. En conséquence, si l'appellation de Marnes et Caillasses ne peut être remise en cause du fait de son caractère historique, il convient d'éviter le terme de "marnes" dans la description de cette formation, même quand il s'agit de bancs tendres. J.-P. Gigan (1974) a montré que le caractère tendre du calcaire dominant dans les Marnes et Caillasses résulte d'une faible cimentation et donc d'une faible cohésion des particules calcaires (indépendamment des phénomènes d'altération) et non de la présence d'argile.

	Moyenne	N total	N < 70 %	%	70 - 90 %	%	N > 90 %	%
EOLE global	78	82	18	22	29	35	32	39
EOLE_2 SC	89	144	5	3,5	67	47	74	51
L16	75	37	8	22	26	70	3	8
L15 Est	88	33	3	9	10	30	20	61
Total	83			14		45		40

Tableau 3 – Synthèse des teneurs en carbonates analysées sur des échantillons de Marnes et Caillasses des projets Eole et GPE. La ligne EOLE_2SC synthétise les mesures effectuées tous les 20 cm dans deux sondages carottés ÉOLE.

Par ailleurs, concernant la composition des couches carbonatées des Marnes et Caillasses, 4 analyses DRX en roche totale ont été effectuées sur des échantillons ÉOLE (tableau ci-dessous) : elles indiquent des proportions très variables de calcite et de dolomite. À noter la présence en quantité également variable de quartz et de feldspath et les faibles teneurs en micas et argiles, en cohérence avec les analyses présentées ci-dessus (Tableau 3).

Echantillon	Quartz	Dolomite	Calcite	Aragonite	Total carbonates	Felds-paths	Micas et argiles
SC1010 - 15,45	13,3	67,1		-	67,1	13,7	5,9
SC1010 - 22 m	4,1	37,3	55,5	-	92,8	-	3,1
SC1180 - 21 m	-	98	-	-	98	-	2
SC3600 - 38,9 m	22,1	34,2	25,6	-	59,8	18,1	-

Tableau 4 – Résultats d'analyse DRX en roche totale sur 4 échantillons de Marnes et Caillasses prélevés dans 2 sondages carottés ÉOLE.

Le gypse présent dans les Marnes et Caillasses est sujet à dissolution par les eaux circulantes souterraines, ce qui entraîne une dissolution de la roche, qui se traduit par l'existence de vides (cavités ou galeries assimilables à un réseau karstique) ou, le plus souvent, de zones (très) déstructurées ou décomprimées (Figure 7). Ces zones déstructurées et ces vides sont inégalement répartis en fonction de la composition initiale des Marnes et Caillasses (présence ou absence de gypse) et de la dissolution effective très irrégulièrement développée : de larges secteurs montrent des bancs de gypse quasi intacts, alors que dans d'autres les bancs de gypse sont partiellement ou totalement dissous.

Des passés sableuses sont décrites dans le Calcaire grossier et les Marnes et Caillasses. Elles sont majoritairement interprétées comme un faciès altéré (par dissolution du gypse, dédolomitisation ou par altération superficielle, voir plus loin), d'autres, plus rares, semblent correspondre à des Sables de Beauchamp descendus dans les Marnes et Caillasses le long de galeries ou cavités de dissolution. Il est aussi possible que certains de ces lits sableux soient d'origine sédimentaire et en place au sein des Marnes et Caillasses.



Figure 7 - Exemple de carottes très fragmentées (déstructurées) et plus ou moins altérées vraisemblablement par dissolution du gypse ; en partie inférieure, du gypse alabastré blanc est fragmenté mais encore relativement bien préservé.

2.4 - Le Bartonien (sable et calcaire)

2.4.1. Les Sables de Beauchamp

Cette formation sableuse est positionnée entre les Marnes et Caillasses et le Calcaire de Saint-Ouen. Une (sous) formation sableuse (les Sables d'Auvers) est parfois

identifiée au sein des Sables de Beauchamp ou distinguée de ceux-ci, mais nous n'avons pas fait d'observation permettant de faire cette distinction.

Les Sables de Beauchamp sont constitués de sables carbonatés fins à très fins (sables limoneux à argileux). Leur épaisseur est variable, mais le plus souvent de 10-12 m.

Depuis les travaux de J. Simonnet (2010), un niveau argileux est fréquemment décrit en position médiane dans les Sables de Beauchamp sous le terme "d'écran médian argileux".

Sur les coupes (logs) géologiques des sondages du GPE, un tel niveau argileux médian est assez souvent décrit à partir de l'observation à l'œil nu (Figure 8).

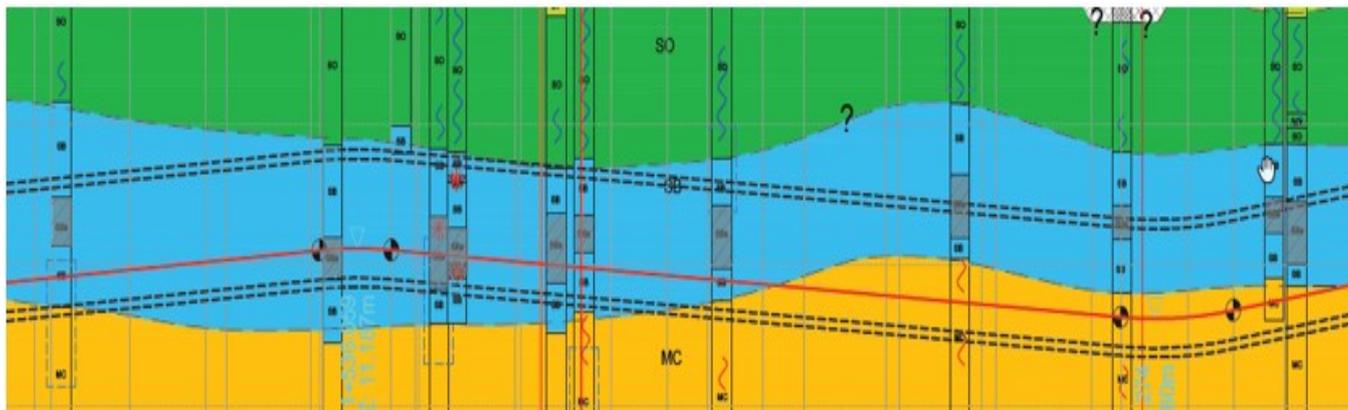


Figure 8 – Extrait d'un profil en long géologique d'un tronçon du GPE (L16, secteur St-Denis – Aubervilliers). Les sables de Beauchamp sont représentés en bleu et les niveaux argileux identifiés visuellement sur les carottes de sondages sont reportés en grisé sur les coupes de ces sondages. L'extrait couvre un linéaire d'environ 1,4 km, la couche des Sables de Beauchamp fait un peu plus de 10 m d'épaisseur.

Cependant, l'analyse des diagraphies de radioactivité naturelle (nombreuses le long de certains tronçons du GPE) met en évidence dans les Sables de Beauchamp une certaine variabilité de la radioactivité (classiquement interprétée comme révélatrice d'une variation de l'argilosité dans ces terrains), mais avec une répartition qui semble assez aléatoire : elle se manifeste au sein d'une même diagraphie et d'une diagraphie à l'autre (Figure 9). Le plus souvent ces diagraphies ne permettent pas d'identifier un niveau plus argileux à partir de la position médiane ou alors dans des sondages isolés, sans qu'il puisse être établi de corrélations entre sondages.

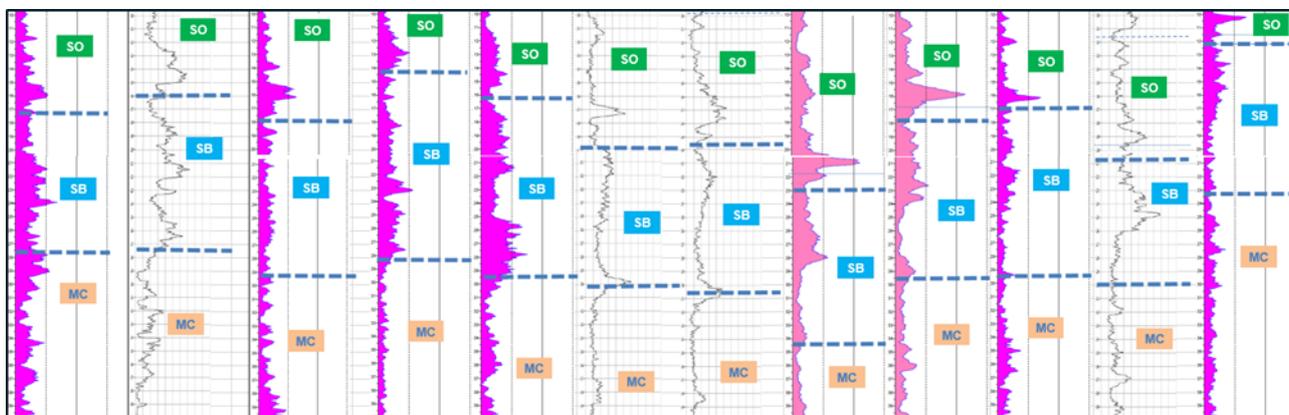
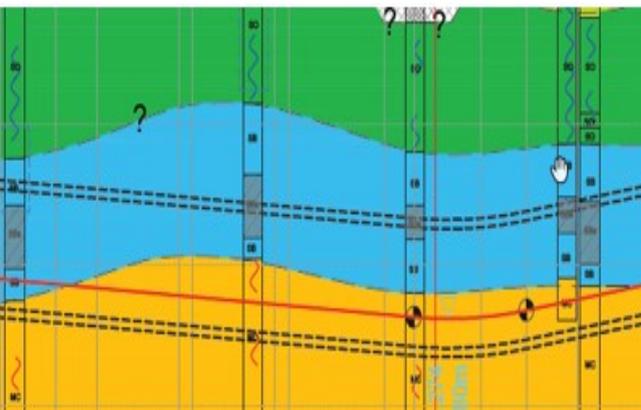


Figure 9 – Compilation d'extraits de diagraphies de radioactivité naturelle (gamma-ray) centrés sur les Sables de Beauchamp (entre les tirets bleus). Les diagraphies s'étalent sur une distance plurikilométrique avec une distance variable entre chaque diagraphie. GPE, Ligne 16.

Cependant, tant que l'on ne dispose pas d'informations précises sur les porteurs du signal gamma ray dans ces dépôts détritiques (mis à part les argiles ce signal peut être provoqué par la présence de glauconie, matière organique, pyrite, ou certains minéraux lourds), il convient de rester prudent quant à l'interprétation du signal gamma-ray dans les Sables de Beauchamp.

Quoi qu'il en soit, les observations de carottes comme les analyses de diagraphies gamma-ray ne permettent pas de généraliser l'existence d'un horizon argileux médian dans les Sables de Beauchamp.

Des lits ou des lentilles de gypse albaströïde sont localement observés sur une épaisseur (pluri)décimétrique



au sein des faciès argileux des Sables de Beauchamp (secteur du Stade de France) (Figure 10).



Figure 10 – Intercalation de 20-30 cm de gypse albaströïde blanc au sein du faciès argileux des Sables de Beauchamp (secteur de Saint-Denis – Stade de France).

Le sable de la formation des Sables de Beauchamp est généralement meuble et lâche en caisse, mais des niveaux rocheux plus ou moins durs d'épaisseur décimétrique à supramétrique sont observés de manière irrégulière en

sondage (Figure 11). La composition de ces niveaux n'est pas partout identique : il s'agit soit de niveaux

essentiellement cimentés par de la silice (quartzitiques), possiblement très cohésifs, très durs et très abrasifs, soit de lits principalement cimentés par du calcaire (parfois fossilifères) ou de la dolomie, concentrés dans certains secteurs (secteur de la gare GPE St-Denis-Pleyel).

Les intercalations quartzitiques ne se corrélient généralement pas d'un sondage à l'autre, ce qui traduit une géométrie lenticulaire comme il a pu être observé à l'air libre sur des talus de Sables de Beauchamp en région parisienne (*in* Simonnet, 2010). Les excavations réalisées dans le cadre du chantier de la ligne 16 ont mis en évidence des lentilles parfois de dimensions très réduites (épaisseur décimétrique pour un allongement pluridécimétrique). Ces lentilles siliceuses proviennent vraisemblablement d'une silicification et une induration post-dépôt selon des processus qui pourraient être comparables à ceux qui sont responsables de la transformation des Sables oligocènes de Fontainebleau (Tableau 1) en grès très durs (Thiry, 2017). À noter qu'en forage, on observe également, en plus des niveaux très siliceux très cohésifs, des niveaux de sable peu ou moyennement induré traduisant le caractère plus ou moins poussé du phénomène de grésification et silicification.

Les lits cimentés (concrétionnés ?) par du calcaire identifiés se corrélient parfois entre deux ou trois forages et traduisent pour leur part une extension latérale plus importante que les lentilles quartzitiques. Ces lits auraient une origine synsédimentaire, comme l'indique la présence de fossiles (ou de leur empreinte) dans ces faciès.



Figure 11 – Intercalation pluridécimétrique de calcaire dur et vacuolaire (carotte du bas) dans un encaissant sableux meuble. Sables de Beauchamp.

2.4.2. Le Calcaire de Saint-Ouen

Les tunnels des lignes 15 et 16 du Grand Paris Express recoupent partiellement ces terrains à de nombreuses reprises.

Le Calcaire de Saint-Ouen est une formation calcaire qui présente des similitudes fortes avec les Marnes et Caillasses. Il se distingue de celles-ci par une altération généralement plus développée (voir plus bas chapitre sur l'altération superficielle) du fait de sa fréquente position haute relativement à la surface topographique (*cf.* lignes 15 Est et 16) et par une proportion de gypse jamais aussi importante que dans les Marnes et Caillasses. Par ailleurs, le Calcaire de Saint-Ouen comprend à sa base deux horizons, de Mortefontaine et de Ducy, décrits séparément plus bas dans cet article.

L'épaisseur complète (non érodée) de cette formation est le plus souvent de l'ordre de 10-12 m (de moins de 10 m jusqu'à 15-20 m).

Lorsqu'elle est située en profondeur et pas ou peu altérée, la formation du Calcaire de Saint-Ouen est composée principalement de calcaire relativement tendre

("semi-rocheux") (Figure 12), comprenant des intercalations ou des fragments infradécimétriques à supramétriques de calcaire plus dur (plus "rocheux") et de quelques lits argileux de teinte marron sombre peu épais (centimétriques à supra décimétriques). D'après les analyses réalisées pour le GPE, le faciès dominant est généralement celui d'un calcaire marneux (< 30 % d'argiles), et contient peu de marnes au sens propre, comme c'est également le cas dans les Marnes et Caillasses (les faciès tendres altérés ne sont pas non plus des marnes). Les intercalations de calcaire franc sont plus ou moins dures et irrégulièrement présentes à des cotes variées, bien que plutôt localisées dans la partie inférieure de la formation.



Figure 12 - Carotte de calcaire de Saint-Ouen "semi-rocheux" préservé de l'altération prélevée en profondeur.

Du gypse est irrégulièrement associé au Calcaire de Saint-Ouen sous forme diffuse ou en lits massifs bien délimités. Le long des lignes 15 Est et 16 du GPE (Nord-Est et Est de Paris), les niveaux de gypse décrits localement au sein du calcaire ou à la base de celui-ci sont d'épaisseur pluridécimétrique à métrique.

La base de la Formation du Calcaire de Saint-Ouen est représentée sur une épaisseur à peu près métrique par **les horizons de Mortefontaine et de Ducy**. Ils ne sont cependant pas toujours faciles à identifier et ne sont donc pas toujours individualisés sur les coupes de sondages.

D'après nos observations (Figure 13), l'horizon de Mortefontaine comprend généralement au sommet un banc calcaire franc et fossilifère (niveau à *Avicula francei* de la littérature) de 15-20 cm surmontant un niveau sableux (non gréseux) pluridécimétrique beige à souvent gris-sombre et lâche en caisse. L'horizon de Ducy est représenté par un banc calcaire également de 15-20 cm ; sur les nombreuses carottes de forages du GPE observées (lignes 15 et 16), ce banc est généralement tendre à friable et parfois très peu individualisé. Lorsque ce banc n'est pas identifié, on observe généralement une continuité assez bonne entre les Sables de Beauchamp et Sables de Mortefontaine sus-jacents.

Nos observations sur le Calcaire de Ducy diffèrent de celles faites dans le passé ailleurs en région parisienne ou au cœur de Paris où le banc est décrit comme étant composé de dolomie et/ou de gypse (éventuellement dissout) (*cf.* Filliat et Duvauchelle, 1981 et Soyer, 1966). Ces contradictions apparentes indiquent une grande variabilité de la composition de cet horizon de Ducy à l'échelle de Paris et de sa périphérie.



Figure 13 – Carottes de la base du Calcaire de Saint-Ouen au-dessus des Sables de Beauchamp (SB) : banc de calcaire à *Avicula* (C Av), Sables de Mortefontaine (SM) et Calcaire de Ducy (CD).

2.4.3. Les Sables verts ou Sables de Montceau

Les Sables verts constituent une couche peu épaisse, métrique à rarement plurimétrique, parfois difficile à identifier, voire non identifiée en sondage, du fait de caractéristiques souvent peu tranchées par rapport aux formations qui l'encadrent.

D'un point de vue lithologique, les Sables verts identifiés sont assez hétérogènes. Ils sont faits de sable fin plus ou moins carbonaté et de marnes parfois dominantes (surtout en partie inférieure) voire exclusives. Dans ce dernier cas, c'est la teinte verdâtre à gris-vert du lit qui permet d'identifier l'horizon en sondage. Par ailleurs, dans certains secteurs, la position en altitude des Sables verts semble fluctuer entre sondages proches (en dehors de la présence d'ondulations identifiées). De plus, dans certains forages, au-dessus ou en dessous du niveau principal des Sables verts, des niveaux secondaires peu épais aux caractéristiques similaires sont présents. Ces observations amènent à considérer que les Sables verts constituent en fait des bancs lenticulaires discontinus, potentiellement décalés en altitude et éventuellement récurrents dans la zone de transition entre le Calcaire de Saint-Ouen et les Masses et marnes du Gypse.

En conséquence, l'horizon des Sables verts n'apparaît pas très bien caractérisé et ne peut en tout cas être systématiquement considéré comme un bon niveau repère pour mettre en évidence des géométries fines.

Du gypse est localement décrit au sein des Sables verts. Sous la butte de Clichy et au Nord de celle-ci (L16), un lit de gypse est fréquemment décrit à la base des Sables verts sur une épaisseur pluridécimétrique (jusqu'à 1,15 m dans le sondage concerné).

2.5 - Le Priabonien (gypse, marnes et calcaire)

2.5.1. Les Masses et marnes du Gypse et le Calcaire de Champigny

Les Masses et marnes du Gypse représentent une des formations emblématiques de la série tertiaire parisienne, du fait de la présence en son sein de couches épaisses (des "masses") de gypse (Figure 14) largement exploitées sous Paris dans le passé (des exploitations perdurent en dehors de Paris, comme par exemple à Villevaudé en Seine-et-Marne).

S'ajoutent dans cette formation les Marnes intercalaires et les Marnes infragypseuses et/ou Marnes à Pholadomyes classiquement distinguées (voir par exemple Filliat et Duvauchelle, 1981). Latéralement, vers l'Est – Nord-Est (au Nord de la vallée de la Marne le long de la ligne 16), les Masses et marnes du Gypse passent au Calcaire de Champigny, qui présente ses propres caractéristiques lithologiques (*cf.* description *infra*).

La formation des Masses et marnes du Gypse (MMG) n'est présente dans sa totalité que lorsqu'elle est recouverte par les terrains oligocènes plus récents. C'est notamment le cas au niveau des buttes de Paris (Butte de Montmartre) et alentour (Butte de Clichy, ...) où elle est encore protégée de

l'altération et de l'érosion par les terrains sus-jacents encore en place et notamment la couche quasi imperméable de l'Argile verte de Romainville (Tableau 1).

La composition des MMG et notamment la proportion de gypse (l'épaisseur et le nombre de couches de gypse) apparaît variable à l'échelle parisienne : quatre couches ou "masses" (en incluant la masse inférieure bartonienne, voir précédemment) d'épaisseur variable (jusqu'à 20 m pour la "haute masse" supérieure) sont bien identifiées dans le Nord-Est de Paris (butte de Clichy), alors que dans le Sud-Ouest de Paris notamment, le gypse n'est rencontré en forage que sur une ou des couches d'épaisseur nettement plus réduite.



Figure 14 - Carotte de gypse massif au sein des Masses et marnes du Gypse

Dans les zones de plaine de la région parisienne (telle que la Plaine de France), entre les buttes et les plateaux, la formation des Masses et marnes du Gypse n'est généralement représentée au-dessus des Sables verts que par une couche peu épaisse de marnes plus ou moins argileuses généralement assez compactes et d'aspect plutôt homogène, sauf pour ce qui est de la teinte qui varie de beige ou gris à vert-kaki ou marron (certaines passées sont bariolées) (Figure 15). Des intercalations plus argileuses ou au contraire plus calcaires sont possibles. Du gypse est localement décrit, mais de manière très irrégulière et anecdotique. Ce faciès marneux est ici interprété comme l'équivalent latéral résiduel des Masses et marnes du Gypse dans lesquelles le gypse initialement présent a été dissout et les marnes résiduelles ont été compactées à la suite de cette dissolution. Ces marnes résiduelles sont localisées en plaine là où les couches qui surmontent les MMG et les protègent de la dissolution ont été préalablement érodées.



Figure 15 – Faciès marneux résiduel des Masses et marnes du Gypse.

La transition latérale entre les Masses et marnes du Gypse et ces faciès résiduels peut être observée au droit de certains versants des buttes ou plateaux ; c'est le cas par exemple au Nord de la butte de Clichy (gypse en partie préservé dans cette zone de transition).

Ce faciès de marnes résiduelles est parfois abusivement identifié sous l'appellation de "Marnes à Pholadomyes" dans les interprétations et représentations de la géologie parisienne pour le Grand Paris Express. En fait, les Marnes à Pholadomyes correspondent à un lit particulier à la base des Masses et marnes de gypse, de surcroît difficile à repérer, et qui est peut-être présent à la base des marnes résiduelles, mais qui ne peut correspondre à l'ensemble de celles-ci.

Le **Calcaire de Champigny** représente une variation latérale vers l'Est, le Sud-Est et le Sud des Masses et marnes du Gypse, *via* un faciès de transition, plus marneux

et corrélativement plus pauvre en bancs de gypse. Il se caractérise notamment par la (quasi) disparition des masses ou couches épaisses de gypse. Les carottes prélevées en sondage pour la partie Sud-Est du GPE montrent une grande diversité de faciès, depuis des calcaires (et marnes ?) plus ou moins tendres potentiellement marneux (aucune analyse de la teneur en carbonates fournie), et de teinte variable (beige, verdâtre, gris) jusqu'à des calcaires franchement rocheux (durs) gris clair et vacuolaires. Certains faciès correspondant à des paléosols de type calcrètes sont présents plus au Sud et à l'Est (Quesnel, com. écrite). Une composante dolomitique est décrite dans ces terrains par G. Filliat et C. Duvauchelle (1981). Le gypse n'a été observé que dans les zones de transition entre les MMG et le Calcaire de Champigny.

Des silex de teinte brun sombre caractéristiques ont été régulièrement observés au sein d'un intervalle plurimétrique de calcaires beiges peu durs (Figure 16). Chaque silex montre une épaisseur pluricentimétrique à décimétrique sur les carottes.



Figure 16 – Calcaire à silex de la formation du Calcaire de Champigny.

2.5.2. Marnes supragypseuses

Les marnes supragypseuses sont constituées des Marnes d'Argenteuil en position inférieure et des Marnes de Pantin au-dessus ; elles représentent les formations de l'Eocène terminal sous les terrains oligocènes (Argile verte de Romainville et calcaire de Brie).

Les analyses sur échantillons de la teneur en carbonates réalisées dans le cadre des études de différents tronçons du GPE indiquent qu'il s'agit bien ici de marnes.

Cependant, ces analyses permettent de déterminer un caractère globalement plus calcaire des Marnes de Pantin et corrélativement plus argileux des Marnes d'Argenteuil, et quelques rares lits de calcaire franc ($\text{CaCO}_3 > 90\%$) ont été mis en évidence dans les Marnes de Pantin. Le caractère plus argileux des Marnes d'Argenteuil explique l'individualisation dans certains secteurs d'une nappe aquifère dans les Marnes de Pantin sus-jacentes.

Macroscopiquement et comme indiqué dans la littérature, les deux unités lithostratigraphiques se différencient généralement par leur teinte (Figure 17) : les Marnes bleues d'Argenteuil sont de couleur gris-vert-bleu relativement sombre ; au moins localement, leur partie basale présente une teinte beige-jaune-kaki clair souvent très nette. Les marnes blanches de Pantin ont une teinte généralement beige-blanchâtre à verdâtre (base souvent jaunâtre). Cette différence de teinte n'est cependant pas toujours bien marquée et des convergences de faciès sont observées entre les deux formations marneuses.



Figure 17 – Exemples de carottes de Marnes bleues d'Argenteuil (en bas) et de Marnes blanches de Pantin.

3. L'altération superficielle des terrains éocènes

Les formations géologiques cénozoïques sont généralement fortement altérées lorsqu'elles sont en position superficielle et soumises aux eaux pluviales qui s'infiltrent en leur sein.

On a vu que cette altération était vraisemblablement responsable de la dissolution quasi-totale du gypse dans les Masses et marnes du Gypse non protégées en surface et leur transformation en marnes résiduelles.

Le Calcaire de Saint-Ouen est fréquemment en position superficielle dans les plaines au Nord (Plaine de France) et à l'Est de Paris. Dans ce cas, il se présente selon un faciès calcaire généralement tendre et/ou très fragmenté (déstructuré) (Figure 18) traduisant une altération par dissolution diffuse de la calcite et sans doute de gypse ; les cavités sont absentes ou très rares (LCPC, 1967). Cet état attendri et déstructuré du Calcaire Saint-Ouen contraste clairement avec le caractère nettement plus compact de la formation lorsque, dans quelques cas, elle est recoupée par forage en position relativement profonde (par exemple sous la bordure de la butte de Clichy).



Figure 18 – Faciès superficiels altérés du Calcaire de Saint-Ouen. En haut : faciès altéré homogène plus ou moins meuble. En bas : faciès altéré meuble et fragments résiduels de calcaire dur.

Dans ce contexte altéré et déstructuré, les bancs de calcaire plus dur sont souvent préservés sous forme de fragments anguleux. Certains fragments sont silicifiés et traduisent potentiellement des phénomènes d'altération additive qui seraient comparables aux silicifications superficielles observées dans les terrains oligocènes (meulière du Calcaire de Brie ou de la Meulière de Montmorency, grès siliceux dans les Sables de Fontainebleau).

Dans les Sables de Beauchamp, les effets de l'altération superficielle se manifestent principalement par une teinte ocre souvent observée dans la partie supérieure de la formation, lorsque celle-ci est proche de la surface.

Les Marnes et Caillasses et le Calcaire grossier sont rarement en position superficielle, mais lorsque c'est le cas, ces deux formations subissent également un "attendrissement" net (dissolution intime du calcaire) et/ou une désagrégation par dissolution du gypse (Marnes et

Caillasses) et du calcaire. Si l'altération des Marnes et Caillasses par dissolution du gypse notamment en profondeur est un phénomène bien connu à Paris, l'altération des Marnes et Caillasses et du Calcaire grossier en position superficielle (Figure 19 et Figure 20) est moins connue et a été parfois sous-estimée bien qu'en fait souvent observée (Egal et Piraud, 2018 et Figure 21, voir aussi observations de Quesnel *in* Grataloup *et al.*, 2020). Elle entraîne toutefois un affaiblissement potentiellement important des caractéristiques géomécaniques de la Formation : le fontis qui s'est produit en 2003 dans la cour de l'école A. Perret à Paris lors de la construction de la ligne 14 (chantier Meteor, *cf.* Rat, 2010) peut être relié à cet affaiblissement du Calcaire grossier par altération superficielle.



Figure 19 – Faciès superficiel altéré plus ou moins meuble des Marnes et Caillasses .



Figure 20 – Faciès superficiel altéré et attendri du Calcaire grossier .

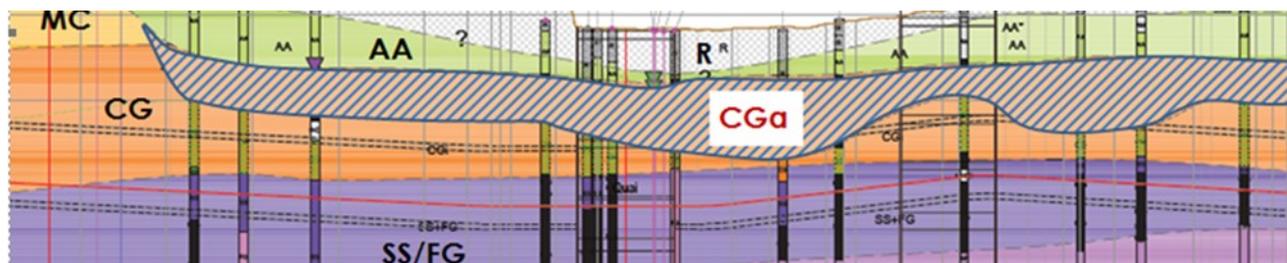


Figure 21 – Exemple d'intervalle altéré CGa (hachures) du Calcaire grossier en position superficielle. Extrait du profil géologique en long de la ligne 16 (secteur de la vallée de la Marne, près de Champigny). Longueur du profil = 1,5 km environ.

Des passées sableuses grossières sont parfois observées dans les Marnes et Caillasses ou le Calcaire grossier ; certaines de ces passées sont clairement des faciès altérés désagrégés.

Dans certains secteurs, le Calcaire grossier en position profonde présente des passées sombres et plus ou moins friables (Figure 22) interprétées comme des faciès altérés profonds distincts des faciès altérés superficiels ; ils pourraient peut-être résulter de phénomènes d'altération par battement de nappe lorsque celle-ci était en position nettement plus basse que de nos jours (pendant la dernière période glaciaire ?).



Figure 22 – Faciès altéré sombre atypique du Calcaire grossier observé en profondeur .

Pour leur part, les sables yprésiens présentent fréquemment un faciès altéré (oxydé) de teinte ocre sur une épaisseur parfois plurimétrique, lorsqu'ils sont actuellement positionnés près de la surface (*cf.* Ouest parisien).

4. Conclusion

Les observations et descriptions précédentes mettent en évidence, sans doute encore plus qu'il n'était établi jusqu'à présent, la forte variabilité et les hétérogénéités de la série éocène sous Paris et sa périphérie, au sein des grandes entités lithostratigraphiques bien délimitées. Les causes de cette variabilité sont en grande partie d'origine sédimentaire (*cf.* notamment les changements de faciès et les variations latérales au sein de l'Yprésien), mais également de manière notable du fait de phénomènes d'altération divers (*cf.* bancs gréseux durs au sein des Sables de Beauchamp, marnes résiduelles issues des Masses et marnes du Gypse, dissolution profonde du gypse dans les Marnes et Caillasses, dégradation du Calcaire grossier en position superficielle).

5. Remerciements

L'auteur remercie la Société du Grand Paris et la SNCF (Éole) qui ont permis la publication de ces résultats, et plus particulièrement Charles Kreziak (SGP) qui a effectué une première relecture du manuscrit avant soumission, Florence Quesnel et Fabrice Moreau pour leur travail appliqué et constructif de « reviewers » et Denis Thieblemont pour la relecture finale du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubry M.P.** (1983) – Biostratigraphie du Paléogène épicontinental de l'Europe du Nord-Ouest : étude fondée sur les microfossiles calcaires, Université Claude Bernard-Lyon1, Département des Sciences de la Terre.
- Briaux J.** (2015) – Le Cénozoïque du Bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence. Thèse, Univ. Rennes, 450 p.
- Charles N., Simien F., Hanot, F., Quesnel F. et Lacquement F.** (2020) – Paris et ses environs, carte géologique simplifiée à vocation pédagogique, éch. de restitution 1/80 000, BRGM éditeur.
- Diffre P.** (1980) - Carte géologique de Paris et sa grande banlieue à 1/25 000 (feuilles Est et Ouest) et sa notice explicative. BRGM éditeur.
- Egal E., Kreziak C., Saitta A., Marlinge J. et Priol G.** (2017) – Méthodologie de détection des zones déstructurées et des cavités dans les terrains gypseux le long de la ligne 16 du Grand Paris Express. Congrès international de l'AFTES, 15^{ème} édition, Paris. Article disponible sur <http://www.aftes.asso.fr/congres-aftes.html>.
- Egal E. et Piraud J.** (2018) – Révision de quelques idées reçues sur le Lutétien parisien (Calcaire grossier, Marnes et Caillasses), Journées nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur – Champs sur Marne 2018. Article disponible sur <https://jngg2018.sciencesconf.org/>.
- Filliat G. et Duvauchelle C.** (1981) - Géologie et géotechnique de la région parisienne, *in* Filliat G., La pratique des sols et fondations, chap. 29, p1193-1347, Moniteur.
- Gély J.-P.** (2009) - Le Lutétien : une période charnière de l'histoire du Bassin parisien. Saga Information, 284.
- Gély J.-P.** (2016) - Le Paléogène du bassin de Paris : corrélations et reconstitutions paléogéographiques. Bulletin inf. Géol. bass. Paris, 53, 4, pp. 2 - 13.
- Gigan J.P.** (1974) – Relations entre composition, texture et quelques propriétés géotechniques des marnes et caillasses, Lutétien supérieur. Bull. Lab. Ponts et Chaussées, 72- réf 1486.
- Grataloup S., Briaux J., Vernoux J.F., Cochery R., Closset L., Quesnel F., Assy Y., Bourguine B., Bault V., Bernachot I., Badinier G., Neveux A., Beaufiles M., Bonnefon C., Lanher V., Andrieu S.** (2020) – Projet OPERA - Coupe géologique le long de la ligne 15 Ouest et Avancement des travaux – Jalon 1. Rapport intermédiaire. BRGM/RC-69839-FR, 101 p., 40 ill., 2 ann.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)** (1967) – Essai d'étude régionale de géologie appliquée au génie civil. CR de journées d'études des 5 et 6 octobre 1967.
- Mégny F.** (1991) - Carte géologique de France à 1/50 000 et sa notice explicative : feuille L'Isle-Adam, n°153 (3^{ème} édition). BRGM éditeur.
- Merle D.** coord. (2008) - Stratotype Lutétien, Museum national d'Histoire naturelle, Paris ; Biotope, Mèze ; BRGM, Orléans, 288 p. (Patrimoine géologique ; 1).
- Rat P.** (2010) – L'effondrement en cours de construction du tunnel "Meteor". Revue française de géotechnique n°131-132.
- Simonnet J.** (2010) – Les Sables de Beauchamp. Faciès et propriétés géotechniques. Incidences sur les travaux en région parisienne. Mémoire diplôme ingénieur CNAM.
- Soyer R.** (1953) – Géologie de Paris. Mémoire explicatif de la carte géologique de France, Imp. nationale, Paris.
- Soyer R.,** coord. (1966) - Carte géologique de France à 1/50 000 et sa notice explicative : feuille Paris, n°183 (2^{ème} édition). BRGM éditeur.
- Soyer R. et Cailleux A.** (1960) – Géologie de la région parisienne, Collection Que-sais-je, n°854.
- Thiry M.** (2017) – Curiosités géologiques du massif de Fontainebleau, 116 p. BRGM Editions.
- Toulemont M.** (1987) – Les gypses lutétiens du bassin de Paris. Sédimentation, karstification et conséquences géotechniques. Thèse d'Etat (1986). Rap. LCPC, série GT24 géotechnique – Mécanique des sols – Géologie. 318 p.

Figures hors texte

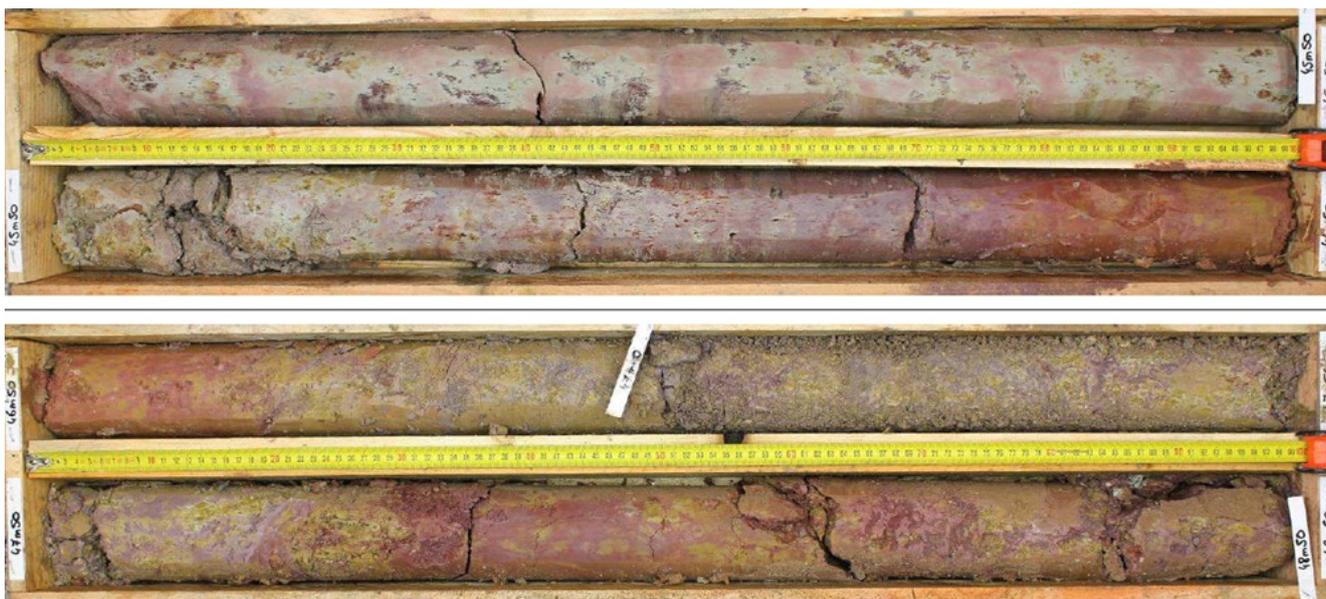


Figure 1 - Argile plastique : faciès bariolé typique. NB : sur toutes les photos de caisses de carottes présentées ci-après, celles-ci font 1 m de longueur.

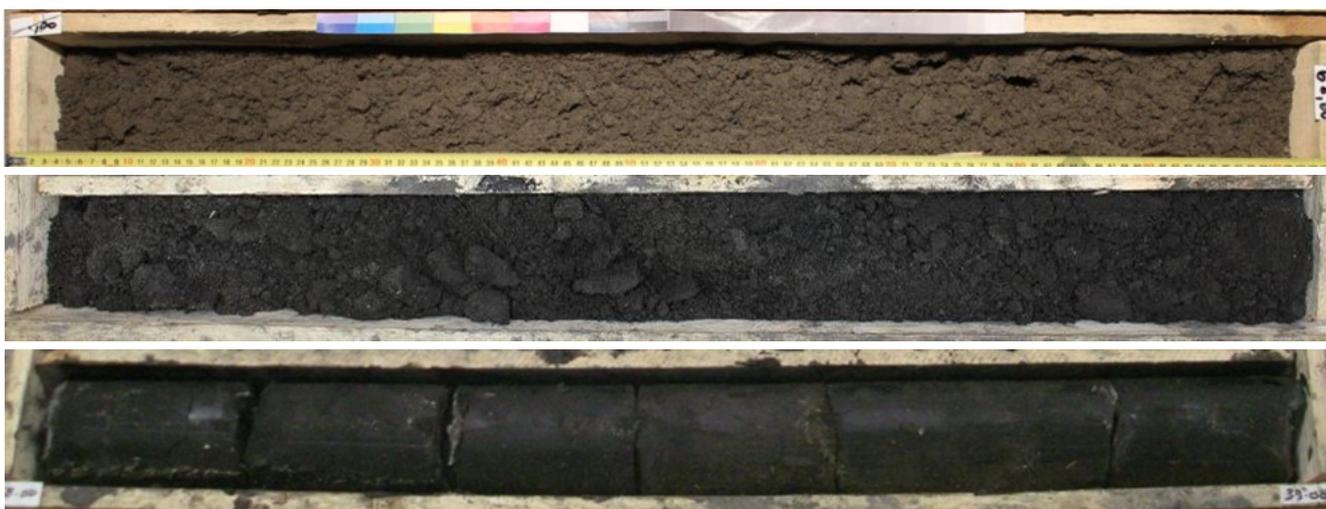


Figure 2 - Faciès de l'Yprésien au-dessus de l'Argile plastique, de haut en bas : sables bruns, sables noirs ligniteux, argile noire ligniteuse.

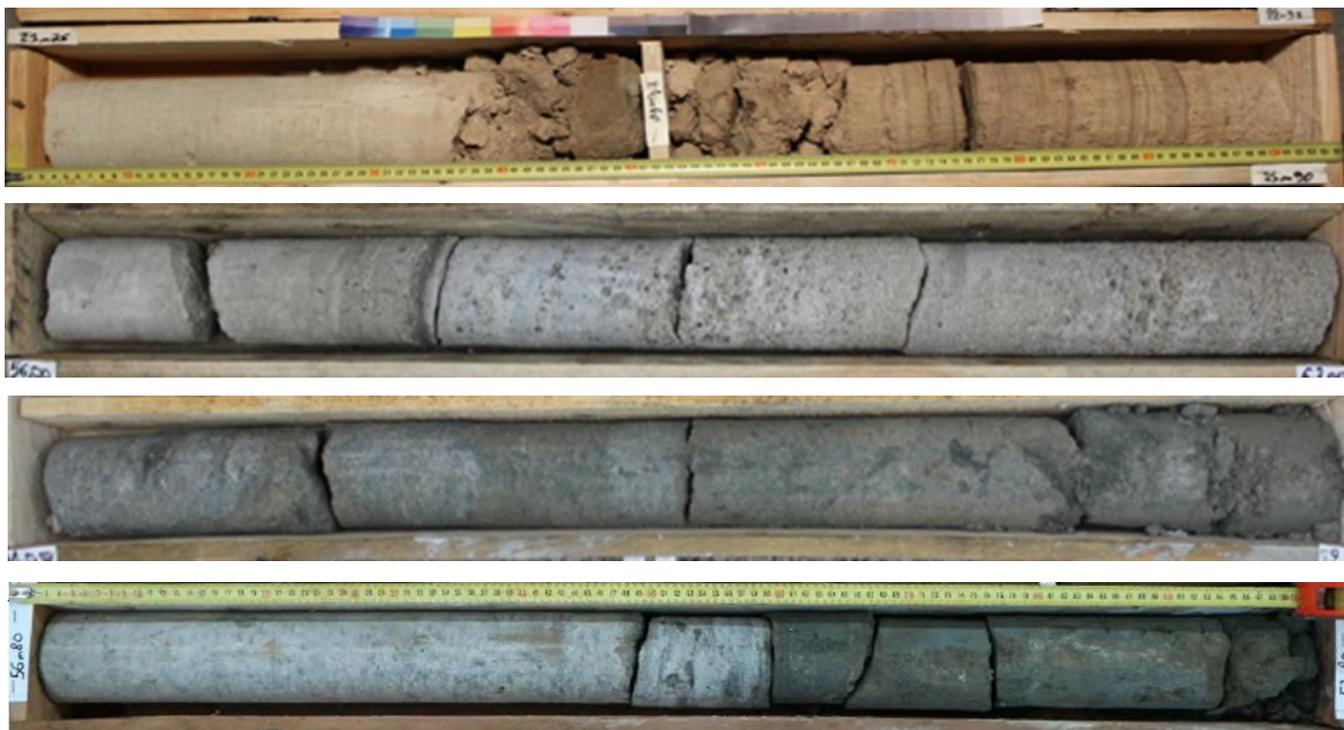


Figure 4 - Différents faciès ou bancs de la formation du Calcaire Grossier. De haut en bas : banc de calcaire clair, fin et dur (base du « Banc de Roche ») sur calcaire plus tendre et plus sombre ici lité (dolomitisé ?) ; calcaire gris rocheux à passées grossièrement fossilifère et vacuolaire ; calcaire irrégulièrement glauconieux et, en bas à droite, passée vert sombre plus tendre de composition probablement marneuse (banc vert possible).



Figure 5 - Marnes et Caillasses : faciès dominant de calcaire gris-beige clair "semi-rocheux" avec intercalations pluricentimétriques/décimétriques (bancs ou fragments) de calcaire dur gris très clair et une intercalation infra décimétrique d'argile marron sombre. L'ensemble est ici globalement massif et très peu altéré.



Figure 7 - Exemple de carottes très fragmentées (déstructurées) et plus ou moins altérées vraisemblablement par dissolution du gypse ; en partie inférieure, du gypse alabastré blancâtre est fragmenté mais encore relativement bien préservé.



Figure 10 - Intercalation de 20-30 cm de gypse alabastrite blanc au sein du faciès argileux des Sables de Beauchamp (secteur de Saint-Denis – Stade de France).



Figure 11 – Intercalation pluridécimétrique de calcaire dur et vacuolaire (carotte du bas) dans un encaissant sableux meuble. Sables de Beauchamp.



Figure 12 - Carotte de calcaire de Saint-Ouen "semi-rocheux" préservé de l'altération prélevée en profondeur.



Figure 13 - Carottes de la base du Calcaire de Saint-Ouen au-dessus des Sables de Beauchamp (SB) : banc de calcaire à *Avicula* (C Av), Sables de Mortefontaine (SM) et Calcaire de Ducy (CD).



Figure 14 - Carotte de gypse massif au sein des Masses et marnes du Gypse.



Figure 15 - Faciès marneux résiduel des Masses et marnes du Gypse.



Figure 16 - Calcaire à silex de la formation du Calcaire de Champigny.



Figure 17 - Exemples de carottes de Marnes bleues d'Argenteuil (en bas) et de Marnes blanches de Pantin.



Figure 18 – Faciès superficiels altérés du Calcaire de Saint-Ouen. En haut : faciès altéré homogène plus ou moins meuble. En bas : faciès altéré meuble et fragments résiduels de calcaire dur.



Figure 19 - Faciès superficiel altéré plus ou moins meuble des Marnes et Caillasses.



Figure 20 - Faciès superficiel altéré et attendri du Calcaire grossier.



Figure 22 – Faciès altéré sombre atypique du Calcaire grossier observé en profondeur.